Aeas
Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento

Control del agua no registrada

Metodología para una correcta implementación

ENERO 2014

ÍNDICE

Presentación 3

Prólogo 5

1. Introducción. Precedentes 6

2. Balance Hídrico de un Sistema de Distribución. Indicadores asociados 8

2.1. Consideraciones iniciales 8
2.2. Propuesta actual de Balance Hídrico. Recomendaciones para su implantación 13
2.3. Conceptos del Balance. Definiciones 14
2.4. Propuesta actual de Balance Hídrico. Recomendaciones para su implantación 15
2.5. Indicadores Hídricos de repercusión mediática 23

3. Pérdidas reales 25

3.1. Caracterización y Cuantificación de las pérdidas reales 25
3.2. Sectorización 40
3.3. Microsectorización Dinámica 45
3.4. Tecnologías existentes para la detección y localización de fugas 48

4. Pérdidas aparentes 83

4.1. Introducción 83
4.2. Consumo no autorizado 83
4.3. Imprecisiones equipos de medidas 87

5. Conclusiones 126

6. Bibliografía 127

PRESENTACIÓN

El Agua No Registrada (ANR) es el indicador de eficiencia de las redes de abastecimiento de agua más extendido del mundo. Definido como la diferencia entre el volumen de agua suministrada al sistema y el volumen de agua registrada en los contadores de los usuarios, engloba los consumos autorizados no medidos, los consumos no autorizados (fraudes), los errores de medida y las pérdidas físicas en la red.

En España, el valor medio de este indicador ronda actualmente el 25%. Sin embargo, a nivel mundial se estima en un 40% y, por ejemplo, en las ciudades de Latinoamérica la cifra oscila entre el 33 y el 50%. Esto quiere decir que, de media en el mundo, por cada 100 litros suministrados a la red sólo 60 son registrados en los contadores de los usuarios. Por ello, el control del ANR es una prioridad para las entidades operadoras de cualquier municipio o ciudad como medida de optimización de la gestión del servicio. Un incremento de este indicador supone un mayor uso del agua y, en consecuencia, un aumento del consumo energético. Es decir, a mayor ANR menor eficiencia y sostenibilidad del sistema.

Las entidades operadoras en España (servicios municipales y empresas públicas, privadas y mixtas) han realizado en estos años un gran esfuerzo para reducir el ANR y ser más eficientes. Lo han conseguido a través del fomento de la investigación y de la implantación de nuevas tecnologías como son los sistemas de gestión avanzada de las presiones en la red, la microsectorización, el telecontrol, las campañas sistemáticas de detección de fugas basadas en modernas técnicas acústicas y de correlación entre otras. Sin embargo, a pesar de este esfuerzo, el índice ANR, en España, ha repuntado en el año 2012, en nuestra opinión debido al envejecimiento de las redes provocado por el déficit de inversión pública acumulado desde el inicio de la crisis económica. Dato que nuestro sector ve con preocupación. Por todos estos factores, es más necesario que nunca apoyarse en la experiencia y las buenas prácticas en el Control del ANR que exponen nuestros prestigiosos expertos en este documento.

Desde sus orígenes, la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS) ha mostrado su preocupación e interés en mejorar la eficiencia en la gestión del servicio público de un bien esencial. Dentro de esta preocupación, el ANR se ha considerado, desde hace años, como un indicador de referencia sobre la eficiencia y gestión de las redes. Así, ya en nuestras Jornadas Técnicas del 2001 se presentaba el trabajo “Últimas tendencias en el Control del Agua No Registrada”. Desde aquella fecha,

han sido numerosas las publicaciones y ponencias relacionadas (ej. Documento Guía, Manual de Indicadores de Gestión, Estrategias para la optimización, Experiencias prácticas etc.).

AEAS es la asociación de referencia en el sector del agua urbana en España. Con 42 años de trayectoria, engloba entidades operadoras (servicios municipales y empresas públicas, privadas y mixtas que ofrecen servicios de abastecimiento y/o saneamiento y depuración al 80% de la población española), empresas relacionadas con el ciclo del agua, organismos públicos y expertos individuales. Así mismo, colabora con organismos internacionales relevantes en los aspectos relacionados con el ciclo del agua como son EurEau, IWA, OCDE o WssTP.

El trabajo de AEAS se realiza a través de sus 7 Comisiones y 3 Grupos Transversales englobando el ciclo integral del agua urbana. La Comisión 3 es la encargada de la parte correspondiente a las redes de abastecimiento de agua potable (normativa, operación y mantenimiento, materiales, SIG, contadores, instalaciones interiores etc.). En el año 2008, esta Comisión creó el Grupo de Trabajo específico de Control del Agua No Registrada con el objetivo de estudiar los aspectos fundamentales en la optimización de la gestión de la red de abastecimiento (rendimientos, indicadores, metodologías etc.).

Este documento, fruto de los conocimientos y experiencias acumuladas por los integrantes del Grupo, presenta de forma clara, precisa y práctica los conceptos, modelos y procedimientos necesarios para comprender y cuantificar el ANR de una red de abastecimiento.

Como Presidente de AEAS, agradezco profundamente la labor del Grupo, que con su esfuerzo y dedicación han hecho posible este documento, especialmente a su coordinador, Andrés García Hernández, así como al presidente de la Comisión 3ª Félix Mendaza y al secretario de la misma, José Antonio Gómez Fernández-Cuesta.

Finalmente, quiero recordar que, como todas las publicaciones de AEAS, este documento “Control del Agua No Registrada” queda a disposición de todos los profesionales que lo deseen. Esperamos que sea útil y de interés.

Fernando Morcillo Bernaldo de Quirós
PRESIDENTE DE AEAS

PRÓLOGO

Desde que el mundo es mundo, el agua ha sido un elemento imprescindible para la vida y el desarrollo de la humanidad. Durante muchos siglos la naturaleza nos ha permitido poder contar con todo el agua que el ser humano ha necesitado para su desarrollo y confort, pero la evolución del crecimiento de la población en el mundo ha ido haciendo que la balanza recursos vs usos se vaya desplazando indicando que el recurso no es inagotable y teniendo que tomar conciencia para su preservación. El tema es de tal calado que el Papa Francisco en su encíclica, recientemente publicada (mayo 2015), Laudato Si' cita textualmente [30] el acceso al agua potable y segura es un derecho humano básico, fundamental y universal, porque determina la sobrevivencia de las personas, y por lo tanto es condición para el ejercicio de los demás derechos humanos.

Desde AEAS llevamos muchos años trabajando por mejorar nuestra labor y fruto de nuestra inquietud es el presente documento elaborado en la Comisión 3ª y que quiere poner a disposición de toda la sociedad, las reflexiones y conclusiones sobre la mejora en la eficiencia de nuestros abastecimientos, analizando en profundidad el alcance del Agua No Registrada (ANR) en nuestras redes de abastecimiento como paso previo e imprescindible para su reducción.

Queremos mostrar nuestro más entrañable agradecimiento a las personas que directamente han colaborado para que este documento sea hoy una realidad.

Andrés Dueñas Jurado	(ATLL)
Andrés García Hernández	(EMASESA)
Antonio Peralta Triviño	(AGUAS DE BARCELONA)
Benito Mozo Rodríguez	(MEJORAS ENERGÉTICAS)
Carlos García García	(AQUA-CONSULT INGENIEROS)
Dionisio Claver Morcillo	(AMVISA)
Fernando Bagán Aparici	(FACSA)
Francisco Javier Fernández Delgado	(CANAL DE ISABEL II GESTIÓN)
Joan Collet Fisa	(AGUAS DE BARCELONA)
María Humbelina Vallejo Aparicio	(CANAL DE ISABEL II GESTIÓN)
Miguel Ángel Pérez Navarro	(SAINT GOBAIN)
Miguel Vázquez García	(MEJORAS ENERGÉTICAS)
Víctor Pinedo Soldevila	(SENSUS)

José Antonio Gómez Fernández-Cuesta
Secretario Comisión 3ª

1

INTRODUCCIÓN. PRECEDENTES

El volumen de Agua No Registrada, definido como la diferencia entre el volumen distribuido a un sistema y el volumen registrado en los contadores de clientes de dicho sistema, ha sido tradicionalmente uno de los indicadores de más relevancia en la eficiencia de un sistema.

En el año 2008 se constituye dentro de la Comisión 3ª de AEAS el Grupo de Trabajo "Control del Agua No Registrada" con la idea fundamental de transferencia de conocimientos y refuerzo de los mismos a través del intercambio de información y experiencias:

- Aspectos relacionados con el Balance Hídrico de una red, la correcta caracterización y cuantificación de sus conceptos y la definición de un conjunto relevante de indicadores hídricos.
- Conjunto de actuaciones que permiten el control del Agua No Registrada y de las pérdidas y la optimización del rendimiento de una red.
- Implantación de estudios y métodos para ayuda a la gestión.

El presente documento pretende presentar una metodología que, con un enfoque eminentemente práctico, permita sentar las bases para centrar el problema, a través de la definición precisa de conceptos, de la implantación de un modelo de balance único que permita cuantificar los distintos volúmenes que intervienen y de la presentación de una serie de procedimientos para comprender el problema y permitir cuantificar las diferentes parcelas que componen el total de Agua No Registrada de un sistema.

Los precedentes del actual trabajo hay que buscarlos en el manual de Indicadores de la IWA (International Water Association) y en el Documento Guía para el Control del Agua No Registrada publicado en su momento por AEAS, así como en el trabajo previo también de AEAS plasmados en el documento borrador "Manual de Indicadores de Gestión para Abastecimientos de Agua".

Los objetivos marcados inicialmente en el seno del GT fueron los siguientes:

- Establecimiento de procedimientos y estrategias enfocadas al cálculo y control del ANR.
- Definición de las actuaciones necesarias para la optimización del rendimiento hidráulico de una red de distribución.

- Unificación de criterios en la definición de Balances e Indicadores Hídricos.
- Publicación a la finalización de los trabajos de un documento que pueda servir de ayuda a la gestión de nuestras empresas y que pueda ser también una guía de recomendaciones para cualquier técnico en general.

El trabajo desarrollado a lo largo de todo este tiempo, y el actual documento también así lo refleja, se ha estructurado en los siguientes bloques de contenido: Balance Hídrico e Indicadores, Cuantificación y Caracterización del ANR, Pérdidas Reales y Pérdidas Aparentes.

Esperamos que todos los planteamientos, estudios y conclusiones que en él se recogen sean tanto elementos de ayuda a la gestión de nuestras empresas como una guía de recomendaciones para cualquier técnico en general.

2

BALANCE HÍDRICO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN. INDICADORES ASOCIADOS

2.1. CONSIDERACIONES INICIALES

En el presente apartado obtendremos el Balance Hídrico de un Sistema de Distribución, a partir del cual definir los Indicadores Hídricos, así como los más apropiados desde el punto de vista mediático. Del Balance Hídrico esperamos una ecuación de equilibrio entre las aportaciones de agua tratada al sistema y las salidas del mismo, en un intervalo de tiempo determinado.

Tras consensuar el Balance estableceremos los Indicadores Hídricos como ratios que nos ayuden a evaluar la eficiencia de la Red de Distribución y a establecer aquellos resultados que serán útiles para su difusión. Sería conveniente que se adaptaran las definiciones de la Encuesta de AEAS a los conceptos del Balance propuesto, con el fin de homogeneizar ambas terminologías.

Tanto el Balance como los Indicadores han sido objeto, a lo largo de los años, de diferentes propuestas, de las que hemos seleccionado estas tres, por su utilidad como punto de partida para nuestro Balance Propuesto, que expondremos más adelante.

1. En primer lugar un documento de IWA, cuyo Balance es previo al tratamiento de agua en la ETAP, ya que incluye las pérdidas de agua bruta en su conducción y en el tratamiento. No considera las estimaciones de consumos autorizados como pérdidas, denominándolas consumos no medidos.

La IWA incorpora 133 indicadores clasificados en seis grupos, con tres niveles de importancia, destacando 26 de ellos como de máxima prioridad, clasificados como sigue:

Indicadores de Recursos Hídricos
- Ineficiencia del uso de los Recursos Hídricos

Indicadores de Personal
- Empleados por acometida

<table>
<tr><td rowspan="8">Volumen de entrada al sistema (Volumen Suministrado)</td><td rowspan="4">Consumo Autorizado</td><td rowspan="2">Consumo Autorizado Facturado</td><td>Consumo facturado (incluyendo agua exortada)</td><td rowspan="2">Agua facturada</td></tr>
<tr><td>Consumo facturado no medido</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Consumo Autorizado NO Facturado</td><td>Consumo no facturado medido</td><td rowspan="6">Agua NO facturada</td></tr>
<tr><td>Consumo no facturado no medido</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Pérdidas de agua</td><td rowspan="2">Pérdidas Aparentes</td><td>Consumo no autorizado</td></tr>
<tr><td>Imprecisión de medida</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Pérdidas Reales</td><td>Pérdidas reales en conducciones de agua bruta y tareas de tratamiento (si procede)</td></tr>
<tr><td>Fugas en transporte y/o conducciones de distribución</td></tr>
<tr><td>Fugas y desbordamientos en transporte y/o depósitos de almacenamiento</td></tr>
<tr><td>Fugas en acometidas hasta el punto de medida</td></tr>
</table>

Indicadores físicos

- Capacidad de Tratamiento

Indicadores Operacionales

- Rehabilitación de Tuberías
- Rehabilitación de Acometidas
- Pérdidas de agua - Pérdidas reales
- Fallos en tuberías
- Fallos en acometidas
- Eficiencia de lectura del cliente
- Eficiencia de lectura del cliente residencial
- Pruebas realizadas (calidad del agua)

Indicadores de Calidad de Servicio

- Cobertura del suministro a hogares y empresas
- Cobertura del suministro a edificios
- Cobertura a la población
- Fuentes públicas: distancia a hogares y cantidad de agua consumida

- Continuidad del suministro
- Calidad de agua suministrada
- Quejas del servicio
- Quejas de facturación

Indicadores Financieros

- Costes de Explotación Unitarios
- Tarifa Promedio de Agua por Consumo Directo
- Tarifa Promedio de Agua Exportada
- Ratio de Cobertura de Costes
- Ratio de Cobertura de Costes de Explotación
- Contribución de Fuentes internas a la inversión
- Solvencia Técnica
- Agua no facturada en volumen

2. El siguiente Balance se propone en el "Documento Guía para el Control del Agua no Registrada" (AEAS Octubre 2003), en el que el concepto principal de partida es el Volumen de Agua no Registrada distinguiendo entre Pérdidas Reales y Pérdidas Aparentes.

<table>
<tr><td rowspan="4">Agua Suministrada</td><td colspan="4">Agua Exportada a otros abastecimientos</td></tr>
<tr><td rowspan="8">Agua Distribuida</td><td colspan="3">Agua registrada</td></tr>
<tr><td rowspan="7">Agua NO registrada</td><td rowspan="3">Pérdidas Reales</td><td>Fugas en red</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Agua producida en ETAP</td><td>Fugas en acometidas</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Agua extraida en pozos propios</td><td>Desbordamientos de depósitos</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Pérdidas Aparentes</td><td>Subcontaje</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Agua importada</td><td>Fraudes</td></tr>
<tr><td>Estimaciones</td></tr>
<tr><td>Purgas en red</td></tr>
</table>

En este, la premisa era que se debía medir todo el volumen y las estimaciones pasaban a ser Pérdidas Aparentes. Se contempla el Agua Suministrada como suma de diferentes orígenes y se descuenta de la Distribución lo Exportado a otros abastecimientos.

De este Balance surgían una serie de Indicadores, algunos de ellos también recomendados por IWA:

- Medida del Volumen de ANR
- Medida del Volumen de Pérdidas Reales
- Medida el Volumen de Pérdidas Aparentes
- Indicador Técnico de Pérdidas Reales (TIRL)
- Indicador de Nivel Mínimo de Pérdidas Reales (UARL)
- Índice Estructural de Fugas (ILI)

<table>
<tr><td rowspan="3">Agua Suministrada</td><td colspan="4">Agua Exportada a otros abastecimientos</td></tr>
<tr><td rowspan="9">Agua Distribuida</td><td colspan="2" rowspan="2">Agua registrada</td><td>Consumo Autorizado Facturado</td></tr>
<tr><td>Consumo Autorizado NO Facturado</td></tr>
<tr><td rowspan="7">Agua producida en ETAP

Agua extraida en pozos propios

Agua importada</td><td rowspan="7">Agua NO registrada</td><td rowspan="3">Pérdidas Reales</td><td>Fugas en red</td></tr>
<tr><td>Fugas en acometidas</td></tr>
<tr><td>Desbordamientos de depósitos</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Pérdidas Aparentes</td><td>Subcontaje</td></tr>
<tr><td>Fraudes</td></tr>
<tr><td>Estimaciones</td></tr>
<tr><td>Purgas en red</td></tr>
</table>

3. Por último, el documento en fase de borrador del "Manual de Indicadores de Gestión para Abastecimientos de Agua" (AEAS Mayo 2005), introduce la división del Volumen de Agua Registrada distinguiendo entre Consumo Autorizado Facturado y No Facturado.

Este Borrador contiene un listado de 33 Indicadores para su revisión y comentario, clasificados en 6 grupos:

Indicadores de Recursos Hídricos

- Ineficiencia del uso de los Recursos Hídricos
- Procedencia de agua

Indicadores de Personal
- Empleados por acometida
- Formación
- Absentismo

Indicadores físicos
- Capacidad de Tratamiento
- Densidad de Contadores

Indicadores Operacionales
- Renovación de Tuberías
- Renovación de Acometidas
- Agua no Registrada en la Distribución
- Roturas Naturales (en Tuberías o en Acometidas)
- Roturas Provocadas (en Tuberías o en Acometidas)
- Roturas Localizadas (en Tuberías o en Acometidas)
- Eficiencia de lecturas de Contadores
- Inspección de red
- Control Activo de Fugas
- Agua no Facturada en Volumen

Indicadores de Calidad de Servicio
- Continuidad de Suministro
- Pruebas Realizadas
- Calidad de Agua Suministrada
- Quejas de Servicio
- Eficiencia de Nueva Acometida
- Eficiencia de Reparación de Acometida

Indicadores Financieros
- Costes Totales Unitarios
- Ingresos por Venta de Agua
- Inversión Unitaria
- Tarifa Promedio de Agua por Consumo Directo
- Tarifa Promedio de Agua Exportada
- Relación de Cobertura de Costes
- Margen de Explotación
- Periodo Medio de Cobro
- Domiciliación Bancaria
- Antigüedad de la deuda de Clientes

2.2. PROPUESTA ACTUAL DE BALANCE HÍDRICO. RECOMENDACIONES PARA SU IMPLANTACIÓN

Proponemos un Balance con la pretensión de que sea aplicable a cualquier sistema de suministro de agua, comenzando en el 2º nivel del Balance Propuesto por IWA, directamente desde el Agua Distribuida y excluyendo el concepto de Agua Exportada a otros abastecimientos.

Además, para asumir mejor las diversas circunstancias de la facturación en diferentes sistemas, hemos concluido anteponer en el Balance el Consumo Autorizado al Registrado y este al Facturado, entendiendo que así asume mejor las diversas circunstancias de Facturación en distintos sistemas, donde ni todo lo que se factura ha sido previamente Registrado, ni todo lo Registrado ha sido Facturado.

El consumo de agua durante las operaciones de mantenimiento se ha contemplado como Consumo Autorizado No Registrado, mucho más acorde con su significado real que englobado entre las Pérdidas Aparentes. En las operaciones de mantenimiento, los procedimientos incluirán la evaluación de los consumos necesarios.

<table>
<tr><td rowspan="11">Volumen de agua distribuido</td><td rowspan="4">Consumo Autorizado</td><td rowspan="2">Consumo Autorizado Registrado</td><td>Consumo Registrado Facturado</td><td rowspan="2">AGUA REGISTRADA</td></tr>
<tr><td>Consumo Registrado NO Facturado</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Consumo Autorizado NO Registrado</td><td>Consumo NO Registrado Facturado</td><td rowspan="9">AGUA NO REGISTRADA</td></tr>
<tr><td>Consumo NO Registrado NO Facturado</td></tr>
<tr><td rowspan="7">Pérdidas</td><td rowspan="2">Pérdidas Aparentes</td><td>Consumo NO Autorizado</td></tr>
<tr><td>Imprecisión Equipos de Medida</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Pérdidas Reales</td><td>Pérdidas en Conducciones</td></tr>
<tr><td>Pérdidas en Acometidas</td></tr>
<tr><td>Pérdidas en Depósitos</td></tr>
<tr><td>Pérdidas Técnicas Mínimas</td></tr>
</table>

También hemos considerado más lógico que las Pérdidas Técnicas Mínimas a partir del cual no se pueden reducir mas entren dentro del volumen de Pérdidas Reales.

Para implantar este nuevo Balance necesitaremos mejorar la medición y registro de los volúmenes, para lo que será imprescindible una política acertada en cuanto a la gestión del parque de contadores. Ni qué decir tiene que la estimación de volúmenes debe ser sustituida progresivamente por mediciones o cálculos de máxima fiabilidad.

En cuanto al volumen del fraude, de tan difícil cuantificación, serán las políticas sancionadoras, la inspección y la colaboración ciudadana, con la repercusión mediática necesaria, las que harán desistir de esta práctica a muchos de los posibles defraudadores, disminuyendo la repercusión sobre el resto del Balance.

2.3. CONCEPTOS DEL BALANCE. DEFINICIONES

VOLUMEN DE AGUA DISTRIBUIDO

Como premisa inicial, ya lo hemos descrito como el volumen anual inyectado en aquella parte del sistema de suministro al que hace referencia el cálculo del Balance, excluyendo el agua exportada a otros sistemas.

CONSUMO AUTORIZADO

Es el volumen anual de agua utilizada por los clientes, el suministrador y otros implícita o explícitamente autorizados por el mismo. Incluye el agua utilizada contra incendios, la usada en tareas de mantenimiento del sistema, la de baldeo de calles, limpieza de alcantarillado, riego de jardines municipales y en las fuentes públicas. Su evaluación puede ser medida con registradores (contadores, caudalímetros), estimada o calculada.

CONSUMO AUTORIZADO REGISTRADO

Es una parte del Consumo Autorizado, pero que se puede medir con registradores o calcular matemáticamente a partir de sus valores, pero que nunca será estimado. Es decir, los cálculos serán realizados según procedimientos y prácticas que otorguen total y absoluta fiabilidad a los datos así obtenidos.

CONSUMO AUTORIZADO NO REGISTRADO

Así como en el volumen del Consumo Autorizado Registrado nunca se pude utilizar la estimación, en este caso, sí procede de estimaciones, siempre que, eso sí, se realicen según procedimientos y prácticas que otorguen la máxima fiabilidad, dentro de lo posible.

PÉRDIDAS

Es toda el agua no consumida (Consumo Autorizado) del Volumen anual de Entrada al Sistema. Integra por un lado las Pérdidas Reales (pérdidas físicas de agua), y por otro las Pérdidas Aparentes (imprecisiones de medida y fraudes).

PÉRDIDAS APARENTES

Son las pérdidas anuales de agua causadas por el fraude (Consumo No Autorizado) y por la imprecisión asociada a las mediciones, tanto del Volumen de Entrada al Sistema como de los Consumos Autorizados.

PÉRDIDAS REALES

Son las fugas propiamente dichas, tanto en conducciones, acometidas, depósitos, incluso en instalaciones privadas si estas se producen antes de su medición por contador de facturación al cliente.

2.4. PROPUESTA ACTUAL DE BALANCE HÍDRICO. RECOMENDACIONES PARA SU IMPLANTACIÓN

A partir de este Balance Propuesto se establecen 21 Indicadores a desarrollar clasificados en 2 grupos:

Indicadores Volumétricos

- Ineficiencia del uso de los Recursos Hídricos
- Agua no Registrada en la Distribución
- Agua no Facturada en Volumen
- Volumen Distribuido al Sistema
- Pérdidas
- Pérdidas Reales
- Pérdidas Aparentes
- Consumo No Autorizado
- Imprecisión de equipos de medida
- Consumo unitario
- Dotación general

Indicadores Operacionales

- Renovación de Tuberías
- Renovación de Acometidas
- Roturas
  - Roturas Naturales
    - En Tuberías
    - En Acometidas
  - Roturas Provocadas
    - En Tuberías
    - En Acometidas
  - Roturas Localizadas
    - En Tuberías
    - En Acometidas
- Eficiencia de lecturas de Contadores
- Inspección de red
- Control Activo de Fugas

- Pérdidas de agua
- Pérdidas Aparentes
- Índice Estructural de Fugas (ILI)
- Continuidad de Suministro

INDICADORES VOLUMÉTRICOS:

Ineficiencia del uso de los recursos hídricos (%)

Es el porcentaje de pérdidas reales del volumen de agua distribuido.

$$\frac{\textit{Pérdidas Reales}}{\textit{Volumen de Agua Distribuida}} \; x\ 100$$

El porcentaje aceptable de pérdidas reales está entre el 5 y el 10 % del Volumen Distribuido.

Agua No Registrada en la Distribución (%)

Es el porcentaje de agua no registrada del volumen de agua distribuido.

El Volumen de Agua No Registrada es la diferencia entre el Volumen Distribuido y el Consumo Autorizado Registrado.

$$\frac{\textit{Agua No Registrada}}{\textit{Volumen de Agua Distribuida}} \; x\ 100$$

El Consumo Autorizado Registrado es aquel Volumen de Agua del que sabemos con una seguridad prácticamente del 100 % que ha llegado al punto de consumo, ya que se obtiene directamente de los datos de lecturas directas o deducciones de estas. Por tanto solamente la imprecisión de los equipos de medición matiza la fiabilidad del dato.

Agua No Facturada en Volumen (%)

Es el porcentaje de agua no facturada del total del Volumen de agua distribuido.

El Volumen de agua no facturada es el consumo autorizado no facturado, registrado o no, más las pérdidas.

$$\frac{\textit{Volumen Anual Agua No Facturada}}{\textit{Volumen de Agua Distribuida}} \; x\ 100$$

Volumen Distribuido al Sistema (m3/día) (m3/mes) (m3/año)

Es el Volumen de agua distribuido en la unidad de tiempo determinada.

Indicador relacionado con la dotación por habitante y día, con la estacionalidad de la población, tamaño, meteorología y tipo de usos del agua. También el coste del servicio afecta al Volumen Distribuido, dado que en poblaciones abastecidas mayoritariamente con agua desalada, en que el precio del m3 abastecido es superior, la dotación disminuye y por tanto el Volumen Distribuido es menor a igualdad del resto de los factores.

Pérdidas (% sobre el volumen distribuido)

$$\frac{Pérdidas}{Volumen\ de\ Agua\ Distribuida} \times 100$$

Pérdidas Reales (% de las Pérdidas)

Representa el porcentaje de pérdidas en la red (conducciones, acometidas y depósitos) del total de pérdidas.

$$\frac{Pérdidas\ Reales}{Pérdidas} \times 100$$

Pérdidas Aparentes (% de las Pérdidas)

Es el volumen perdido debido a los errores de medida y el fraude, en porcentaje del total de pérdidas.

$$\frac{Pérdidas\ Aparentes}{Pérdidas} \times 100$$

Consumo No Autorizado (% de las Pérdidas)

Es el volumen perdido debido al fraude, en porcentaje del total de pérdidas.

$$\frac{Consumo\ No\ Autorizado}{Pérdidas} \times 100$$

Imprecisión de equipos de medida (% del Agua Registrada)

Es el volumen no registrado correctamente debido a los errores de medida, en porcentaje del volumen de Agua Registrada.

$$\frac{\%\ \text{de error de equipos de medida x Agua Registrada}}{100}$$

Aparte de las circunstancias propias de cada abastecimiento (patrón de consumo, clase de contador, calibre, montaje, calidad del agua…) depende de la antigüedad del parque de contadores.

El máximo error admisible de un contador nuevo es el 5% del Agua Registrada, lo que supone no sobrepasar el 4 % del Volumen Distribuido. Sin embargo, el error aumenta rápidamente con la antigüedad del contador, llegando incluso a duplicarse, alcanzando valores medios de hasta un 10%.

Consumo unitario (litros por habitante y día)

Es el cociente entre volumen de agua consumido, registrado o facturado, y la población abastecida, en el periodo de tiempo en estudio, habitualmente diario.

$$\frac{\text{Consumo autorizado Registrado + Consumo No Registrado Facturado}}{\text{Nº de Habitantes x 365}}\ x\ 100$$

Dotación general (litros por habitante y día)

Es la dotación de agua suministrada a la red, entendida como el cociente del Volumen de Agua Distribuido y la población abastecida, en el periodo de tiempo en estudio, habitualmente diario.

$$\frac{\text{Volumen de Agua Distribuido x 1000}}{\text{Nº de Habitantes x 365}}$$

Existen múltiples causas que influyen en este ratio, desde los tipos de uso presentes de la zona hasta la variación estacional de la población, pasando por la propia eficiencia de la red, la meteorología, el precio del agua y su origen.

INDICADORES OPERACIONALES:

Renovación de Tuberías (%)

Es el porcentaje de longitud de tuberías renovadas en el año de la longitud total de tuberías del sistema.

$$\frac{\textit{Longitud de Tuberías de Transporte y Distribución Renovadas}}{\textit{Longitud Total de la Red}} \; x\ 100$$

Renovación de Acometidas (%)

Es el porcentaje de acometidas renovadas en el año del número total de acometidas del sistema.

$$\frac{\textit{Nº de Acometidas Renovadas}}{\textit{Nº Total de Acometidas}} \; x\ 100$$

Roturas

Es de gran interés que las fugas que se integren en los siguientes indicadores se clasifiquen de manera que informen de los elementos, tramos, materiales,… que comúnmente originen la pérdida. Ello nos ayudará a tomar decisiones en el futuro.

Si bien los indicadores contemplan la totalidad de red, puede ser muy útil también referirlo a la longitud controlada y el sistema de localización, lo que nos informará del rendimiento obtenido por zonas y sistemas de control. Un valor alto de este tipo de índice nos da idea de que el control está siendo fructífero.

Por lo tanto una buena gestión de los medios de control de fugas debe dar unos resultados altos en estos indicadores, viéndose reducidos año tras año, hasta que decidamos un cambio en los objetivos o los procedimientos.

- Roturas por causas naturales (fortuitas) en Tuberías (nº/100 km/año)
  Es el número de roturas en las tuberías, las válvulas y los accesorios, no provocadas, ni localizadas mediante el control activo de fugas, por cada 100 km de tuberías del sistema en el año.

$$\frac{\textit{Nº roturas naturales en tubería, válvulas y accesorios en el año}}{\textit{Longitud total de tuberías del sistema}} \; x\ 100$$

– Roturas por causas naturales (fortuitas) en Acometidas (nº/1000 acometidas/año)
Es el número de roturas en las acometidas, no provocadas, ni localizadas mediante el control activo de fugas, por cada 1000 acometidas del sistema en el año.

$$\frac{\textit{Nº roturas naturales en acometidas en el año}}{\textit{Nº de acometidas}} \textit{ x 1000}$$

– Roturas Provocadas en Tuberías (nº/100 km/año)
Es el número de roturas provocadas por terceros en las tuberías, las válvulas y los accesorios por cada 100 km de tuberías del sistema en el año.

$$\frac{\textit{Nº roturas provocadas en tubería, válvulas y accesorios en el año}}{\textit{Longitud total de tuberías del sistema}} \textit{ x 100}$$

– Roturas Provocadas en Acometidas (nº/1000 acometidas/ año)
Es el número de roturas en las acometidas, provocadas por terceros, por cada 1000 acometidas del sistema en el año.

$$\frac{\textit{Nº roturas provocadas en acometidas en el año}}{\textit{Nº de acometidas}} \textit{ x 1000}$$

– Roturas Localizadas en Tuberías (número / 100 km / año)
Es el número de roturas localizadas por el control activo de fugas en las tuberías, válvulas y accesorios por cada 100 km de tuberías del sistema en el año.

$$\frac{\textit{Nº roturas localizadas en tubería, válvulas y accesorios en el año}}{\textit{Longitud total de tuberías del sistema}} \textit{ x 100}$$

– Roturas Localizadas en Acometidas (nº/1000 acometidas/ año)
Es el número de roturas localizadas en las acometidas por el control activo de fugas por cada 1000 acometidas del sistema en el año.

$$\frac{\textit{Nº roturas localizadas en acometidas en el año}}{\textit{Nº de acometidas}} \textit{ x 1000}$$

Eficiencia de Lectura de Contadores (%)

Es el porcentaje de las lecturas de contadores esperadas que fueron efectivas.

$$\frac{\textit{Nº total de lecturas efectivas durante el año}}{\textit{(Nº de lecturas planificadas)}} \; x\ 100$$

Inspección de Tuberías del Sistema (%)

Es el porcentaje de tuberías inspeccionadas durante el año, del total de tuberías del sistema, con el objeto de localizar fugas.

$$\frac{\textit{Longitud total de tuberías del sistema inspeccionadas en el año}}{\textit{Longitud total de tuberías del sistema}} \; x\ 100$$

Para mayor utilidad, el inventario de longitudes de tuberías puede incluir además de los diferentes materiales y diámetros, también el año de montaje o la longitud media de las acometidas y el nº de éstas.

Control Activo de Fugas (%)

Es el porcentaje de tuberías inspeccionadas durante el año, del total de tuberías del sistema, con el objeto de buscar y reparar roturas, sin esperar a que éstas sean visibles.

$$\frac{\textit{Longitud total de tuberías del sistema sujetas a control activo de fugas en el año}}{\textit{Longitud total de tuberías del sistema}} \; x\ 100$$

El control activo de fugas es el régimen de monitorización periódica o continua de la red que detecta y repara roturas no reportadas por personal propio o tercero. Incluye las inspecciones periódicas, los sistemas prelocalizadores, las mediciones de caudales,…

Para el cálculo de la longitud inspeccionada periódicamente, se tomará como periodo 1 año.

De igual manera la longitud sujeta a control activo puede discriminar entre diferentes materiales, diámetros, antigüedad.

El valor de este índice está en función de la longitud, calidad de la red o el costo de producción. En redes de pequeño tamaño podría controlarse el 100 % permanentemente con un costo razonable; en las redes de mayor longitud puede ser conveniente el seguimiento por puntos críticos, por condicionantes de tipo económico.

Pérdidas de agua (m^3 / acometida /año)

Representa el volumen de pérdidas de agua al año por acometida. Como el nº de acometidas puede penalizar en algunos casos el indicador, es viable la sustitución de la unidad de cálculo por un porcentaje sobre el volumen distribuido.

$$\frac{\textit{Pérdidas anuales}}{\textit{Número de acometidas total del sistema}}$$

Se especifica que si la densidad de acometidas es menor de 20 por cada km de conducciones de red, este indicador debe expresarse en m^3/km totales de red.

Las Pérdidas en este caso se refiere a las totales, tanto las aparentes como las reales.

Para contabilizar el número de acometidas cuentan las tomas domiciliarias, industriales, de incendios y de redes de riego, pero no los hidrantes para incendios, bocas de riego tomadas directamente de la red de abastecimiento ni otros accesorios (ventosas, descargas,…).

Pérdidas Aparentes (m^3 / acometida /año)

Representa el volumen de pérdidas aparentes al año por acometida

$$\frac{\textit{Pérdidas aparentes anuales}}{\textit{Número de acometidas total del sistema}}$$

Índice Estructural de Fugas ILI (TIRL / UARL)

ILI (Infraestructure Leakage Index): Es el indicador propiamente dicho, definido como un indicador de rendimiento para la gestión operativa de las pérdidas reales. Es no dimensional y permite calcular globalmente el rendimiento de la gestión de la infraestructura para el control de las pérdidas reales "marginando" la influencia de la presión de operación media. Es el porcentaje TIRL del UARL. Como la presión es la única de las cuatro actividades de gestión de fugas que influye en el TIRL y en el UARL, el ILI permite medir la efectividad global a la presión actual de operación, de la gestión de la infraestructura para el control de pérdidas reales.

$$\text{ILI} = \frac{\textit{Pérdidas Reales anuales por acometida}}{\textit{Indicador de Nivel Mínimo de Pérdidas}} = \frac{\text{TIRL}}{\text{UARL}}$$

Los valores de ILI próximos a 1 indican un excelente estado de la red y hasta 10 un estado aceptable.

UARL (Unavoidable Average Real Losses): Límite técnico mínimo a partir del cual no se pueden reducir las pérdidas reales, incluso si la infraestructura cuenta con un buen mantenimiento y se encuentra en estado óptimo. El indicador UARL nos define el Nivel Mínimo de Pérdidas Reales, en litros por día, por debajo del cual no es posible reducir las pérdidas reales.

$$UARL = A \times L_{RED} + B \times N^{o}_{ACOM} + C \times L_{ACOM}) \times P$$

Siendo:	A, B y C	18 l/km.día.mca, 0,80 l/N^{o}_{ACOM}.día.mca y 25 l/km.día.mca respectivamente.
	L_{RED}	longitud total de la red (km).
	N^{o}_{ACOM}	número de acometidas.
	L_{ACOM}	longitud total de las acometidas (km).
	P	presión (m.c.a.).

TIRL (Technical Indicator for Real Losses). Las pérdidas reales anuales tienden a aumentar con el tiempo y su volumen está delimitado por las cuatro actividades básicas de la gestión de fugas: presión, velocidad y calidad de las reparaciones, control de fugas activas y gestión de materiales de tuberías (selección-instalación-mantenimiento-renovación-sustitución). Se expresa en m3/ acometida/año y se calcula según el cociente entre las Pérdidas Reales Anuales y el número de acometidas total del sistema.

Continuidad del suministro (%)

$$\frac{Tiempo\ en\ horas\ de\ servicio\ presurizado\ al\ año}{24 \times 365} \times 100$$

Los cortes debidos a fallos del sistema no planeados o a reparaciones y tareas de rehabilitación en marcha no los tendremos en cuenta para este indicador.

2.5. INDICADORES HÍDRICOS DE REPERCUSIÓN MEDIÁTICA

La necesidad de la información en el campo del suministro del agua hace que nos refiramos al mundo de la comunicación en el que evidentemente está englobada la circulación de la información científica. El cambio que se produce desde el emisor que representa la comunidad técnica hasta llegar al público receptor, requiere de unas referencias comunes básicas.

No es necesario tener bajo control continuo un gran número de indicadores, solamente los más esenciales para detectar desviaciones, lo que hace necesaria la capacidad para obtener los datos a tiempo. Los Indicadores Mediáticos propuestos tienen como características la transparencia informativa, simplicidad, exactitud en su cálculo, relevancia y disponibilidad de los datos:

- Agua No Registrada en la Distribución
- Agua no Facturada en Volumen
- Volumen Distribuido al Sistema
- Pérdidas Reales
- Consumo unitario

3

PÉRDIDAS REALES

3.1. CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS REALES

3.1.1. Introducción

De la aplicación del balance hidráulico expuesto en los puntos anteriores surge una primera caracterización del Agua No Registrada (ANR), que es la formada por los consumos autorizados no registrados, las pérdidas aparentes y las pérdidas reales. La forma tradicional de caracterizar el ANR se basa en estimaciones independientes para cada una de las partes; sin embargo, el Grupo propone una nueva metodología innovadora que permite la caracterización mediante un sistema de ecuaciones que vincula todas las partes entre ellas y que utiliza en todo momento datos medidos, ayudado por hipótesis y herramientas estadísticas adecuadas.

En concreto, se trata de aplicar el balance hidráulico en diferentes zonas (transporte y distribución) y momentos (día y noche) del abastecimiento, usando como información los datos de volúmenes y caudales del abastecimiento y de la sectorización y los datos de lectura de los contadores.

A continuación se presenta el modelo teórico, pero hay que destacar que todavía no se ha podido validar con datos reales porque la implantación de la telelectura no es todavía masiva, aunque conociendo el avance de la tecnología y la apuesta cada vez más decidida de las compañías de agua por la telelectura, es de esperar que sea pronto validable y calibrable.

Igualmente, se propone una metodología para caracterizar las pérdidas reales, diferenciando entre pérdidas en depósitos (estructurales y desbordes) y pérdidas en red según el momento de detección de las mismas (visibles, semivisibles y latentes o invisibles).

3.1.2. Caracterización del ANR de un abastecimiento

Para facilitar la explicación del método de cálculo de este primer nivel de caracterización del ANR y como la configuración de la red es distinta para cada abastecimiento, se aplicará sobre un abaste-

cimiento hipotético en el que las redes de transporte y distribución se encuentran claramente diferenciadas.

Ésta suele ser una configuración típica de un abastecimiento que disponga de la red de distribución sectorizada, donde los sectores no incluyen los depósitos, centrales de bombeo y grandes conducciones para que su explotación no interfiera en el seguimiento de indicadores del sector como el del caudal mínimo nocturno.

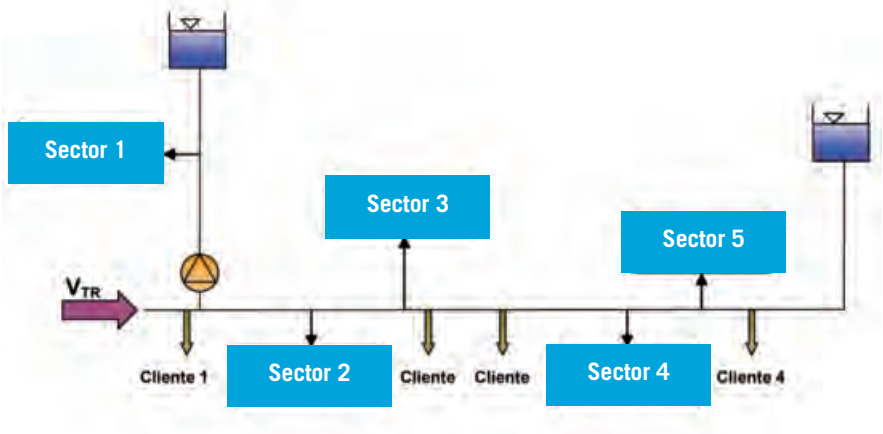


Figura 1. Esquema de la red de transporte y red de distribución sectorizada

Así pues, si aplicamos el balance hidráulico para la red de transporte y para la red de distribución según la figura 1 se obtiene las siguientes expresiones:

(1) $$V_{TR} = V_{DIS} + V_{reg\,TR} + P_{reales\,TR} + P_{aparentes\,TR} + V_{autoriz\,no\,reg\,TR} + \Delta V_{depósitos}$$

(2) $$V_{DIS} = V_{reg\,DIS} + P_{reales\,DIS} + P_{aparentes\,DIS} + V_{autoriz\,no\,reg\,DIS}$$

Donde:

- V_{TR} es el volumen suministrado a la red de transporte.
- V_{DIS} es la suma de volúmenes suministrados a los sectores de la red de distribución.
- $V_{reg\,TR}$ es la suma de los volúmenes registrados a los clientes suministrados por la red de Transporte.
- $P_{reales\,DIS}$ es la suma de las fugas en conducciones
- $V_{reg\,DIS}$ es la suma de los volúmenes registrados a los clientes de los sectores.
- $P_{reales\,TR}$ es la suma de las fugas en conducciones en la red de transporte más las pérdidas en los depósitos.

- $P_{aparentes\ DIS}$ es la suma de los consumos no autorizados o fraudes y los volúmenes noregistrados debido a la submedición de los equipos de medida de los clientes de la red de distribución.
- $P_{aparentes\ TR}$ es la suma de los consumos no autorizados o fraudes en la red de transporte y los volúmenes no registrados debido a la submedición de los equipos de medida de los clientes.
- $V_{autoriz\ no\ reg}$ es el volumen contratado para los clientes con suministro mediante depósito/aljibe sin contador, para los convenios o consumos especiales y los consumos asociados a la explotación de la red como drenajes, limpiezas de tuberías y depósitos, etc.
- $\Delta V_{depósitos}$ es la diferencia entre el volumen almacenado en los depósitos antes y después del periodo de cálculo.

Si se aplica el balance hidráulico para la misma red de distribución pero, esta vez únicamente para el periodo nocturno (normalmente de 2:00 h a 6:00 h de la mañana), se obtiene la siguiente expresión:

(3) $$V_{DIS\ noct} = V_{reg\ DIS\ noct} + Q_{fuga} \times T_{noct} \times \left(\frac{Pr_{noct}}{Pr_{promedio}}\right)^{N_1} + P_{aparentes\ DIS\ noct} + V_{autoriz\ no\ reg\ DIS\ noct}$$

Donde:

- Q_{fuga} es el caudal de fuga en la red de distribución corregido por el efecto de la presión para el periodo nocturno.
- T_{noct} es el tiempo de periodo nocturno.
- N_1 es el coeficiente de la expresión FAVAD (Fixed And Variable Area Discharges) [John May, 1994] que relaciona el volumen de fuga con la presión, y que varía entre 1,5, para las fugas pequeñas asociadas a juntas y accesorios, y 0,5 para las fugas normales en tuberías. Para todo tipo de fugas es habitual utilizar un valor de de 1.
- $V_{autoriz\ no\ reg\ DIS\ noct}$ es el volumen autorizado no registrado consumido por los clientes durante el periodo nocturno.

Se plantea realizar una primera simplificación de las expresiones anteriores, considerando que las pérdidas aparentes son función directa del número de acometidas y del volumen registrado, es decir, que los consumos fraudulentos y submedición de los equipos de medida aumentan proporcionalmente con el número de acometidas y con el volumen registrado:

(4) $$P_{aparentes} = \sigma \times V_{reg} \times N_{acometidas}$$

De esta forma podemos relacionar las pérdidas aparentes del abastecimiento de la siguiente manera:

(5) $$\frac{P_{aparentes\ DIS}}{P_{aparentes\ DIS\ noct}} = \sigma_{día-noche} \times \frac{V_{reg\ DIS}}{V_{reg\ DIS\ noct}}$$

(6) $$\frac{P_{aparentes\ DIS}}{P_{aparentes\ TR}} = \sigma_{DIS-TR} \times \frac{V_{reg\ DIS}}{V_{reg\ TR}} \times \frac{N_{acometidas\ DIS}}{N_{acometidas\ TR}}$$

Como hipótesis de partida podemos considerar que tanto $\sigma_{\text{dia-noche}}$ como $\sigma_{\text{TR-DIS}}$ es igual a 1.

De igual forma, debido a que durante el período nocturno el consumo no registrado asociado a la explotación de la red de distribución es mínimo o despreciable, se puede considerar que la relación día-noche del consumo autorizado no registrado es igual a la relación día-noche del consumo registrado:

(7) $$\frac{V_{autoriz\ no\ reg\ DIS}}{V_{autoriz\ no\ reg\ DIS\ noct}} \approx \frac{V_{reg\ DIS}}{V_{reg\ DIS\ noct}}$$

Con estas consideraciones las expresiones (1), (2) y (3) quedan de la siguiente manera:

(8) $$V_{TR} = V_{DIS} + V_{reg\ TR} + P_{reales\ TR} + \frac{N_{acometidas\ TR}}{N_{acometidas\ DIS}} \times \frac{V_{reg\ TR}}{V_{reg\ DIS}} \times P_{aparentes\ DIS} + V_{autoriz\ no\ reg\ TR} + \Delta V_{depósitos}$$

(9) $$V_{DIS} = V_{reg\ DIS} + Q_{fuga\ DIS} \times T + P_{aparentes\ DIS} + V_{autoriz\ no\ reg\ DIS}$$

(10) $$V_{DIS\ noct} = V_{reg\ DIS\ noct} + Q_{fuga\ DIS} \times T_{noct} \times \left(\frac{Pr_{noct}}{Pr_{promedio}}\right) + \frac{V_{reg\ DIS\ noct}}{V_{reg\ DIS}} \times \left(P_{aparentes\ DIS} + V_{autoriz\ no\ reg\ DIS}\right)$$

Se trata de un sistema de 3 ecuaciones con 6 incógnitas:

- las pérdidas reales en la red de transporte $P_{\text{reales TR}}$
- las pérdidas aparentes en la red de distribución $P_{\text{aparentes DIS}}$
- el caudal de fuga en la red de distribución Q_{fuga}
- el volumen autorizado no registrado de la red de Transporte $V_{\text{autoriz no reg TR}}$
- el volumen autorizado no registrado de la red de distribución $V_{\text{autoriz no reg DIS}}$
- el volumen registrado nocturno en la red de distribución $V_{\text{DIS noct}}$

Para resolverlo se propone estimar los volúmenes autorizados no registrados y el consumo nocturno de la red de distribución y resolver el sistema resultante mediante un proceso iterativo, suponiendo un valor inicial de pérdidas aparentes en la red de distribución, calcular las fugas en la misma red y con este valor volver a calcular las pérdidas aparentes. Se puede comprobar que para un valor de $Q_{\text{fuga DIS}} > 0$ el sistema converge hacia una única solución.

3.1.3. Estimación del consumo registrado nocturno

Los avances tecnológicos en los equipos de medición del consumo de los clientes, tales como contadores electrónicos con franjas horarias, emisores de pulsos con dataloggers, sistemas de telelectura, facilitan la determinación del consumo que se produce en periodo nocturno.

Hoy en día, aún resulta excesivamente costoso, tanto económicamente como técnicamente, el poder aplicar estas tecnologías de forma universal a todos los clientes de un abastecimiento. Para solucionar este aspecto se puede recurrir a métodos de inferencia estadística para monitorizar únicamente una muestra representativa de los clientes del abastecimiento y extrapolar el resultado a todos los demás clientes. Se ha de tener en cuenta que el tamaño de la muestra representativa depende principalmente de la dispersión de los datos, por ello es recomendable agrupar los clientes en segmentos con una dispersión de datos de consumo parecida, y de esta manera, poder minimizar el número total de clientes a monitorizar.

El procedimiento para aplicar estos métodos de inferencia estadística se pueden resumir en tres fases:

- segmentación de los clientes
- selección de la variable a muestrear y
- dimensionado del tamaño de las muestras de cada segmento

3.1.3.1. Segmentación de los clientes

El principio de base para agrupar los suministros en diferentes segmentos es su patrón de consumo, para ello deberemos seleccionar, de entre todas las variables que estén disponibles en nuestro sistema de información, aquella combinación que mejor caracterice a los suministros. Las variables que pueden ayudar a agrupar los suministros pueden ser el uso: doméstico, comercial, industrial; el caudal contratado o instalado, el tipo de instalación del suministro, el tipo de contador, zona geográfica, consumo estacional, etc.

Existe otro método más directo de agrupar los suministros que es mediante intervalos de consumo. Están disponibles en el mercado programas estadísticos que introduciendo los valores de consumo de todo un año de cada suministro son capaces de agruparlos en segmentos según el nivel de consumo y su evolución. Este método tiene como ventaja que la dispersión de los datos obtenida de cada segmento es la mínima posible pero como contrapartida, dado que el consumo es variable, los segmentos no son estables y se debe realizar con cierta frecuencia una comprobación de los mismos. Además es imposible caracterizar los nuevos suministros de los que no se dispone de histórico de consumo

3.1.3.2. Selección de la variable a muestrear

Para simplificar los cálculos estadísticos se propone seleccionar una variable cuya distribución se comporte según una Ley Normal o de Gaus y la distribución de los consumos de los suministros de un segmento no suele seguir una ley normal, ya que están acumulados a un valor cercano a 0, y siempre son valores positivos. Una posible solución sería monitorizar la diferencia entre el consumo estimado y el consumo promedio de cada suministro.

Se deberá tener en cuenta que para la aplicación del método de la normalidad se requiere que las poblaciones de los segmentos seleccionados sean mayores a 100 individuos.

3.1.3.3. Dimensionado de las muestras de cada segmento

Para cada uno de los segmentos seleccionados anteriormente se debería calcular la dispersión de los datos mediante la desviación estándar al cuadrado, es decir, la varianza. Pero, en nuestro caso, esto significaría que se debería de conocer "a priori" los datos de error promedio del consumo estimado de todos los suministros de la población. Para poder aplicar el método, se puede hacer una simplificación mediante el cálculo de la desviación de una muestra reducida de cada uno de los segmentos, obteniéndose la cuasivarianza de cada uno de ellos. La expresión siguiente es la que nos permite calcularla:

$$S^{\wedge 2} = \frac{\mathrm{n}}{\mathrm{n}-1} \times S$$

Una vez calculadas las dispersiones estamos en disposición de calcular el tamaño de la muestra de cada uno de los segmentos con la siguiente expresión:

$$N \geq \frac{Z^2_{1-\propto/2}}{\mathrm{d}^2} \times S^{\wedge 2}$$

Donde:

- α, es el nivel de significación del intervalo de confianza para la media poblacional. El valor que suele utilizarse es el de 0,05 (95%) y en casos con variables muy estables 0,01 (99%).
- d, es la precisión requerida. Se puede tomar un valor fijo (p.e: 0,1 m3 para una variable de diferencia de consumos mensuales promedio y consumos mensuales registrados) pero estopenaliza a los segmentos con clientes de mayor consumo. Para evitar esto, se puede expresar la precisión como un porcentaje de la diferencia de consumos.

– $S^{\wedge 2}$, es la casivarianza muestral calculada a partir de la varianza de una muestra reducida de cada segmento.
– $Z_{1-\alpha/2}$, es el coeficiente de confianza determinado partir de la curva de Gauss:

Tabla 1. Niveles de confianza más usados

Niveles de significación	Nivel de confianza	Coeficiente de confianza
α	NC = (1 – α) x 100	Zα
0,0005	99,95 %	3,29
0,0010	99,90 %	3,09
0,0013	99,87 %	3,00
0,0050	99,50 %	2,58
0,0100	99,00 %	2,33
0,0227	97,72 %	2,00
0,0250	97,50 %	1,96
0,0500	95,00 %	1,64
0,1587	84,13 %	1,00

Figura 2. Probabilidad normal presentada en una y dos colas

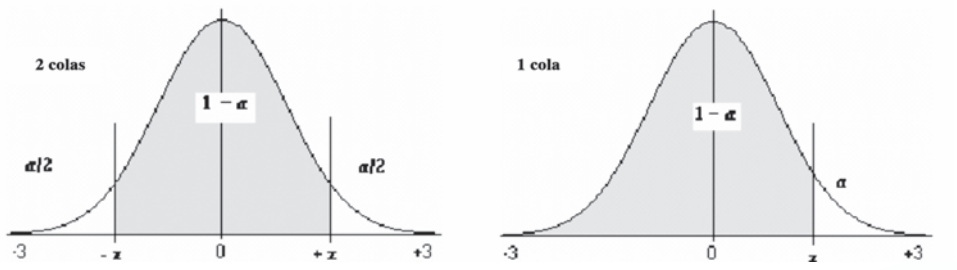


Tabla 2. Coeficientes de confianza más usados Zα

	99,90 %	99,00 %	95,00 %
1 cola	3,09	2,33	1,64
2 colas	3,29	2,58	1,96

En experiencias realizadas en abastecimientos con un número de clientes considerablemente alto (EMASESA, Aguas de Barcelona) se ha obtenido un número de clientes a muestrear que supone alrededor de un 3% del total del abastecimiento.

3.1.4. Estimación del consumo autorizado no registrado

Se considera consumo autorizado no registrado a todo aquel consumo conocido en el que, o bien por el tipo de instalación, o bien por tratarse de un uso temporal, no es viable la instalación de un equipo de medición con el que se pueda registrar el volumen consumido. Dentro de estos consumos se incluyen:

- los convenios para consumos especiales como los riegos urbanos, camiones cuba, usos temporales para obras, etc., en los que no es posible la medición de los volúmenes consumidos mediante contadores portátiles;
- los suministros a depósitos o aljibes sin contador, normalmente aforados o limitados a un determinado volumen al día; y
- los consumos asociados a las tareas de explotación de la red como drenajes de puntos de agua estancada, limpieza de tuberías asociadas a mantenimiento de las mismas, limpieza de depósitos y/o caudales de equipos de control de calidad del agua.

Para los dos primeros casos se puede establecer como primera estimación de los consumos realizados, los volúmenes declarados o contratados. Sería interesante realizar de forma periódica una medición portátil de una muestra de estos consumos para validar y confirmar esta primera estimación.

Para los consumos asociados a la explotación, su estimación se puede calcular considerando un caudal y un tiempo promedio para cada uno de los sucesos detectados que las producen:

En el caso de limpieza de tuberías: $Vol_{limpieza} = (N_{averias} + N_{nuevos\ tramos}) \times Q_{limpieza} \times t_{limpieza}$

En el caso de drenajes: $Vol_{drenaje} = N_{drenajes} \times Q_{drenaje} \times t_{drenaje}$

En el caso de limpieza de depósitos: $Vol_{limpieza\ depósitos} = Vol_{desagüe} + Vol_{limpieza}$

Donde:

- $Vol_{desagüe}$ es el volumen mínimo de funcionamiento del depósito y que, por lo tanto, se deberá desaguar antes de proceder a la limpieza. Se calcula como el producto entre la altura mínima (o de salida) y la sección del depósito (capacidad depósito/altura máxima).
- $Vol_{limpieza}$ es el volumen dedicado a realizar la limpieza del depósito.

Los caudales promedios se pueden determinar en laboratorio simulando las condiciones de funcionamiento de la red o bien, si se dispone de la red sectorizada y monitorización de los caudales suministrados a cada sector, simulando un drenaje o limpieza en periodo nocturno en uno de los sectores.

Como referencia, los caudales obtenidos en Aguas de Barcelona son de aproximadamente 20 l/s de caudal para una descarga de 100 mm de diámetro a una presión de 50 m.c.a. y en el caso de realizar el drenaje por una boca de aire de 40 mm de diámetro el caudal baja hasta los 10 l/s. Para la limpieza de depósitos se ha estimado un volumen del 0,3% de la capacidad del depósito, para la limpieza interior mediante agua a presión y detergente, y un volumen total, para una limpieza anual de todos los depósitos, que supone un 15% de la capacidad de los mismos.

En el caso de los analizadores de cloro amperimétricos el caudal permanente de uso es de unos 60 l/h.

3.1.5. Caracterización de las pérdidas reales

Se entiende como pérdidas reales a aquellas pérdidas físicas involuntarias y no controladas que se producen en un abastecimiento. De acuerdo a las expresiones indicadas en el punto anterior, de caracterización del ANR, se puede realizar una primera distinción entre las pérdidas físicas producidas en los depósitos y las fugas producidas en el resto de la red del abastecimiento. Asímismo se puede diferenciar las pérdidas en los depósitos entre las fugas estructurales y las pérdidas debidas a los desbordes de los mismos. Para las fugas en la red se propone una primera caracterización basada en el momento de la detección de las mismas, así las dividiremos:

- en visibles, aquellas que son detectadas cuando salen a la superficie;
- en semivisibles, aquellas que son detectadas antes que salgan a la superficie mediante algún método de control activo de fugas; y por último
- en latentes o invisibles, aquellas que aún no han sido detectadas y por lo tanto son desconocidas.

$$Pérdidas_{reales} = Fugas_{depósitos} + Fugas_{red}$$

$$Fugas_{depósitos} = Fugas_{estructurales} + Pérdidas_{desbordes}$$

$$Fugas_{red} = Fugas_{visibles} + Fugas_{semivisibles} + Fugas_{latentes}$$

A continuación se describen los diferentes métodos de estimación de las diferentes pérdidas indicadas.

3.1.5.1. Pérdidas en los depósitos

La mejor estimación que se puede hacer de las pérdidas producidas en los depósitos es la que resulta de aplicar el balance hidráulico en cada uno de ellos en un determinado periodo de tiempo. Se puede expresar este balance de la siguiente manera:

$$V_E = V_S + \Delta Vol_{depósito} + Pérdidas_{depósito}$$

Donde:

- VE es el volumen introducido en el depósito en el periodo de cálculo.
- VS es el volumen suministrado por el depósito en ese mismo periodo.
- ΔVoldepósito es la variación del volumen contenido en el depósito entre el momento inicial y final del periodo.

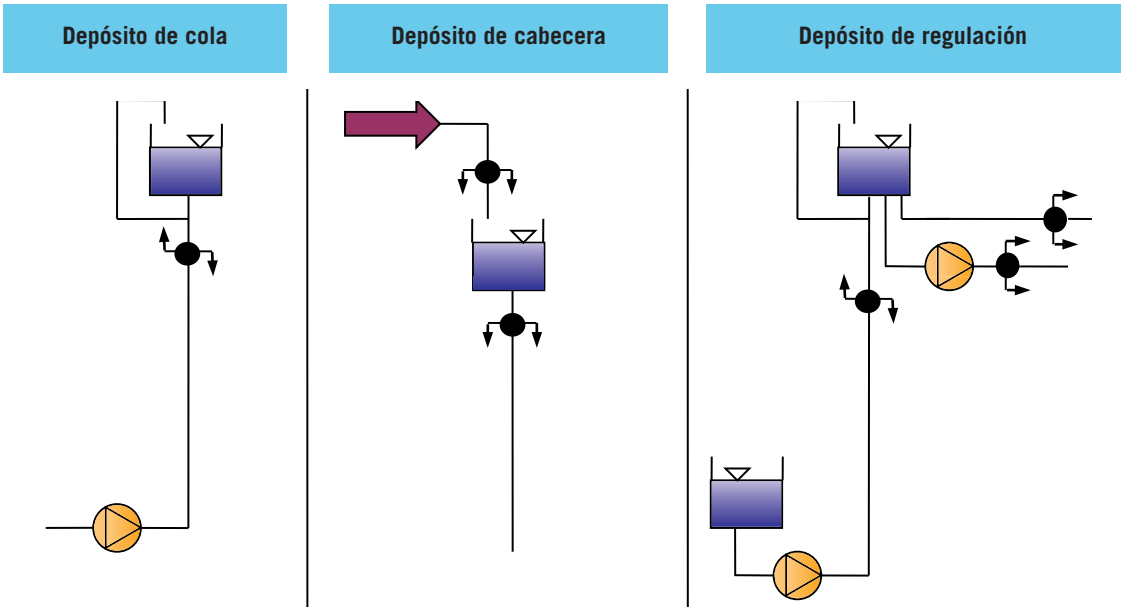
El conocimiento de los volúmenes del balance requiere un esfuerzo importante en instalación de medidores o caudalímetros en las diferentes entradas y salidas de cada depósito, así como de sensores de nivel para evaluar sus variaciones de volúmenes. A pesar de ello, como el número de depósitos de un abastecimiento suele ser relativamente pequeño y acotado, en muchos casos su instrumentación puede ser abordable.

El número de caudalímetros o medidores necesarios dependerá de cada caso y de la función del depósito. De esta manera, en los depósitos de cola, con un único caudalímetro bidireccional suele ser suficiente, en el caso de depósitos de cabecera serán necesarios uno para la entrada y otro para la salida, mientras que para el caso de los depósitos de regulación serán necesarios tantos caudalímetros como entradas y salidas existan tal como se muestra en la figura 3.

Se debe tener en cuenta que en algunos casos los depósitos pueden estar instalados en lugares alejados y de difícil acceso, por lo que se debe estudiar y analizar la posibilidad de instalar instrumentación alimentada mediante placas solares, baterías, miniturbinas hidráulicas o algún otro sistema de alimentación autónoma.

Para los casos en los que no es viable técnicamente o económicamente la instalación de los equipos de medida, o bien se requiera profundizar en el tipo de pérdidas en los depósitos, se hace necesario aplicar otros métodos de estimación de las mismas.

Figura 3. Necesidades de instrumentación según tipología de depósitos



Según el tipo de pérdida a valorar se propone los siguientes métodos:

- **Pérdidas estructurales**, tanto del vaso del depósito como en los elementos hidráulicos que lo conforman. Se puede recurrir a la realización de pruebas de estanqueidad de los depósitos, aislándolos del sistema durante un determinado periodo de tiempo y comparando los niveles del depósito antes y después de la prueba.

- **Pérdidas por desborde**, son más difíciles de valorar pero una correcta explotación puede minimizar su aparición hasta hacerlas despreciables. Se puede detectar el desborde mediante una monitorización del nivel del depósito, y medir el tiempo en el que se mantiene al nivel del aliviadero del depósito. El caudal aliviado vendrá determinado por el introducido menos el caudal de las pérdidas estructurales del mismo. Si se dispone de la curva de demanda diaria de referencia de la zona abastecida por el depósito o de otra zona equivalente, se puede estimar el caudal introducido en el depósito durante un desborde como la diferencia entre el caudal impulsado y el caudal consumido, calculado este último como el caudal nocturno registrado ponderado por la relación entre el caudal del momento del desborde y el nocturno del día de referencia.

$$Pérdidas_{desborde} = Q_{alivio}\ x\ t_{desborde}$$

$$Q_{alivio} = Q_{introducido} - Pérdidas_{estructurales}$$

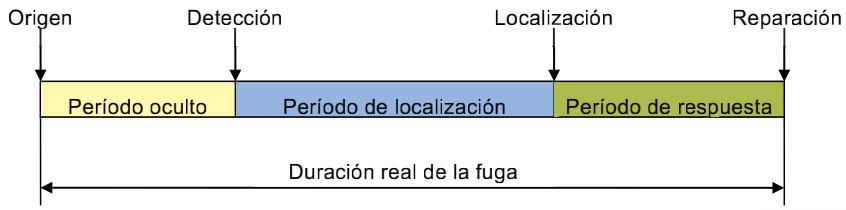
$$Q_{introducido} = Q_{impulsado} - Q_{min.nocturno}\ x\ \frac{Q_{referencia}}{Q_{min.nocturno\ referencia}}$$

3.1.5.2. Fugas en la red

Para poder calcular el volumen de fuga en la red de un abastecimiento se debe estimar tres parámetros: el número de fugas que se producen, el tiempo que han estado en fuga y el caudal de cada una de ellas. Estos parámetros variarán según los distintos tipos de fuga del abastecimiento. Así, si caracterizamos las fugas según el momento de su detección, como se indicaba en el punto anterior, podemos concluir que, de forma cualitativa, el número de fugas visibles es conocido y sensiblemente mayor que el número de fugas semivisibles, mientras que el número de fugas invisibles es desconocido.

Algo parecido sucede con los tiempos de fuga, ya que si consideramos, tal como se indica en la figura 4, que la duración real de una fuga está compuesta por un periodo oculto, un periodo de localización y un periodo de respuesta, se puede concluir que el tiempo de localización de una fuga visible es mucho menor que el de una fuga semivisible; mientras que los tiempos de respuesta dependerán principalmente de la organización y recursos disponible en cada abastecimiento y los tiempos ocultos de las condiciones del terreno donde se encuentre las tuberías afectadas.

Figura 4. Caracterización del tiempo de vida de una fuga



Para los caudales de fuga, pese a que dependen principalmente de condiciones físicas de la tubería, como el diámetro, material y envejecimiento; estado del terreno y/o presión de servicio, parece lógico pensar que existe una cierta relación inversa al tiempo de fuga, es decir, que cuanto mayor es la fuga menor es el tiempo de detección de la misma.

En la tabla adjunta se recoge de forma cualitativa la relación entre los parámetros necesarios para calcular el volumen de fugas y el tipo de fugas según el momento de la detección de las mismas:

Tabla 3. Resumen de caracterización de tipo de fugas según el momento de su detección

Tipo de fuga	Número de fugas	Tiempo de fuga			Caudal de fuga
		Período oculto	Período de localización	Período de respuesta	
Visibles	Conocido. Valor alto	Desconocido	Conocido. Valor bajo	Conocido. Depende de recursos del abastecimiento	Función de 1/Tiempo
Semivisibles	Conocido. Valor bajo	Desconocido	Conocido. Valor medio-alto	Conocido. Depende de recursos del abastecimiento	Función de 1/Tiempo
Latente	Desconocido	Desconocido	No aplica	No aplica	Función de 1/Tiempo

A continuación se describe los diferentes métodos de estimación de los volúmenes de cada tipo de fuga.

3.1.5.2.1 Fugas visibles

Tal y como se ha descrito anteriormente, se entiende como fugas visibles a aquellas fugas que son detectadas de forma reactiva, es decir al salir la superficie, alcantarillado, etc… sin utilizar métodos de control activo de fugas.

Por regla general el número de este tipo de fugas suele y puede ser conocido en cualquier abastecimiento, así como los tiempos de localización y respuesta desde que se recibe el aviso correspondiente hasta que se realiza el cierre de la distribución para su reparación. En cambio, los tiempos durante los que esas fugas han permanecido ocultas y los caudales de fuga no son conocidos, excepto en aquellos abastecimientos en los que se haga una monitorización permanente de los caudales suministrados a la red.

Como primera aproximación de estos parámetros se puede extrapolar los valores promedio registrados por los abastecimientos con monitorización permanente o, lo que sería aún más interesante, utilizar la relación hallada entre caudales y tiempo de fuga y entre periodo oculto y tiempos de localización.

A continuación, a modo de ejemplo, se presenta los resultados del estudio realizado por Aguas de Barcelona sobre las averías en la red de distribución de 23 municipios de la zona metropolitana de Barcelona registradas durante el año 2008. En este abastecimiento, los más de 4.000 Km que conforman la red de distribución se encuentran configurados en 230 sectores y monitorizados

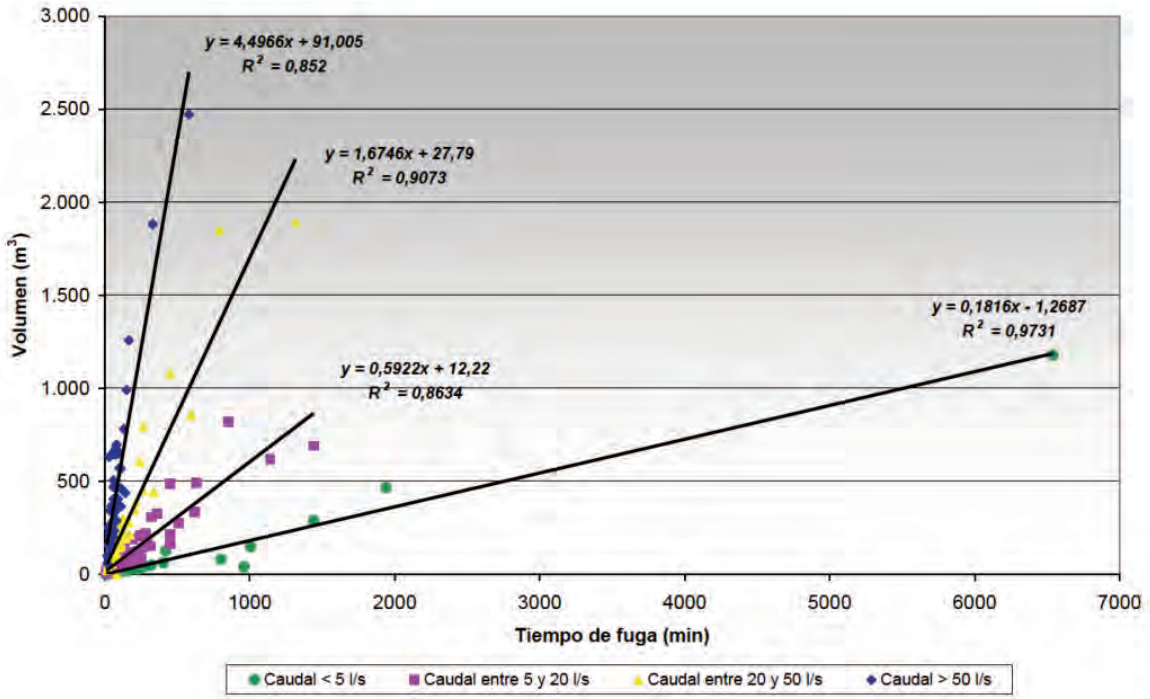
permanentemente por más de 400 caudalímetros o contadores, que registran los caudales suministrados cada 10 minutos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Después de filtrar y desestimar aquellas averías que no produjeron una fuga o aquellas de las que no se disponía de información fiable suficiente, se analizó 263 fugas en las cuales se pudo evaluar el caudal y tiempo de la fuga.
- El valor promedio del tiempo oculto de las fugas, es decir desde que la fuga se produce (el cual es identificado posteriormente en el sistema) hasta que se recibe el aviso de la misma, es de 100 minutos; de las cuales el 29% tienen un tiempo menor de 10 minutos, el 54% menor de 30 minutos y el 70% menor de una hora. Estos valores relativamente pequeños de tiempos ocultos pueden deberse a que el abastecimiento dispone de un control activo de fugas mediante seguimiento permanente de los caudales suministrados y un programa de búsqueda sistemática de fugas mediante correladores acústicos, por lo que un gran número de fugas se detectan antes de salir a la superficie.
- Se ha modelizado la relación entre el volumen de la fuga y el tiempo de duración de la misma. Para ello, se clasificó las fugas de forma cualitativa según su tamaño: pequeñas o las de caudales de fuga inferior a los 5 l/s; medianas o las de caudales comprendidos entre 5 y 20 l/s; grandes o de caudales comprendidos entre 20 y 50 l/s y muy grandes, las de mayores de 50 l/s. Posteriormente se calculó la expresión que mejor ajustaba el volumen respecto al tiempo de duración de la fuga para cada tamaño de la misma. Para simplificar las expresiones se buscó una relación lineal (ver gráfico1), pese a que para caudales grandes y muy grandes la mejor expresión correspondía a una relación cuadrática con una ligera tendencia a disminuir el caudal con el tiempo. Cabe destacar, que el error obtenido al estimar el volumen de las fugas visibles mediante las expresiones halladas respecto al volumen real registrado es inferior al 0,03%.

Se considera fuga semivisible a aquella que ha sido detectada antes de que salga a la superficie mediante algún tipo de control activo de fugas. Para una mejor valoración de este tipo de fugas se hace necesario distinguir, por su diferente comportamiento, entre:

- las que han sido detectadas mediante seguimiento de los caudales mínimos nocturnos o sensores acústicos permanentes,
- de las que han sido detectadas mediante campañas de búsqueda sistemática de fugas.

Gráfico 1. Relación entre volumen-tiempo de la fuga por tamaño de la misma



3.1.5.2.2. Fugas latentes o invisibles

Puesto que de las fugas latentes desconocemos su número, caudal, duración y ubicación, la mejor estimación que se puede hacer para su determinación es calcularla por diferencia según la siguiente expresión:

$$Fugas_{latentes} = Pérdidas_{reales} - Pérdidas_{depósitos} - Fugas_{visibles} - Fugas_{semivisibles}$$

Un parámetro o indicador interesante sobre las fugas latentes o invisibles es saber que parte de éstas se pueden detectar con los medios y recursos que se disponen, es decir las fugas invisibles detectables. Este parámetro se puede calcular extrapolando los resultados obtenidos de realizar campañas de búsqueda de fugas sobre una zona representativa del abastecimiento.

Por otro lado, a partir del "Nivel mínimo de Pérdidas Reales" de la IWA que ya se ha comentado en el apartado de indicadores, el UARL (Unavoidable Average Real Losses), se puede estimar el valor mínimo de las fugas invisibles que se podría alcanzar en un determinado período de la siguiente manera:

$$Pérdidas\ reales_{min} = UARL$$

$$Pérdidas_{depósitos} + Fugas_{visibles} + Fugas_{semivisibles} + Fugas_{invisible\ min} = UARL$$

$$Fugas_{invisible\ min} = UARL - Pérdidas_{depósitos} - Fugas_{visibles} - Fugas_{semivisibles}$$

Donde, recordemos:

$$\mathrm{UARL} = (A \times L_{RED} + B \times N^{o}_{ACOM} + C \times L_{ACOM}) \times P$$

A, B, C toman valores de 18 l/km.día.mca, 0,80 l/N$^{o}_{acom}$.día.mca y 25 l/km.día.mca respectivamente.

Comparando los valores de fugas invisibles detectables con el de fugas invisibles mínimas podemos llegar a conclusiones sobre los métodos de búsqueda de fugas utilizados. De esta manera, si el valor de fugas invisibles detectables es muy inferior al valor mínimo, nos puede indicar que los medios de los que se dispone para la búsqueda de fugas es insuficiente y que se debería estudiar el sustituirlos o complementarlos con otros nuevos.

3.2. SECTORIZACIÓN

3.2.1. Introducción

Uno de los objetivos básicos en el control activo de las redes es la detección temprana de la aparición de fugas en la red. Para ello, una forma óptima de controlar la aparición de dichas fugas se basa en el seguimiento de los caudales mínimos nocturnos aportados a la red. Incrementos importantes y sistemáticos de estos caudales mínimos indicarán la aparición de fugas en la red.

Este seguimiento se facilita en gran medida mediante la división de la red en sectores independientes entre sí en los que se controla el caudal aportado y se tiene un conocimiento bastante aproximado sobre la demanda media exenta de fugas.

Para organizar la red de forma eficiente en sectores es recomendable seguir una serie de pautas que garanticen el suministro en cantidad y calidad suficiente, minimicen las obras a ejecutar y, especialmente, permitan alcanzar el objetivo de controlar los caudales aportados a los sectores y obtener información de valor para la explotación del sistema.

La implantación de un sistema de control sectorizado de la red debe incluir las siguientes actividades:

- Modelización del funcionamiento hidráulico de la red.
- Estudio y diseño de sectorización de la red.
- Determinación del caudal mínimo nocturno de referencia.
- Gestión de presiones.
- Verificación de los sectores propuestos.

3.2.2. Diseño de los sectores

El primer paso para el estudio de la sectorización y la gestión de presiones es la recopilación de la información existente sobre los aspectos básicos del sistema de abastecimiento.
La información a recabar será principalmente la siguiente:

- Cartografía de la red de abastecimiento y distribución de aguas en formato GIS.
- En caso de disponer, modelo matemático calibrado de la red y Plan Director de Infraestructuras de abastecimiento.
- Cartografía urbana del municipio en formato digital.
- Topografía del municipio en formato digital.
- Características de los elementos principales (depósitos, impulsiones, válvulas reguladoras, válvulas, ventosas, desagües, hidrantes, bocas de riego, etc.) y pautas de funcionamiento del sistema.
- Datos sobre caudales aportados y consumos facturados a los abonados.
- Histórico de averías y roturas en conducciones y elementos.

El diseño básico de la red sectorizada se realizará a partir del modelo matemático y del conocimiento de las características de la red en cuanto a materiales, edad, estado de los elementos, existencia de grupos de presión en edificios más elevados, etc.

En principio, la optimización de los sectores en los que se organicen hidráulicamente las redes se basará en la definición de zonas de presión homogéneas, aprovechando en la mayor medida posible los equipos existentes y minimizando la instalación de nuevos equipos o la realización de costosas infraestructuras.

De forma general, en la definición de los sectores se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- Mantener independientes, siempre que sea posible, las conducciones arteriales de abastecimiento a los sectores.
- Nivel de presiones homogéneas en los sectores y, en su caso, idoneidad de implantar un sistema de gestión activo de presiones según se describe más adelante.
- Minimizar el número de entradas y salidas de agua en los sectores.

- Minimizar las actuaciones a realizar (nuevas redes, nuevas válvulas de seccionamiento o de regulación, etc.).
- Evitar la aparición de zonas con tiempo de retención del agua excesivo que pudiera afectar a la calidad de la misma.
- Evitar la existencia de subsectores.
- Garantizar que el comportamiento hidráulico de todos los sectores afectados cumple con los criterios de óptimo funcionamiento, en lo referente a presiones y velocidad en las conducciones.
- Características de la red en cuanto a materiales, antigüedad y mallado, para que, conjuntamente con los resultados aportados por el modelo matemático en los diferentes escenarios a verificar (diurno, nocturno, consumo punta, consumo mínimo), no se vea mermada en ningún momento la garantía de suministro en condiciones de cantidad y calidad.

Como norma general y con el objeto de minimizar las inversiones y facilitar la gestión, el número de puntos de alimentación de los sectores se intentará minimizar, tendiendo a que la entrada se realice principalmente por un único punto siempre que sea posible.

Respecto a la interconexión entre sectores, mediante el modelo matemático se verificará el sentido del flujo en los diferentes escenarios que puedan presentarse. No obstante, lo más recomendable es la instalación en estos puntos con posibilidad de circulación en doble sentido de contadores bidireccionales.

Uno de los riesgos de la sectorización está en el suministro de agua a todas las zonas cuando una avería en la red obliga al cierre de algunos tramos. En estas ocasiones, en función de cómo se haya realizado la sectorización, puede ocurrir que algunos usuarios se queden sin servicio. Con objeto de evitar esta problemática, conjuntamente con la definición de los sectores, se realizarán simulaciones con el modelo matemático que permitan definir cómo actuar en estas ocasiones de urgencia, abasteciendo a las zonas afectadas desde otros puntos sin que la calidad del servicio se resienta de forma importante.

Con relación a la calidad del agua, mediante la sectorización de las redes puede que en algunas zonas extremas de los sectores con demanda escasa, la circulación de agua sea reducida, aumentando los tiempos de permanencia del agua y existiendo por tanto riesgo de pérdida de calidad en el agua.

3.2.3. Ejecución y comprobaciones a realizar

El orden en el que se ejecuten los sectores debe ser verificado con el modelo, de tal forma que la ejecución de los mismos no afecte a las condiciones de funcionamiento de la red.

De forma esquemática, el proceso a seguir en la ejecución de la sectorización comprende las siguientes actuaciones:

- Verificación del correcto funcionamiento de las válvulas definidas como frontera de los sectores.
- Ejecución de las obras necesarias, tanto para la instalación de equipos de medición y control, como para la instalación de nuevas conducciones.
- Instalación de registradores de presión.
- Aislamiento del sector mediante la actuación sobre las válvulas frontera.
- Apertura de válvula de alimentación al sector.
- Desmontaje de registradores de presión y volcado de datos.
- Análisis de datos registrados.
- Etiquetado de válvulas frontera.

3.2.4. Control de caudales

Según se indicaba anteriormente, uno de los objetivos principales de la sectorización es el control de la red, de tal forma que se disponga de información del comportamiento de los sectores cuyo análisis permita la detección de anomalías y la toma rápida de decisiones para actuar en consecuencia.

El sistema de control se basará por tanto en equipos de medición; equipos de registro de datos; envío de datos; recepción y tratamiento de datos; gestión de alarmas y generación de informes.

Uno de los aspectos fundamentales en la explotación de la red sectorizada es el cálculo del balance hídrico de cada sector y del conjunto del sistema para la estimación de los caudales no registrados, a partir de los cuales poder inferir la existencia de fugas en los sectores.

Sin embargo, dado que uno de los parámetros que intervienen en el balance hídrico, el consumo real registrado, sólo se conoce de forma global en las lecturas periódicas de los contadores de los abonados, a efectos de realizar un seguimiento constante del comportamiento de los sectores, la práctica más habitual es llevar a cabo un seguimiento diario de la evolución de los caudales mínimos nocturnos en la entrada de los sectores.

El caudal mínimo nocturno se define como el mínimo registrado en las horas de más bajo consumo (generalmente en horas nocturnas) a la entrada de un sector. Es un valor directamente medible y proporcional a la cantidad de agua que se pierde en una red. Su control permite conocer la existencia de roturas no detectadas.

La principal dificultad en la determinación del Agua no Registrada a partir de los caudales mínimos nocturnos está en determinar el porcentaje de los mismos que se debe a consumos y el atribuido a fugas en la red. Este valor depende principalmente del tipo de consumidores que existan en el sector controlado.

En este sentido, la posibilidad que ofrecen los contadores con opción de telelectura permite conocer de forma directa estos consumos.

Con relación a consumos no registrados pero sí identificados (fuentes, riegos, baldeos, etc.) se realiza una estimación de su volumen para tenerlos en cuenta en la estimación del caudal mínimo nocturno. Los caudales mínimos nocturnos que se determinen como exentos de fugas para cada sector son considerados como consignas de alarmas, de tal forma que cuando se midan valores superiores a los prefijados como mínimos de manera persistente, salte una alarma en el centro de control y se proceda a la localización de fugas en el sector, usando los medios indicados en el presente documento.

3.2.5. Gestión de presiones

Como se indicaba anteriormente, la organización de la red en sectores se puede optimizar mediante la implantación de sistemas que permiten la regulación activa de la presión en la entrada de los sectores. Con estos equipos, se optimiza el funcionamiento hidráulico de los sectores, se reduce la aparición de roturas y se reduce asimismo el volumen de agua perdida por las hipotéticas fugas existentes, ya que dicho volumen perdido depende directamente de la presión en el sector.

Adicionalmente a esta reducción de agua fugada y la disminución del ratio de aparición de fugas, se reduce también el consumo real que depende directamente de la presión en el punto de suministro, lo cual es beneficioso desde el punto de vista de ahorro de agua.

Los perfiles de presión regulada pueden definirse en función del tiempo y/o caudal. Se pueden establecer perfiles de presión diferenciados para cada día o para diario/fin de semana. De esta forma, mediante el modelo matemático se podrían definir dichos perfiles de presión o bien, dejar actuar al sistema de forma independiente y autorregulada.

A modo de conclusión sobre las ventajas que aporta el control de presiones en las redes, cabe citar referencias bibliográficas procedentes de Severn Trent Water (Reino Unido) que indican reducciones de hasta un 12% del total del Agua No Registrada (ANR) con la puesta en marcha de la optimización de presiones.

En definitiva, entre las ventajas que conlleva el establecimiento del plan de regulación de presiones destacan:

- Mejora la calidad del servicio, adaptando la presión a la demanda.
- Reducción de la frecuencia de roturas.
- Disminución del riesgo de sobrepresiones ocasionados por bolsas de aire acumuladas en el interior de las conducciones.
- Eliminación de las fluctuaciones de presión en la red que provocan nuevas fugas y aumentan los caudales de las ya existentes.
- Disminución drástica tanto de las fugas en la red como de las existentes en las instalaciones interiores.

- Especificaciones técnicas menos exigentes de los componentes de red.
- Reducciones de gastos de reparación.
- Mejora del rendimiento y disminución del volumen de ANR.

En cuanto a los mecanismos de regulación, pueden basarse en diferentes escalones de presión en función de la demanda de diferentes franjas horarias o, directamente, en regulación de la presión dependiendo del caudal circulante por la válvula reductora según las consignas que se introduzcan.

Adicionalmente al control de la presión en los puntos de entrada a los sectores, se recomienda monitorizar la presión en los puntos críticos de los sectores con el objeto de detectar anomalías desde el momento en el que se produzcan.

3.3. MICROSECTORIZACIÓN DINÁMICA

3.3.1. Introducción

Tradicionalmente se ha afrontado el control del rendimiento de las redes de abastecimiento mediante la sectorización. La sectorización clásica caracteriza por tener sectores de gran tamaño y por tener sus límites de frontera cerrados permanentemente. En su momento este fue un importante avance, pero en la mayoría de las ocasiones con sectores cuyos tamaños de red son elevados, la búsqueda de fugas no alcanza la eficiencia necesaria y los volúmenes de agua perdida no se reducen al nivel deseado. Por lo general el despliegue de medios humanos y materiales es desproporcionadamente elevado para los medianos resultados obtenidos.

El concepto de Microsectorización Dinámica surge como evolución del de Sectorización, ya que los clásicos sectores son difíciles de controlar debido a su tamaño y presentan numerosos inconvenientes por su rigidez.

Una cuestión que plantea la sectorización tradicional es la pérdida del mallado de red en algunos lugares, lo que causa dificultades para el suministro tanto en calidad como en cantidad. Esto crea nuevos finales de red en donde la renovación del agua es escasa o nula lo que genera problemas de pérdida de cloro y crecimiento bacteriano que obliga a mantener un control exhaustivo de la calidad del agua en esos puntos así como descargas preventivas para mantener o recobrar la buena calidad del agua suministrada a los clientes. También se puede ver afectado el caudal suministrado a esas zonas, lo que obliga a realizar extensiones y reconexiones de red. Con ello se incurre en nuevos costes y complicaciones de explotación.

Para dar respuesta a este problema se plantea la Microsectorización Dinámica, consistente en crear diariamente microsectores de corta duración, tan solo el tiempo necesario para obtener el valor del caudal mínimo nocturno. Esta solución resulta más económica y rápida de implantar y por lo tanto la más efi-

ciente y efectiva en la tarea de la búsqueda de fugas, consiguiéndose así el mejor control sobre el Agua No Registrada.

Un plan de Microsectorización Dinámica permite mejorar con gran rapidez y economía el rendimiento hidráulico de las redes de distribución, ya que reduce notablemente la vida útil de todas las fugas mediante su detección y localización temprana debido a la vigilancia diaria permanente, constante y localizada de toda la red.

Mediante la Microsectorización Dinámica se consigue:

- Detectar y cuantificar el nivel global de pérdidas.
- Identificar y localizar con precisión los lugares críticos de la red.
- Disminuir los costes de mantenimiento de las redes al orientar las acciones a los sectores con mayores índices de ANR.
- Verificar los resultados de la campaña de búsqueda y reparación de fugas.
- Mantener en el tiempo altos niveles de rendimiento debido a la vigilancia permanente e información en tiempo real.

3.3.2. Consideraciones de diseño de la Microsectorización Dinámica

El objetivo final de un plan de Microsectorización Dinámica es reducir el volumen de agua perdida en una red de distribución en el menor tiempo posible en base a la significativa reducción del periodo de vida útil de las fugas, que es el tiempo que transcurre desde que se produce la fuga, se detecta, se localiza y finalmente es reparada.

La Microsectorización Dinámica consiste en subdividir una red de distribución en tantos microsectores como sea posible, teniendo en cuenta que, en función de la topología de la red, se crearán microsectores con una longitud media de entre 5 y 10 kilómetros. Con microsectores de mayor tamaño se pierde sensibilidad en la detección de los lugares conflictivos y hay mayor dificultad en la localización final de las fugas, con el resultado de que la vida útil de una fuga se alarga de manera no deseable.

La Microsectorización Dinámica se puede implementar directamente, no siendo condición necesaria ni previa tener la red sectorizada.

La Microsectorización Dinámica se basa en la caracterización del caudal mínimo nocturno para todos y cada uno de los microsectores. Habitualmente, durante el periodo nocturno hay menor demanda y el caudal debido a las fugas cobra mayor peso porcentual en relación con el caudal total suministrado, aumentando así la sensibilidad y facilidad en su medición precisa. Esa relación entre el caudal de fugas y el total suministrado es mayor cuanto menor sea el tamaño del microsector, razón por la cual se requiere que su tamaño medio sea de 5 a 10 km.

Con objeto de obtener el caudal nocturno, la Microsectorización Dinámica requiere de la instalación de una serie de equipos e implementación de tecnologías que consiguen microsectorizar de manera temporal la red de distribución de agua potable. Para ello se instalan válvulas de frontera en cada interconexión en los límites del microsector, dotándolas de actuadores hidráulicos autoalimentados que permiten su apertura y cierre automáticos. No precisan de ningún tipo de alimentación eléctrica, tienen dimensiones muy reducidas, son de instalación muy versátil y funcionan en las condiciones más adversas, incluso sumergidos. Para su instalación se aprovechan pozos y arquetas existentes, lo que hace que la inversión en obra civil sea mínima.

3.3.3. Principios de funcionamiento de la Microsectorización Dinámica

A partir de una cierta hora, y de acuerdo con la curva característica de consumos de cada zona, el microsector se aísla automáticamente cerrándose todas las válvulas frontera, dejando un único punto de alimentación. En esta entrada a cada microsector se instala un caudalímetro de gran precisión para caracterizar el Caudal Mínimo Nocturno. Se mantendrá este modo de suministro durante un breve periodo, inferior a tres horas, suficiente para obtener el valor del caudal mínimo.

Una vez realizada la medida del caudal, todas las válvulas de frontera volverán a abrirse de manera automática restableciendo el modo de distribución normal. En caso de necesidad urgente, un incendio o una gran demanda puntual por parte de algún cliente, el sistema abre las válvulas automáticamente, permitiendo el suministro normal.

Cada día, recién acabado el registro de caudal, se hace un envío puntual de ese caudal desde el registrador de campo a la central de control. No es un control continuo 24 horas, ya que el caudal que interesa solo es el que se produce durante la madrugada.

En caso de que algún microsector supere los niveles de demanda establecidos como aceptables, sabremos que existe alguna problemática (fuga, rotura, fraude o cualquier otro inconveniente) y estará perfectamente localizada. Esto permitirá priorizar los esfuerzos de búsqueda de fugas, ya que se sabrá qué microsectores tienen los niveles más altos de pérdidas en los que la búsqueda será más productiva.

3.3.4. Esquema de funcionamiento de la Microsectorización Dinámica

- Durante la noche, y a unas horas preestablecidas, las válvulas que delimitan cada microsector se cierran lentamente de manera automática dejándolo aislado salvo por una única entrada de suministro. Aquí se instala un caudalímetro que registrará el caudal nocturno.
- Una vez realizadas las mediciones del caudal nocturno, las válvulas se abren automáticamente y la red vuelve a su estado normal de distribución. En caso de necesidad urgente, p. ej. un incendio, el sistema abre todas las válvulas automáticamente, permitiendo de nuevo el suministro normal.

- Los valores de caudal nocturno se enviarán diariamente al centro de control desde donde se podrán visualizar todos ellos gracias al software especializado.
- Para cada microsector se calculará el caudal mínimo esperado en horas de mínimo consumo (denominado habitualmente como caudal mínimo nocturno). Éste será el valor de referencia de cada microsector.
- Una vez establecido el caudal mínimo nocturno de cada microsector, se compararan con el diariamente las mediciones obtenidas.
- Si en algún microsector se superan los niveles de demanda nocturna establecidos como aceptables, eso será indicio de que existe alguna problemática (fuga, rotura, fraude o cualquier otro inconveniente) y estará perfectamente localizada.
- Esto permitirá priorizar los esfuerzos de búsqueda de fugas, haciéndola más eficiente, ya que se podrá dirigir en primer lugar a los microsectores que presenten mayores pérdidas. Además, se tendrá la seguridad de que realmente hay una nueva fuga, lo que facilita y orienta mejor las labores de localización con los equipos de campo.
- De esta forma, se estima que la vida útil de una avería, tiempo que transcurre desde que se produce la fuga, se detecta, se localiza y finalmente es reparada, se puede reducir a tres días, mientras que sin un control de este tipo se puede alargar a periodos inaceptables en muchas ocasiones superiores a un año.

3.4. TECNOLOGÍAS EXISTENTES PARA LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS

3.4.1. Introducción

La importancia de la detección y localización de fugas es cada vez mayor en todos los servicios de abastecimiento de agua, llegando en muchos casos a ser una prioridad dentro de las diferentes tareas.

Las razones para controlar y reducir las fugas en la red obedecen a términos económicos de mejora de la eficiencia, a no desperdiciar el recurso agua, a la mejora de la imagen de las compañías, a las exigencias de los usuarios, al dimensionamiento de las infraestructuras, a problemas de contaminación, o daños a cimentaciones y a un sinfín de razones que están bien documentadas.

Para detectar y localizar las fugas en las redes de distribución de transporte, de una manera efectiva, los servicios de abastecimiento de agua buscan en los avances de la tecnología reducir costes y realizar estas tareas de la manera más óptima.

A continuación se exponen las diferentes técnicas utilizadas que, complementariamente a la sectorización y gestión de presiones, permiten la detección y localización de fugas, así como la mejora en la gestión integral de los servicios de abastecimiento de agua.

3.4.2. Avances en la tecnología existente

La tecnología que más se ha desarrollado ha sido aquella que ha utilizado las características acústicas de una fuga para detectar su presencia.

Los grandes hitos en este desarrollo fueron la aparición del detector acústico electrónico (geófono), posteriormente el correlador acústico y el sistema permanente de registro de sonidos (Permalog).

Estos dos últimos han sido desarrollos de la Unión Europea, específicamente en el Reino Unido.

La tecnología para obtener los mejores resultados para la detección y localización de fugas está constantemente evolucionando. Los servicios de abastecimiento de agua, junto con los fabricantes y suministradores de equipos han incrementado juntos el esfuerzo de aplicar los nuevos conocimientos, los desarrollos en la electrónica, los materiales, en las telecomunicaciones y en la informática para mejorar los equipos existentes, desarrollar nuevos productos, ahorrar costes y hacer más fácil su uso.

3.4.3. Métodos acústicos

3.4.3.1. Principios

Cuando el agua escapa a través de una fuga en una conducción presurizada produce una vibración en sus paredes y en el terreno próximo y crea un ruido. Las ondas de sonido de este ruido se propagan a lo largo de la pared de la tubería, las conexiones o válvulas, el terreno circundante y especialmente a través del agua que circula por la tubería.

Este ruido de fuga característico varía en frecuencia y velocidad de propagación según diversos factores como el diámetro y espesor de las tuberías, tipo de material, dimensiones, forma de la rotura, etc.

La velocidad del sonido en las tuberías depende del material y la relación entre el diámetro y el espesor de la tubería. Si el material de la tubería idealmente fuera completamente rígido, la velocidad sería de aproximadamente 1485 m/sg. Sin embargo, los materiales tienen siempre un cierto grado de elasticidad con lo que la velocidad de propagación para las tuberías metálicas suele estar alrededor de 1200m/sg y para las tuberías plásticas, dependiendo del grado de elasticidad entre 600 y 300m/sg. Cuanto más elástico es el material, más absorbe la energía acústica y las ondas de sonido se van atenuando.

Cada tubería tiene una frecuencia de resonancia, considerando las ondas longitudinales de sonido, que dependen de las dimensiones de la tubería y del material. Para materiales plásticos y también para tuberías de otros materiales pero de gran diámetro llega a valores alrededor de 10Hz, por debajo de los valores que el oído humano puede percibir (aprox. 20Hz).

Por otro lado, se sabe que las altas frecuencias se atenúan más fuertemente que las bajas frecuencias. La atenuación medida en dB/mt se incrementa con la distancia, lo que origina que un sonido de fuga se vaya atenuando y quedando enmascarado por otros ruidos, como ruidos ambientes, del tráfico, turbulencias en la propia tubería, etc. según se va alejando del punto de fuga.

3.4.3.2. Métodos de detección y localización

La detección permite el conocimiento de la existencia o la aproximación sin situar el lugar exacto de las fugas, mientras que la localización, como su nombre indica, es el proceso para encontrar la posición exacta de las fugas.

Existe un conjunto de técnicas acústicas para detectar las fugas de agua, las cuales no son excluyentes entre si, sino complementarias y los servicios de abastecimiento de agua utilizan varias de estas técnicas simultáneamente para detectar y localizar las fugas de agua.

A continuación se describe el "estado del arte" de cada una de estas tecnologías:

3.4.3.2.1. Amplificador electrónico de escucha (geófono)

Como se ha comentado anteriormente, cuando existe una fuga en una tubería presurizada, la energía producida por la salida del agua a presión se transforma en ruido. Este sonido o vibración es transmitido a través de la tubería, del agua y a través del terreno circundante en un rango de frecuencias.

Los amplificadores electrónicos de escucha están diseñados para captar estos sonidos directamente sobre el terreno o bien en contacto con válvulas o conexiones de las tuberías cercanas al punto de fuga. Normalmente el sonido más alto se recibe sobre el punto de fuga.

Figura 5. Nivel de sonido sobre el terreno

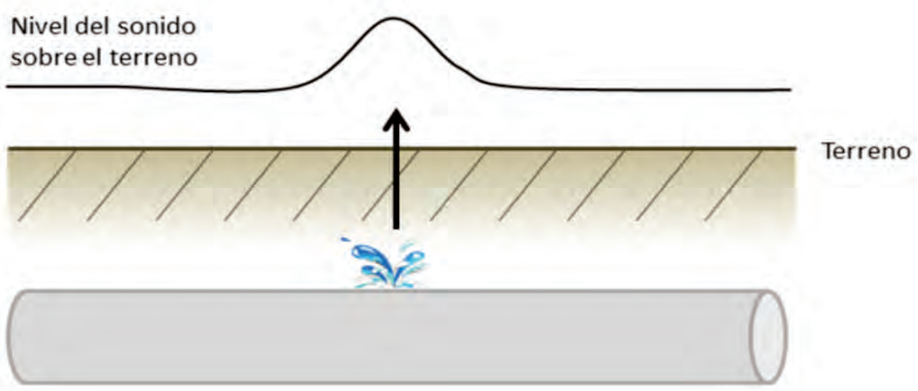
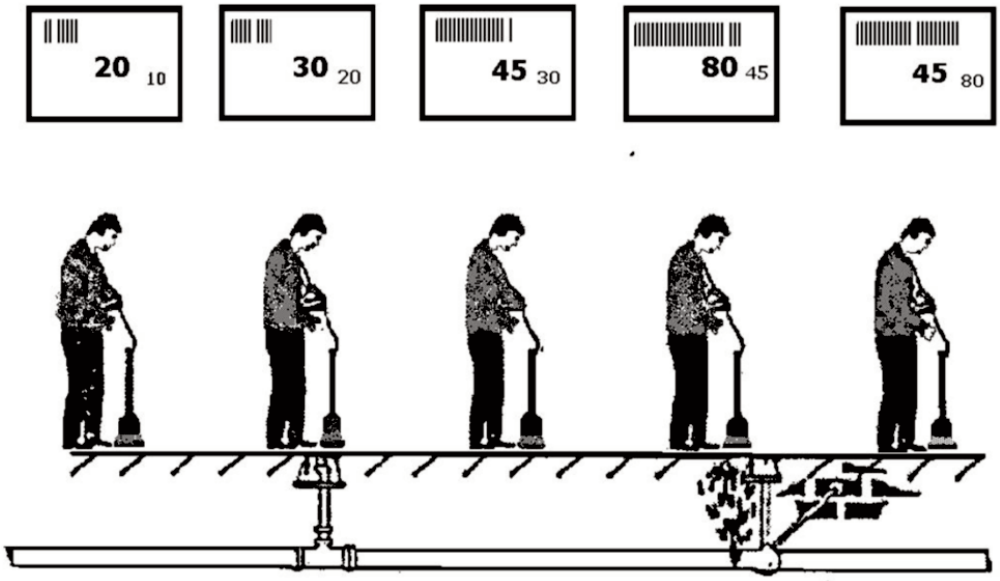


Figura 6. Nivel de sonido en display de geófono



El sonido se transmite mejor sobre terrenos compactos y duros que sobre materiales arenosos o poco compactos. También influye el tipo de material de la tubería y el diámetro, siendo más fácil de detectar fugas por este método en tuberías metálicas que plásticas y en diámetros pequeños que grandes tuberías.

Otros factores determinantes son la presión (a mayor presión se genera más energía y más ruido) y la profundidad de la tubería (por la atenuación del sonido a través del terreno).

Contrariamente a lo que comúnmente se piensa, las pequeñas fugas se detectan mejor que las grandes. Una pequeña fuga de unos mm de diámetro se detecta mucho más fácilmente que una rotura importante a lo largo de la generatriz de la tubería.

Los equipos modernos disponen de sensores de gran sensibilidad y amplificación y los filtros ayudan de manera determinante a la detección de fugas por esta tecnología.

El amplificador electrónico de escucha o geófono es un instrumento compuesto por un módulo de control y amplificación, un micrófono de pie tipo campana, un par de auriculares y una varilla de contacto que la mayoría de los suministradores ofrecen de forma opcional.



Foto 1. Geófono

El procedimiento para localizar la posición de las posible fugas consiste en comparar un número de ruidos a lo largo de la conducción, acercándose en la dirección donde la señal de intensidad de sonido va en aumento, si la señal decrece se debe volver atrás, reduciendo la distancia entre cada paso. El sonido más alto indicará la localización de la fuga, siempre que las condiciones del terreno sean homogéneas.
Los mejores resultados para la detección y localización de fugas con estos equipos se obtienen según la siguiente operativa:

- Un operador va escuchando directamente sobre la tubería a través de las válvulas de red y las conexiones de las acometidas, mientras otro operador recorre la traza de la tubería principal a cierta distancia del primero, escuchando sobre el terreno.
- Si el primer operador detecta una posible fuga, avisa al segundo operador para que escuche de forma más selectiva.
- Puede darse el caso, fundamentalmente en tuberías plásticas, que el sonido se atenúa suficientemente de forma que no se detecta en las conexiones o válvulas, pero si sobre el terreno. Por ello es importante este segundo recorrido sobre la traza.

Estos trabajos normalmente han de realizarse por la noche, cuando la interferencia del tráfico y los consumos de los usuarios que pueden enmascarar fugas son más reducidos. Aunque la eficacia de estos equipos es grande, requiere una labor humana intensiva, con operadores expertos para una inspección sistemática de la red.

Otras tecnologías más modernas y eficientes son utilizadas actualmente para realizar la detección sistemática de fugas como los registradores de sonido en modo permanente o móvil o la sectorización y test secuencial que se desarrollan más adelante.

Figura 7. Escucha a través de la válvula y conexiones

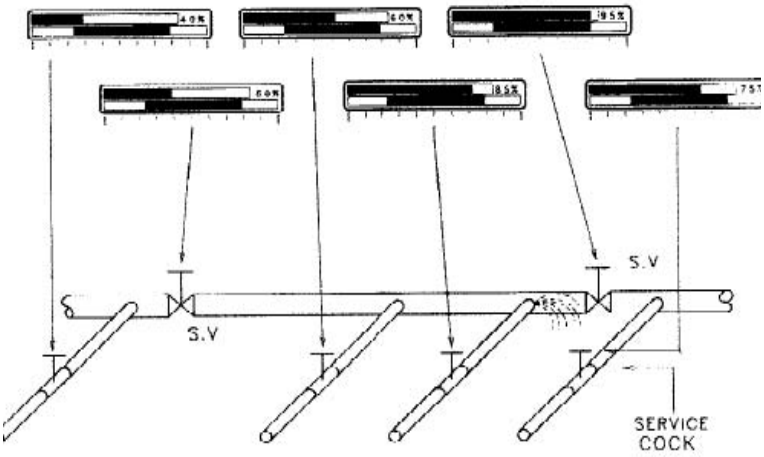
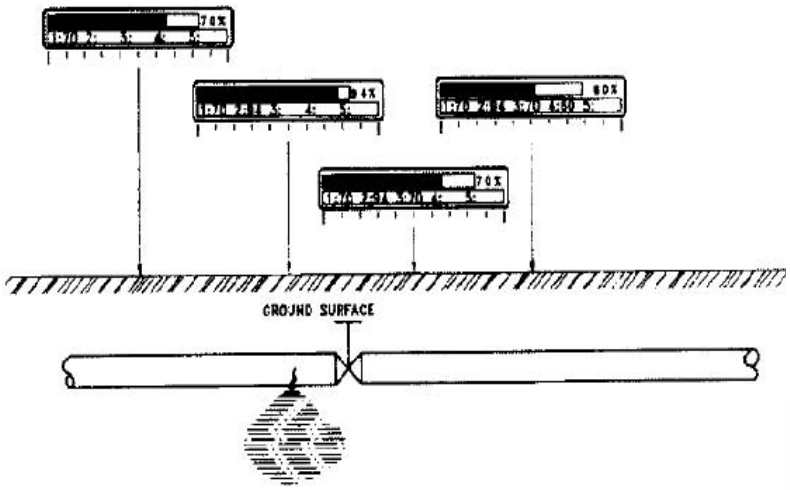


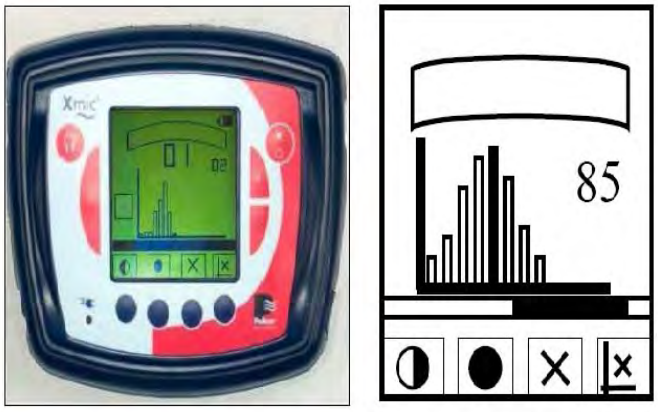
Figura 8. Localización a través de la escucha en el suelo



Sin embargo, el geófono se ha convertido en una herramienta muy útil para la confirmación de fugas detectadas por correlación antes de excavar o para detectarlas en zonas más concretas donde se dispone de indicios de posibles fugas. También es útil en ciertas situaciones donde los ruidos de fugas se atenúan rápidamente y no viajan a lo largo de la tubería (bajas presiones, tuberías de material de gran atenuación, puntos de contacto con la tubería muy alejados).

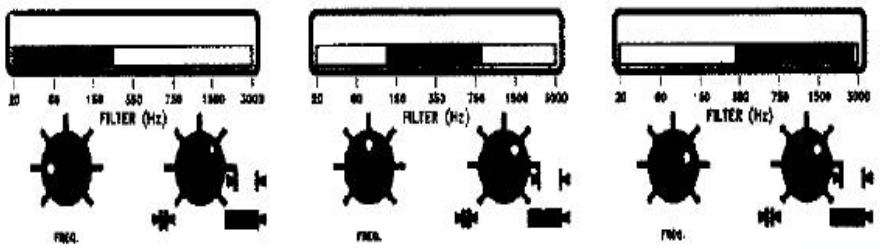
Los principales avances tecnológicos en estos equipos han tratado de facilitar su uso e interpretación de resultados.

Figura 9. Display de geófono



La selección automática o manual de filtros permiten aislar lo más posible el ruido de fuga de las interferencias por los ruidos de tráfico y ambientales. A continuación se muestra un ejemplo de los filtros seleccionados para diferentes materiales de tubería.

Figura 10. Filtros seleccionados para diferentes materiales de tubería



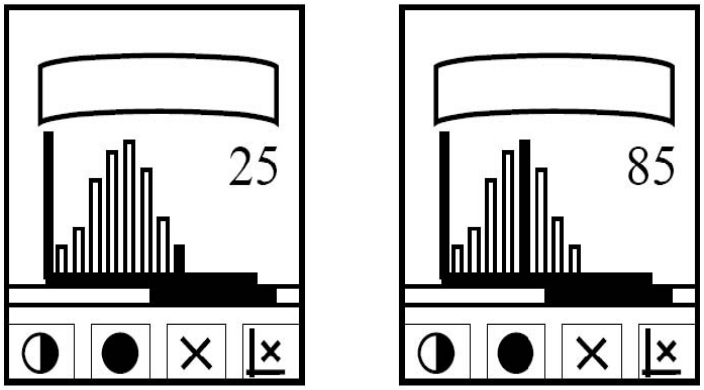
BAJAS FRECUENCIAS	MEDIAS FRECUENCIAS	ALTAS FRECUENCIAS
Plásticas	Plomo. Fibrocemento y Hormigón	Fundición y acero

Estos valores son los usualmente empleados, pero hay que tener en cuenta que las frecuencias recibidas pueden variar dependiendo del tipo de terreno y el tipo de fuga.

Otra de las características de los equipos modernos que ayudan al usuario a la localización de la fuga es la comparación del mínimo nivel de ruido a lo largo de las diferentes escuchas en el tramo de la tubería en el que se presupone que existe una fuga.

Los diferentes mínimos niveles de sonido son registrados automáticamente y mostrados en una pantalla de manera gráfica.

Figura 11. Comparativa de histogramas



La comparación de los histogramas de la figura 11 muestra que la fuga estará muy probablemente en el valor más alto del histograma. Estas facilidades ayudan al operador a identificar fugas en puntos donde el oído humano a veces no puede detectar.

3.4.3.2.2. Correlador acústico

Los correladores permiten un uso más amplio que los geófonos descritos en el apartado anterior, al no estar tan afectados por el tipo de terreno, la profundidad de la tubería o los ruidos ambientales o de tráfico, permitiendo detectar fugas en zonas ruidosas, donde los geófonos no pueden. Estos equipos trabajan comparando las señales de ruido detectados en dos puntos diferentes de la tubería.

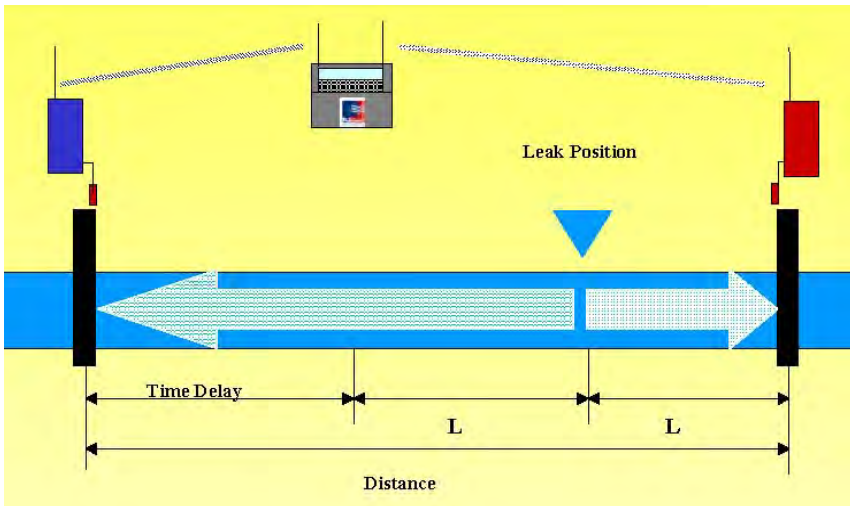
Los correladores básicamente consisten en:

- Unidad central o correlador asistido o no con el ordenador portátil
- 2 ó 3 acelerómetros o sensores hidrófonos
- 2 ó 3 radiotransmisores
- Auriculares de escucha
- Elementos auxiliares: antena de vehículo, maleta de transporte, cargador.

Foto 2. Correlador acústico



Figura 12. Esquema de funcionamiento del correlador



Los sensores se sitúan sobre válvulas o conexiones de la red (es decir, puntos de acceso a la tubería). A cada sensor le llegan unas señales de ruido. Los equipos hacen automáticamente un tratamiento matemático de las señales identificando los distintos tiempos de llegada a cada sensor del patrón de ruido procedente de la fuga. La diferencia de tiempos es lo que se denomina tiempo de retardo TD.

Mediante este tiempo de retardo, aplicando la ecuación

$$L = D - \frac{V \times T_D}{2}$$

- L, distancia de la fuga a lo largo de la tubería al sensor más cercano.
- D, distancia entre los sensores a lo largo de la conducción, que ha debido ser medida previamente con precisión.
- V, velocidad del sonido, dependiente del material y del diámetro de la tubería fundamentalmente.

Los correladores traen incorporada una base de datos de las velocidades aproximadas en función de estas variables. Sin embargo, aunque estos valores nos dan una buena aproximación en muchos casos resulta necesario hacer el cálculo directo de esta velocidad. Esto se puede hacer en la práctica produciendo en la tubería a analizar un ruido artificial como, por ejemplo, cerrando parcialmente una válvula o abriendo una boca de riego o hidrante.

Este ruido se puede provocar dentro del tramo, es decir entre sensores o fuera del tramo. Introduciendo la distancia de esta fuga artificial, el correlador calcula automáticamente la velocidad aplicando la fór-

mula anterior L=D-(VxT$_D$)/2, donde tanto L (distancia a la fuga artificial) y D (distancia entre sensores) son conocidas, y donde T$_D$ es determinada por el equipo y la velocidad V es automáticamente calculada. Introduciendo esta velocidad como velocidad del sonido en esa tubería nos permitiría detectar con más exactitud la posición de la fuga real.

Los equipos más modernos disponen de la llamada función de regresión lineal. Este método consiste en dejar un sensor fijo mientras el segundo sensor se mueve a un mínimo de tres posiciones diferentes, realizando la correlación a estas tres distancias.

Figura 13. Esquema de cálculo de velocidad por regresión lineal

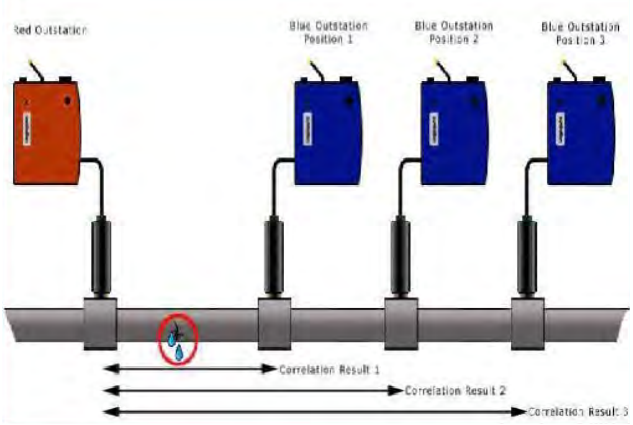
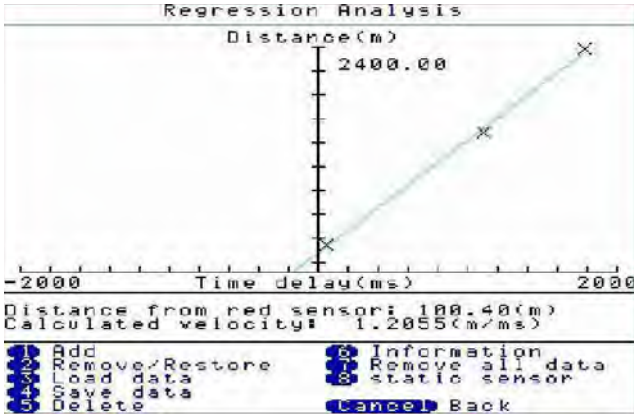


Figura 14. Línea de regresión para el cálculo de velocidad



En este ejemplo el sensor azul se desplaza para realizar las 3 correlaciones. Cada par de tiempos de retardo y distancia son registrados, calculando automáticamente la velocidad en dicha tubería.

El tiempo de retardo es representado automáticamente con las tres correlaciones, calculando con gran precisión la velocidad del sonido lo que permite una localización precisa de la fuga.

La eficacia de los correladores depende de que la señal de ruido de fuga viaje por la tubería y el agua y llegue a cada uno de los dos sensores. La correlación no se puede realizar si la señal se atenúa de forma considerable y no llega a uno o ambos sensores.

Los factores que hacen que esto suceda como se ha comentado anteriormente son la baja presión, ruidos ambientales, vibraciones y materiales de tuberías plásticas con grandes distancias entre sensores. La sensibilidad de los sensores es muy importante, así como la capacidad de proceso y análisis de las señales desde frecuencias de pocos Hz en adelante.

Existen dos tipos de sensores:

Sensores tipo acelerómetro

Se acoplan directamente sobre la tubería a las partes metálicas como válvula o conexiones, mediante un imán que llevan en la parte inferior del sensor. Es muy importante que el contacto con dichos elementos de la red sea bueno y que no existan partes sometidas a corrosión o suciedad que dificulte la transmisión.



Foto 3. Sensor tipo acelerómetro

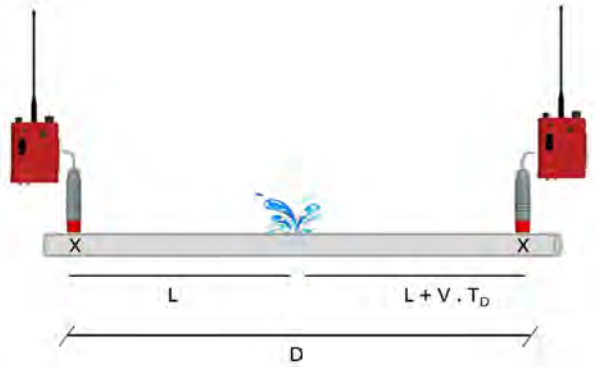
La facilidad de uso de este tipo de sensores hace que sean los más comúnmente utilizados.

La metodología más comúnmente utilizada es la inspección de la tubería colocando sensores tipo acelerómetros, conectados a los radiotransmisores, de válvula a válvula, cubriendo distancias de cientos de metros entre sensor y sensor cuando se trata de tuberías metálicas y presiones altas y de decenas de metros cuando se trata de tuberías plásticas o bajas presiones. Los sensores se van moviendo alternativamente avanzando sobre el trazado a auscultar.

Para lograr una mayor rapidez la distancia D no es necesario medirla con exactitud, se va introduciendo de manera aproximada, hasta que el equipo detecta una posible fuga, en este caso ya la distancia se mide con exactitud según el trazado de la tubería. Este modo de auscultar se conoce como modo vigilancia.

Para conseguir la mayor exactitud a la hora de localizar la fuga, una vez detectada en el modo vigilancia se situarán los sensores de forma que la hipotética fuga quede lo más centrada que sea posible entre ambos.

Figura 15. Fuga dentro de intervalo

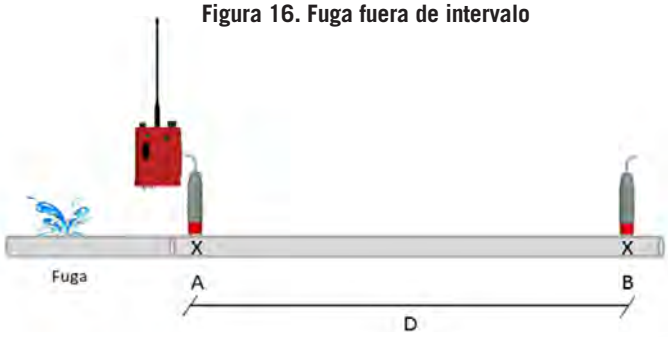


Con esto se consigue que el tiempo de retraso TD sea muy pequeño y por lo tanto en la fórmula L=D-(VxT$_D$)/2 cualquier error en el cálculo de la velocidad tiene una influencia muy pequeña al estar multiplicado por el valor TD.

Por el contrario, en aquellos casos en los que no se pueden situar los sensores dejando la fuga centrada, para obtener la máxima precisión es necesario realizar el cálculo de la velocidad con la máxima aproximación utilizando las técnicas ya descritas.

Otro caso importante de conocer se produce cuando la fuga es localizada fuera del intervalo entre ambos sensores.

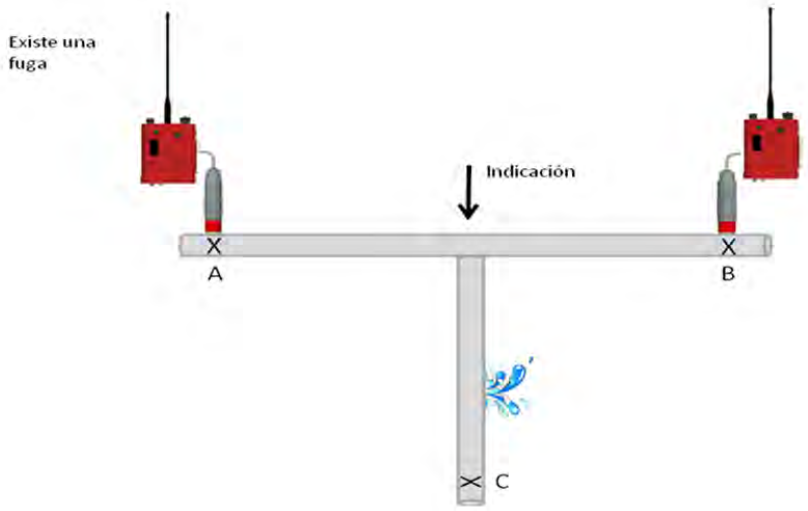
Figura 16. Fuga fuera de intervalo



En estos casos el equipo marcará siempre la fuga sobre el sensor más cercano a dicha fuga, ignorando el tiempo de retraso. Deberemos mover uno de los dos sensores para dejar la fuga dentro del tramo.

Así mismo si en el tramo de tubería a inspeccionar entre los sensores existe una conexión o bifurcación en donde existe una fuga, el correlador siempre marcará la fuga en el lugar de dicha bifurcación y será necesario mover uno de los sensores a un nuevo punto C para asegurarnos que la fuga no está en el inicio de la bifurcación sino en un punto diferente.

Figura 17. Fuga en bifurcación



Sensores tipo hidrófono

En aquellos casos en los que la transmisión del sonido a lo largo de la conducción se atenúe grandemente como es el caso de tuberías de gran diámetro no metálicas, muy bajas presiones o materiales de tuberías con una cierta elasticidad se utilizan sensores tipo hidrófono. Estos sensores se introducen en el interior de las conducciones para estar en contacto con el agua y detectar el ruido de las hipotéticas fugas.



Foto 4. Sensor tipo hidrófono

Su instalación es mucho más complicada que en el caso de los acelerómetros y su uso queda restringido a localizar fugas en situaciones difíciles.

La razón de su efectividad es que detectan los sonidos directamente del agua en muy bajas frecuencias, que como se ha comentado en el apartado 3.1 que son las que viajan a más largas distancias.

Sin embargo aunque los hidrófonos presentan claras ventajas en la detección de fugas difíciles, no siempre son eficaces cuando los ruidos captados son enmascarados por los ruidos de fondo de las tuberías.

Otro tipo de correladores también utilizados son los correladores multipunto.

Estos sistemas consisten normalmente en un ordenador portátil incorporando software de correlación, una maleta interface de programación y volcado de datos y una serie de sensores normalmente 8 ó 12.

Foto 5. Correlador multipunto



Foto 6. Acoplamiento de sensor a válvula



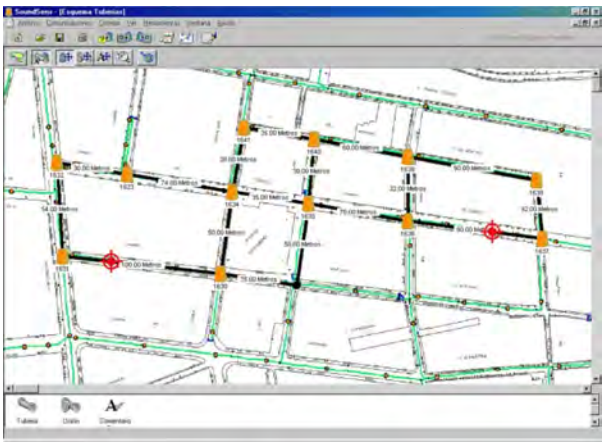
Los equipos una vez sincronizados y programados se instalan en la red mediante su acoplamiento a las válvulas o conexiones cubriendo una zona determinada que se quiere inspeccionar.

Estos sensores no van conectados a radiotransmisores, con lo que la correlación siempre se realiza a postproceso.

Los equipos empiezan a registrar datos una vez instalados o bien a una hora programada por la noche para conseguir menos interferencias de consumo o ruidos ambientes.

Al cabo de unas horas o al día siguiente los sensores son retirados y a través de la maleta-interface se transfieren los datos al ordenador portátil donde se efectúan las correlaciones entre los diferentes sensores determinando la presencia de la fuga o posibles fugas.

Figura 18. Ejemplo de colocación de sensores



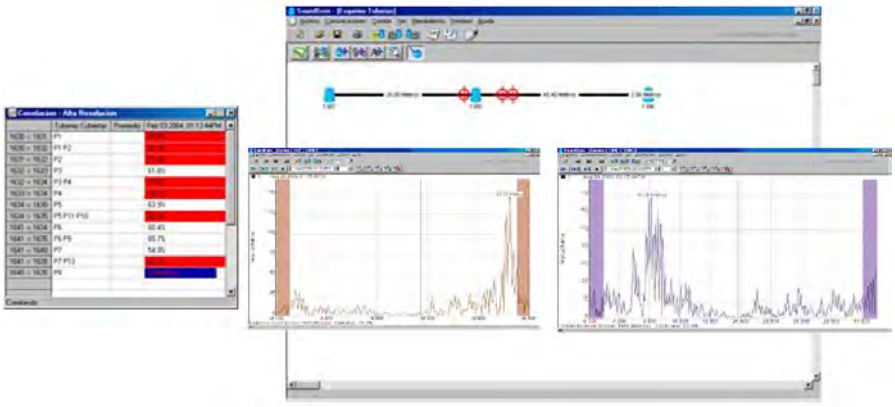
Los equipos una vez sincronizados y programados se instalan en la red mediante su acoplamiento a las válvulas o conexiones cubriendo una zona determinada que se quiere inspeccionar.

Estos sensores no van conectados a radiotransmisores, con lo que la correlación siempre se realiza a postproceso.

Los equipos empiezan a registrar datos una vez instalados o bien a una hora programada por la noche para conseguir menos interferencias de consumo o ruidos ambientes.

Al cabo de unas horas o al día siguiente los sensores son retirados y a través de la maleta-interface se transfieren los datos al ordenador portátil donde se efectúan las correlaciones entre los diferentes sensores determinando la presencia de la fuga o posibles fugas.

Figura 19. Información recogida por los sensores



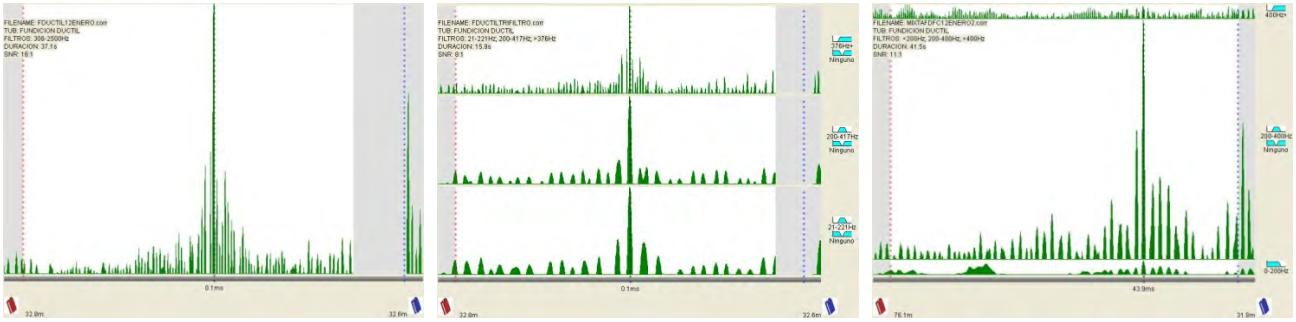
Estos correladores presentan la ventaja de ser programados e instalados durante el día y realizar el registro y correlación por la noche en las mejores condiciones acústicas y sin presencia humana. Su uso es aconsejable en aeropuertos o zonas donde los radiotransmisores presentan interferencias.

La desventaja sobre los correladores con radiotransmisión es que al realizarse la correlación en postproceso y no en tiempo real el tiempo en instalación, desinstalación, volcado y análisis, suele ser superior.

El correlador se viene utilizando como una herramienta imprescindible en la detección y localización de fugas y complementaria al geófono. Sin embargo, con la aparición de los registradores de sonido permanente su utilización como detector de fugas en modo vigilancia ha disminuido utilizándose para localizar fugas en sectores o tramos acotados.

Los principales avances tecnológicos en estos equipos han ido encaminados a hacer correladores más fáciles de manejar, de tamaño más reducido y a la vez más precisos. Incorporando pantallas a color táctiles con multitud de gráficos e informaciones, mayor sensibilidad de los sensores y la posibilidad de realizar varias correlaciones simultáneas con distintos filtros, ahorrando tiempo y facilitando la labor a los operadores.

Gráfico 2. Correlaciones multipunto



3.4.3.2.3. Sistemas permanentes de registro de sonido (Permalog)

Bajo este nombre se describen un conjunto de tecnologías diseñadas para la vigilancia acústica permanente de la red. Tal y como se ha visto en apartados anteriores, cada vez existen herramientas más precisas, fiables y fáciles de manejar para localizar el punto exacto donde se encuentra una fuga. Gracias a ellos en la actualidad se ha optimizado mucho el proceso de localizar el punto exacto de una fuga, una vez conocida su existencia y acotada su ubicación.

Pero el gran caballo de batalla de los servicios de abastecimiento de agua de cara a controlar las pérdidas reales de agua, sigue siendo el reducir el tiempo que transcurre desde que una rotura se produce hasta que esta se detecta, confirma su existencia y acota su ubicación.

Sin lugar a dudas, la gran aportación tecnológica del siglo XXI al mundo del control de pérdidas reales de agua, son los registradores acústicos adaptados para su uso en las redes de transporte y distribución de agua, dotados de sistemas avanzados de transmisión remota de la información.

Desde la aparición de los primeros prelocalizadores acústicos a finales de los 90, su evolución ha sido tal, que en la actualidad el sonido se ha convertido en una magnitud física cuya monitorización es muy relevante de cara a reducir el nivel de fugas en las redes.

Los registradores de ruido están diseñados para ser fijados a la tubería o un elemento de esta (brida, válvula, collarín, etc.), habitualmente a través de un acoplamiento magnético, y así medir y registrar el ruido que llega a dicho punto. Los registradores de ruido se instalan en la red con una separación entre ellos de entre 50 y 300 metros, dependiendo del material de la tubería así como de la presión.

Foto 7. Acoplamiento magnético del registrador acústico al punto de escucha



Foto 8. Maleta para transporte, recarga de baterías y comunicación entre los registradores y un Pc

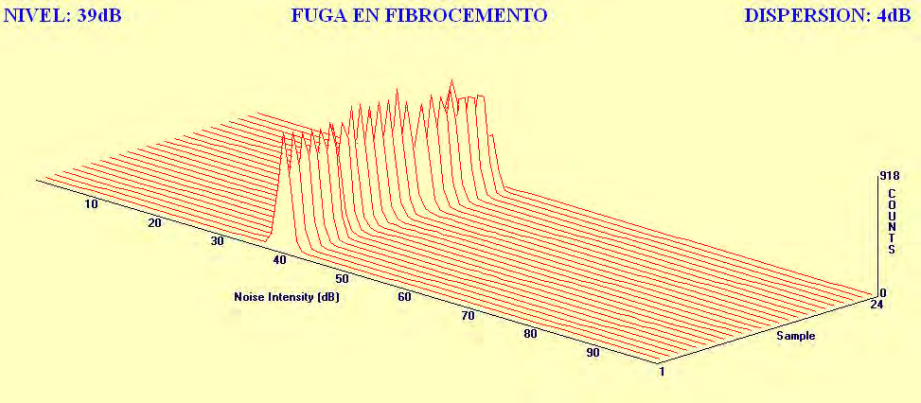


El perfil acústico que identifica un ruido de fuga se caracteriza por su intensidad o nivel y la consistencia en el tiempo. El dispositivo se activa automáticamente todos los días para llevar a cabo sus mediciones, normalmente en horas nocturnas coincidiendo con las de menor consumo.

Los datos medidos por los registradores son posteriormente transferidos a un Pc para su consiguiente análisis por parte del operador, quien compara la señal acústica recibida por cada uno de los registradores de ruido con el ruido de fondo presente en su punto de instalación. De este modo el operador con ayuda del registrador acústico detectará la existencia o aparición de una fuga en la proximidad del punto de instalación del registrador.

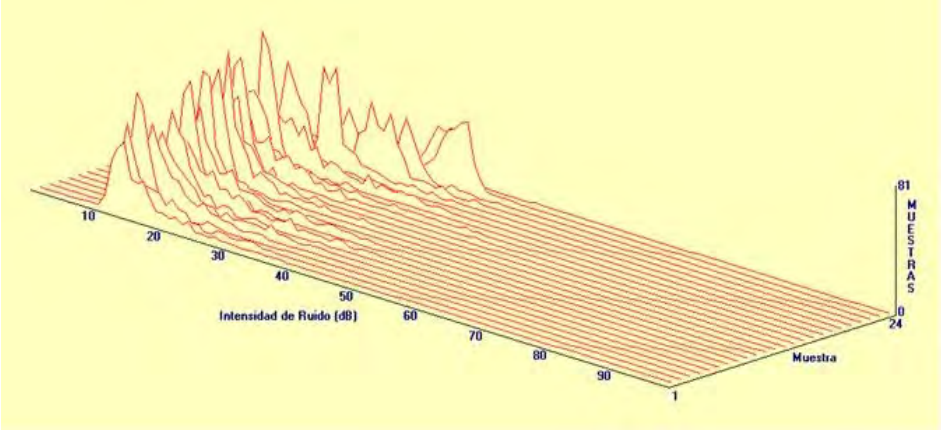
Veamos un ejemplo:

Gráfico 3. Registro del nivel de ruido y su consistencia en el tiempo, de una rotura en tubo de fibrocemento



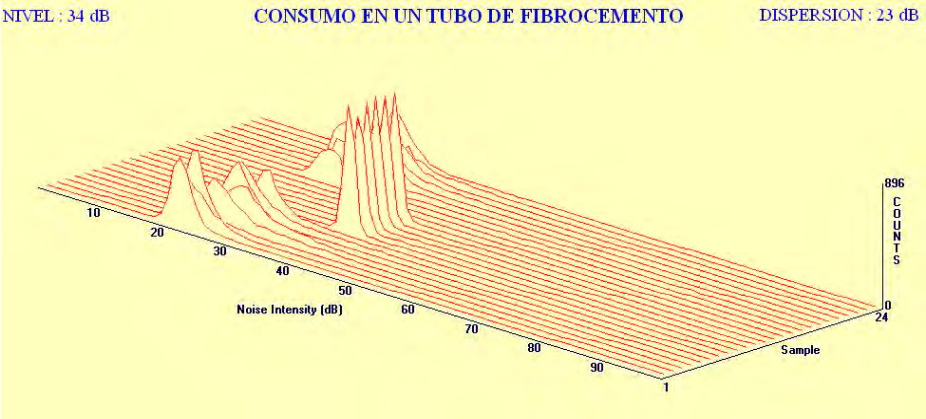
En el punto de instalación se registra un nivel de ruido de alta intensidad y constancia en el tiempo estando todas las muestras de ruido registrados muy concentradas en torno a ese valor. Concluimos que existe una fuga en las proximidades del punto de medición.

Gráfico 4. Registro del nivel de ruido y su consistencia en el tiempo, tras la reparación de la fuga



Una vez localizada y reparada la fuga, se analiza el registro obtenido. El ruido de fondo es bajo y la dispersión de las mediciones realizadas es muy aleatoria, no existiendo ningún ruido constante ni predominante. Concluimos que este registrador no está escuchando ninguna fuga.

Gráfico 5. Registro del nivel de ruido y su consistencia en el tiempo, de un consumo (NO fuga)



En este caso, se ve que existe un ruido de fondo aleatorio y de bajo nivel, y que en un momento determinado se registra un ruido de alta intensidad que transcurrido un tiempo vuelve a desaparecer. Este ruido no puede corresponderse con una fuga, pues estas no se caracterizan por aparecer y desaparecer a lo largo del tiempo. Concluimos por ello que se trata de un consumo.

Ya en el "Documento Guía para el Control del Agua No Registrada" publicado por AEAS en el año 2003, se afirmaba:

> *"La indicación de existencia de fuga obtenida mediante este sistema es muy segura, pudiéndose incluso detectar fugas de escasa entidad. Por otra parte, si el sistema de registradores no detecta ninguna fuga, se puede tener una gran confianza y seguridad, obviándose en este caso la búsqueda con geófonos o correladores.*
>
> *El trabajo de correladores y geófonos se dirige directa y exclusivamente a aquellos tramos en los que los sistemas de prelocalización han determinado la existencia de fuga. De esta manera se reduce notablemente la distancia a inspeccionar y el nivel de acierto en la inspección es muy elevado, …"*

Los primeros sistemas eran programados e interrogados manualmente, siendo el operador a quien correspondía determinar la existencia o no de una fuga tras analizar los datos suministrados por cada registrador. A medida que el uso de estos dispositivos se extendía de manera exponencial en los servicios de abastecimiento de agua en todo el mundo, se hizo evidente la necesidad de implementar sistemas automáticos de tratamiento y análisis de los datos medidos y que informasen directamente al operador sobre la presencia o ausencia de fuga sin necesidad de intervención humana. Pero sin perder la posibilidad de suministrar a demanda todos los datos medidos para que el operador pueda re-

alizar una analítica avanzada. Esto permitiría inspeccionar grandes longitudes de red de forma rápida y a bajo coste, teniendo capacidad incluso de detectar aquellas fugas "difíciles".

Atendiendo a esta demanda, a principios del presente siglo se presentan los primeros registradores acústicos dotados de "inteligencia" para determinar por sí mismos si existe o no existe fuga, y equipados con una radio para informar del resultado a distancia.

El operador, equipado con una unidad de recepción de señales de radio, con tan solo aproximarse a unos 50 metros de distancia del punto donde se encuentra el sensor, recibe directamente en su pantalla la información por este transmitida, incluyendo la indicación Fuga o No Fuga.



Foto 9. Registrador acústico con "inteligencia" propia y transmisión radio de datos



Foto 10. Operador en patrulla recibiendo por radio la información transmitida por los registradores

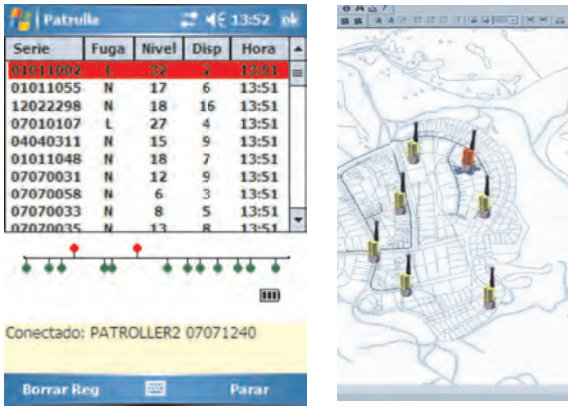


Figura 20. Pantalla del receptor donde se visualiza el estado Fuga o No Fuga en que se encuentra cada uno de los registradores acústicos

Esto supuso un gran salto cualitativo en la implementación de estrategias activas de control de fugas por las compañías gestoras. El coste unitario de los registradores acústicos se redujo de manera muy sensible a la vez que el volumen de equipos empleados crecía.

Pero la evolución tecnológica no se detuvo en ese punto. Y así es que hoy en día podemos encontrar equipos que se caracterizan por:

- Extremada sencillez de uso y manejo; no es necesario ni configurarlos. Siempre están listos para ser usados.
- Prestaciones y Eficiencia independientemente de las condiciones de la red en que se instalen y de las interpretaciones del personal que lo maneje.

- Robustez y bajo coste de mantenimiento; Los registradores pueden estar sumergidos en agua (estanqueidad IP68) sin que ello represente ningún riesgo para el equipo, y cuentan con diseños que protegen las partes más sensibles tales como los sensores.
- Larga vida de los equipos, con pilas intercambiables no recargables con autonomía superior a los 5 años manteniendo el registrador en funcionamiento las 24 horas del día y todos los días del año.

Con todas estas cualidades mencionadas anteriormente, los registradores acústicos son empleados de diversas formas dependiendo de la metodología de control de fugas a implementar:

Uso móvil con recogida manual de datos

Consiste en un parque de registradores acústicos que de forma itinerante se van instalando en diferentes zonas de la red a controlar. El tiempo que los equipos estarán instalados en una determinada zona, puede variar desde un día hasta varias semanas.



Foto 11. Operador realizando una patrulla desde un vehículo

Para la recogida de datos, se realiza una patrulla, a pie o en algún vehículo recorriendo el trayecto donde se encuentran instalados los registradores acústicos, con el dispositivo receptor de las señales radio emitidas por los registradores acústicos. A partir de ese momento, el operador ya dispone de la información sobre la posible existencia o no de fugas en los tramos de red patrullados, e incluso su posible ubicación sobre plano. Ya se puede planificar y dirigir a los equipos de localización.

Durante el tiempo que los equipos están instalados, la frecuencia de recogida de datos puede ser diaria o pueden transcurrir varios días entre patrulla y patrulla. Es un compromiso entre reducir la vida de una fuga desde su aparición hasta su detección y prelocalización, y el coste en horas de trabajo para obtener dicha información.

Uso permanente con transmisión remota de datos

Hay determinadas zonas de la red que pueden requerir una instalación permanente de los registradores acústicos. Algunos factores determinantes para la elección de este tipo de implementación son:

- Zonas con un ratio elevado de aparición de roturas
- Zonas de difícil supervisión tales como centros urbanos o vías de transporte principales

- Zonas sensibles a la aparición de fugas (alto coste del agua, peligro de socavones y daños a cimentaciones por tipo de suelos, etc.)
- Zonas con poco margen en las presiones disponibles
- Zonas fuera de la cobertura de la sectorización

La recogida de datos podría realizarse con patrullas diarias o con otra frecuencia, teniendo en cuenta el coste en horas de trabajo.

Los modernos avances en las tecnologías de telecomunicaciones nos ofrecen la posibilidad de disponer de la información que suministran los registradores acústicos, de forma remota y automática en un centro de control, y todo ello a unos costes tanto en la inversión como en la explotación del sistema, muy moderados.

Y en los equipos más avanzados, encontramos funcionalidades tales como:

- Transmisión de datos por GPRS, incorporando así los avances tecnológicos y bajo coste de explotación por el uso de las telecomunicaciones. De este modo, no se hace necesario dedicar horas de trabajo en campo para la recogida de la información, que se encontrará diariamente disponible en los servidores informáticos de la compañía, aprovechando toda la infraestructura de telecomunicaciones de los diferentes operadores así como los servicios de Internet.
- La posibilidad de integrarlos en redes de comunicación por radio, aprovechando de este modo infraestructuras existentes como por ejemplo redes de telelectura de contadores.



Foto 12. Registrador acústico con transmisión de datos GPRS hasta un puesto central



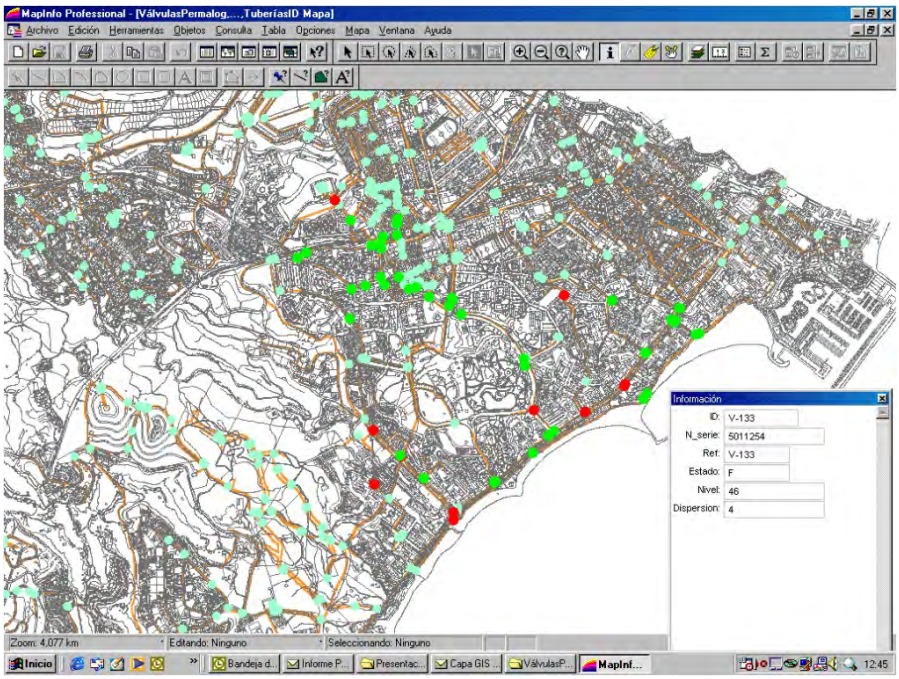
Figura 21. Algunos fabricantes de registradores acústicos han adaptado sus protocolos para integrar sus dispositivos en las redes de telelectura de contadores

- Posicionamiento GPS que ayuda en la operación de los equipos así como en sus posibilidades de interface con Sistemas de Información Geográfica y aplicaciones SCADA. La combinación de los datos de caudales y presiones de la sectorización con los datos de ruido en cada punto

del sector monitorizado, arrojan una información de gran calidad y utilidad de cara a priorizar y optimizar las consecuentes actuaciones de localización y reparación.

– Sensores ultra sensitivos con capacidades de muestreo de hasta 1 kHz, grandes capacidades de almacenamiento y de análisis de datos, para poder estudiar situaciones complejas. Disponer del historial de cada punto de medición, con la información diaria de cómo evolucionan los perfiles acústicos medidos, además de ser de inestimable ayuda para resolver favorablemente situaciones de las denominadas "roturas difícilmente detectables", es una gran base de datos que posibilita el desarrollo de herramientas predictivas, un área de trabajo sobre la que actualmente se están realizando grandes avances.

Figura 23. Pantalla de SCADA que combina datos de la sectorización con datos de la vigilancia acústica permanente



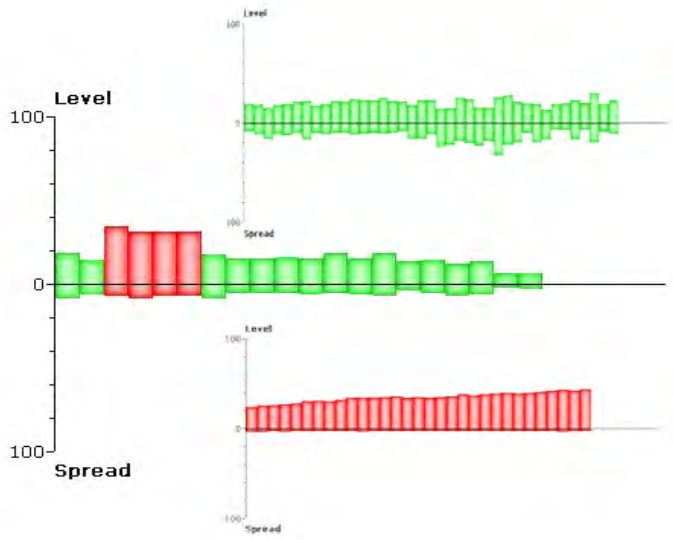
A modo de conclusión se puede afirmar que el estado del arte de la tecnología nos brinda herramientas que posibilitan la detección de una fuga el mismo día en que esta se produce, incluso fijando su ubicación aproximada.

La implantación de los registradores acústicos con transmisión remota de datos en las redes de agua permite disponer de una alarma inmediata en las oficinas cuando una fuga aparece, indicando además en que tramo de la tubería se encuentra.

La optimización de los procesos de localización y reparación de fugas, es evidente gracias al empleo de los registradores acústicos. Pero además reduce la vida de las fugas potencialmente a mínimos de un día, inimaginable hasta hace muy pocas fechas, con el consiguiente ahorro en volúmenes de pérdidas, así como en los costes derivados por indemnizaciones a usuarios o daños en infraestructuras que ya no se producen al acortar la vida de las fugas.

En el gráfico 6 se muestra la evolución del perfil acústico en el tiempo en tres puntos diferentes de la red, momento de aparición de la fuga, duración y comportamiento, gracias al tratamiento de la información que ofrecen los registradores.

Gráfico 6. Evolución del perfil acústico



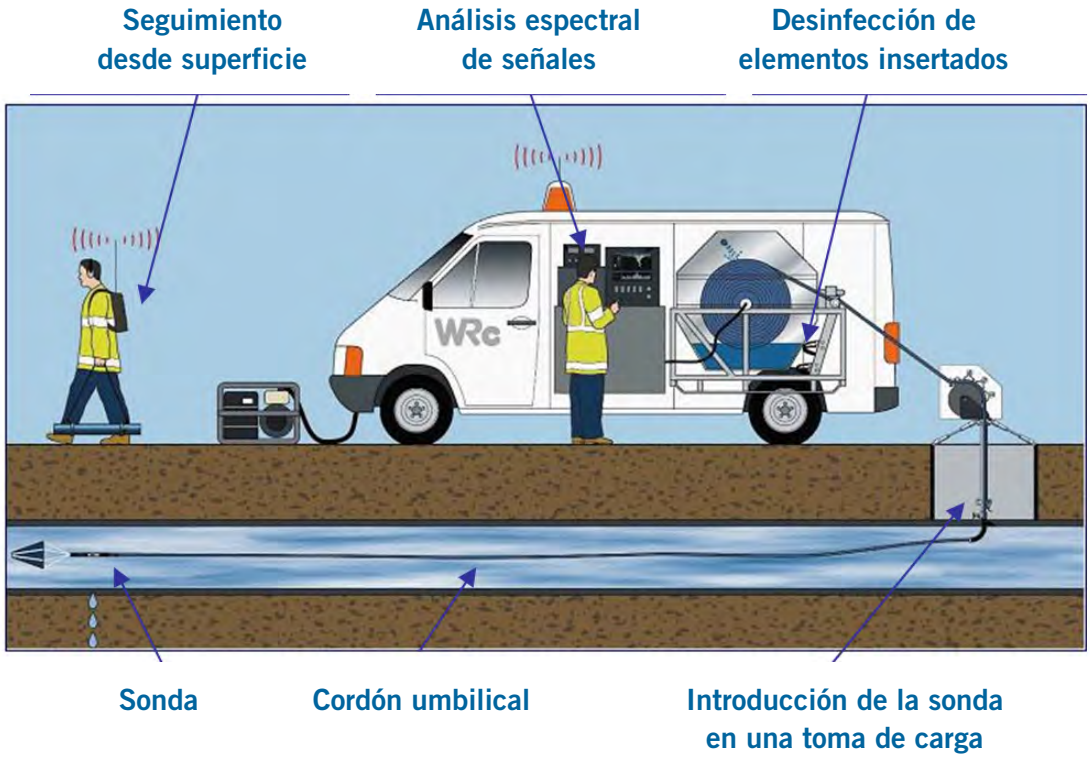
Por lo tanto ya no es una utopía afirmar que las fugas pueden estar bajo control permanente. La aparición de los registradores acústicos con transmisión remota de datos permite modificar estrategias tradicionales de control activo de fugas.

La evolución tecnológica no se detiene, y la información que proporcionan los registradores acústicos abre un apasionante camino hacia los modelos predictivos que incorporen el perfil acústico de puntos de la red como una variable más a estudiar.

3.4.3.2.4. Otros sistemas de detección en grandes conducciones

En el caso de las redes de transporte y, en general, en conducciones de gran diámetro, las técnicas de detección de fugas basadas en correlación no ofrecen resultados satisfactorios por dos razones: por

Figura 24. Esquema de funcionamiento Sistema Sahara



no disponer de elementos suficientemente próximos en los cuales adosar los correladores y por la dispersión del ruido de fuga que se produce en tuberías de gran diámetro, lo que dificulta su detección con dichos correladores.

Para estos casos, las técnicas basadas en la inserción en las conducciones de hidrófonos que detectan el ruido de las fugas desde el interior de las mismas, se están demostrando como las más eficientes en la búsqueda de fugas en las redes de transporte.

Entre este tipo de técnicas, las más evolucionadas son el Sistema Sahara® y el Sistema Smartball®.
Sistema Sahara

El Sistema Sahara® permite la detección y localización de fugas de agua en conducciones de gran diámetro. El sistema está formado por una sonda que contiene un sensor de sonido, unida a un cordón umbilical, por el que se transmiten las señales. Esta sonda se introduce en la tubería a presión por cualquier toma (a partir de 50 mm) y viaja con el agua, detectando las fugas, no siendo necesaria la interrupción del servicio en ningún momento de la inspección.

La detección se realiza mediante las señales acústicas obtenidas por el sensor que viaja a lo largo de la tubería movido por el propio flujo del agua. Un análisis espectral de las señales que se efectúa en tiempo real en el vehículo de apoyo permite confirmar la detección efectuada por el operador.

Con objeto de obtener una mayor precisión en la localización, la sonda dispone además de un dispositivo que permite su seguimiento por la superficie.

Para asegurar que la calidad del agua se mantiene, mientras se están efectuando los trabajos de detección y localización de fugas, tanto la sonda como el cordón umbilical son desinfectados previamente a su introducción en la tubería.

La longitud máxima que se puede inspeccionar de cada vez está limitada por la longitud del cable y es de 2 Km La longitud real alcanzable en cada inspección depende de la velocidad del agua en la conducción y del rozamiento del cable con los codos existentes en el tramo a inspeccionar.

La fiabilidad del sistema es muy elevada, ya que la inspección acústica se realiza desde el interior de la tubería sin ningún tipo de perturbación exterior y además, la posibilidad de detener el cable y escuchar repetidas veces el ruido detectado, permite su análisis y confirmación de que se debe a una fuga.

El sistema fue desarrollado en Inglaterra por WRc (Water Research Center) en 1998, habiéndose inspeccionado hasta la fecha cerca de 2.000 km de tuberías a nivel mundial.

Tecnología SmartBall

El sistema Smartball® consiste en la inserción en el interior de las conducciones en servicio de una bola de gomaespuma que contiene en su interior una esfera de aluminio con la tecnología precisa para la captación y tratamiento del ruido detectado La bola es finalmente recuperada mediante una red que es introducida con una varilla a través de una toma en carga en el punto considerado como final de la inspección.

El sistema se puede utilizar en conducciones de cualquier material, a partir de 300 mm de diámetro, con un alcance de varios kilómetros desde el punto de introducción.

El tamaño de la bola con la que se realiza la inspección depende del diámetro de la tubería, la existencia de válvulas en el tramo a inspeccionar, el diámetro de las tomas empleadas para la inserción y la recuperación y el diámetro de los desagües presentes en el tramo. El tamaño mínimo corresponde al de la esfera de aluminio (250 mm).

La metodología empleada en la detección y localización de las fugas se basa, como en el caso del sistema Sahara®, en la grabación del ruido en el interior de la tubería según avanza la bola en la conducción. El posterior análisis en oficina mediante un programa informático de los espectros de ruido grabados, permite determinar cuáles son debidos a fugas y su ubicación.

Figura 25. Esquema de funcionamiento SmartBall



3.4.4. Otras Tecnologías

Se han desarrollado otras tecnologías complementarias a los métodos acústicos descritos en apartados anteriores.

3.4.4.1. Detección por termografía infrarroja

Estos equipos consisten en un escaneado termográfico que refleja la temperatura superficial del terreno sobre el que se asienta la tubería que deseamos inspeccionar. Esta temperatura depende de la composición del subsuelo y de las condiciones superficiales y atmosféricas.

El sistema se basa en el principio de conservación de la energía según el cual siempre habrá un flujo energético desde las zonas más calientes hacia las más frías. Las imágenes visualizadas indican con diferentes colores los puntos más fríos y los más calientes sobre la traza del terreno.

En verano el agua es más fría que la superficie del suelo, por tanto el calor es transferido desde la superficie del suelo hacia la zona fría de cota más baja. En cambio en invierno el agus fugada tiene una temperatura mayor, con lo que la imagen termográfica presentará una mancha caliente como resultado de la transferencia de calor hacia la superficie del suelo.

La aplicación de esta metodología queda reducida a zonas rurales con gran longitud de tubería por zonas no pavimentadas o bien para tuberías de transporte.

3.4.4.2. Georadar

El fundamento de la tecnología RADAR (Radio Detection And Ranging) se basa en la transmisión de energía electromagnética (usualmente pulsos) y la detección de una pequeña parte de esta energía reflejada en los blancos a detectar. El retardo entre los pulsos emitidos y la energía detectada, contiene información sobre la proximidad y el tamaño del objeto.

El georadar transmite pequeños pulsos de energía electromagnética hacia el medio a estudiar mediante una antena transmisora. Si existe una discontinuidad en el medio, parte de la energía de los pulsos se transmite y parte se refleja.

En el caso de detección de fugas, la antena del georadar se puede desplazar para obtener imágenes del subsuelo (radargramas) en la vertical de su desplazamiento y también combinar estas imágenes para recrear una visualización 3D del subsuelo.

Aunque estos equipos se han venido utilizando más para detectar el trazado de tuberías que para la detección de fugas, el análisis de los radargramas y otras técnicas complementarias permitirían comprobar la existencia de posibles anomalías en el subsuelo y saber si se trata o no de una fuga.

Se trata de un método eficaz en terrenos compactos y secos, presentando dificultades de aplicación en terrenos húmedos o poco compactos o con las conducciones a cierta profundidad.

Actualmente existen varios proyectos cofinanciados por la Unión Europea para poder desarrollar equipos de georadar que permitan avances en las aplicaciones a la detección de fugas.

3.4.4.3. Conductividad geoeléctrica

Este método identifica áreas de humedad del suelo utilizando el principio de intercambio de conductividad con el contenido de humedad del suelo. La conductividad se monitoriza vía una serie de sensores insertados en el suelo. Se aplica una pequeña corriente y se graba la conductividad diferencial del suelo. La lectura más alta en el gráfico indica la posición de la humedad máxima, que coincide con la fuga.

Esta tecnología de localización de fugas continúa en un estado de desarrollo muy temprano.

3.4.4.4. Detección por inyección de gases trazadores

El método consiste en inyectar en la tubería un gas trazador y, mediante un detector de este gas, localizar la existencia de fugas por escapes de este gas de las tuberías, a través del terreno.

La inyección del gas trazador se realiza a través de una toma en carga, mediante un dispositivo específico de inyección mediante tubos microporosos. Eventualmente se podría realizar a través de un hidrante. El gas es inocuo, inodoro, sin sabor y fácilmente detectable en pequeñas cantidades, utilizándose gases ligeros como el helio o el hidrógeno.

Este método es válido para conducciones de cualquier diámetro y material.

Es necesario conocer la dirección del flujo de agua y el gas se debe aplicar sobre el tramo donde se tengan indicios de posibles fugas. La tubería puede estar vacía o llena de agua, aunque en este último caso la cantidad de gas necesario para encontrar la fuga es menor. También es conveniente aislar lo más posible el tramo a analizar cerrando válvulas para evitar que el agua con el gas se diluya o sea alejado de la tubería que se pretende estudiar.

En esta técnica no influye el tipo de material de la tubería, aunque sí hay que tener en cuenta los siguientes condicionantes para determinar correctamente el campo de aplicación del sistema:

- El helio es una gas inerte que está autorizado por Sanidad para interactuar con el ser humano (se usa en la mezcla con oxígeno para las bombonas de los submarinistas de gran profundidad) y por tanto la inyección se puede realizar en régimen de explotación normal.
- El helio se transporta en bombonas de 50 l. presurizadas a 200 bares (9 m3 a presión atmosférica) por lo que no habría problemas para inyectarlo en carga sobre cualquier tubería de abastecimiento. Sin embargo la máquina estándar que regula la inyección de helio está diseñada para funcionar con un máximo de 9 atm, por lo que para optimizar la eficiencia de la máquina se hace aconsejable que la inyección se haga contra una presión máxima de 6 bares.
- La inyección de helio debe estar en una proporción entre el 0,5% y el 1% del caudal que circula por la tubería.
- La inyección del helio se realiza mediante una caña difusora microporosa y rígida que tiene una longitud igual al diámetro de la tubería. Por lo tanto se debe disponer de un espacio de entre 1,5 a 2 veces el diámetro de la tubería para poder introducirla.
- Para garantizar una correcta difusión del helio en el agua (se debe evitar que se formen burbujas de helio en el agua) se hace necesario realizar la inyección en un punto alejado entre 200 y 300 metros aguas arriba del punto en el que sospechamos que pueda situarse la fuga.
- Se debe evitar puntos en los cuales se pueda escapar el helio antes de llegar a la fuga (ventosas automáticas, depósitos intermedios, ...). Si la tubería está instalada en pendiente también deberemos comprobar la no existencia de este tipo de puntos aguas arriba del punto de inyección.
- Para realizar la detección se debe esperar 24 horas para que el agua con el gas llegue a la fuga y el gas se difunda por el terreno. Se puede realizar la detección hasta 3 o 4 días después de la inyección.

– Para realizar la detección en terreno poco poroso (asfalto, hormigón, panot hidráulico, ...) se hace necesario practicar unos orificios en el terreno que tengan una profundidad suficiente como para traspasar la capa impermeable de asfalto y hormigón, habitualmente menos de 40 cm (diámetro de 6 mm aprox.) cada 3m lineales sobre la perpendicular de la tubería. Es necesario conocer con precisión el trazado de la tubería ya que la detección sólo es efectiva en una franja de 2 a 3 m de ancho por encima de la misma.

3.4.4.5. Utilización de modelos matemáticos para la detección de fugas

El uso de modelos matemáticos facilita la explotación de sistemas de abastecimiento tanto en la planificación de las inversiones de renovación y/o ampliación de las redes como en su operación y mantenimiento.

En el primer caso, mediante los modelos matemáticos se pueden realizar simulaciones en diferentes escenarios de suministro y consumo de agua, de tal forma que se puedan optimizar las inversiones garantizando las condiciones de funcionamiento de las redes.

Con relación a la explotación de los sistemas de abastecimiento, las aportaciones de los modelos matemáticos son las siguientes:

– Permiten realizar simulaciones dinámicas de funcionamiento del sistema en diferentes situaciones, permitiendo, por ejemplo, verificar la capacidad de regulación de los depósitos, optimizar el funcionamiento de los bombeos o detectar zonas de la red con velocidades o presiones inadecuadas.
– Permiten evaluar el comportamiento de la red desde el punto de vista de la calidad del agua, aportando información por ejemplo sobre tiempos de permanencia del agua, concentración de cloro o procedencia del agua en cualquier punto de la red.
– Facilitan el diseño de la sectorización de las redes, así como las mejores estrategias de regulación de presión en los sectores.
– Facilitan la detección de fugas de agua.

En el contexto del presente trabajo, se desarrolla a continuación la aplicación de los modelos matemáticos para la detección de fugas de agua en las redes.

Modelización de las fugas de una red

La utilización de los modelos matemáticos puede ayudar a detectar y ubicar de forma aproximada las fugas en las redes de agua, aportando al mismo tiempo información sobre la magnitud de las mismas. Para ello, se debe disponer de un modelo matemático calibrado que refleje fielmente el comporta-

miento hidráulico de la red, así como de registros de caudal y presión en suficientes puntos de la red. De esta forma, mediante la comparación de los registros de presión y caudal reales con los resultados del modelo en simulaciones realizadas con condiciones equivalentes, en el caso de encontrarse desviaciones significativas en las presiones arrojadas por el modelo serán indicio de la existencia de "consumos" de agua en la red superiores a los esperados.

A partir de recalibraciones del modelo en cuanto a demandas asignadas a nodos ficticios de fuga se detectaría la existencia de la fuga, su ubicación aproximada y la cantidad de agua que se estaría perdiendo por la misma.

El periodo más adecuado para aplicar la técnica son las horas nocturnas, ya que, si no se ha implantado un sistema de regulación activa de presión, ésta alcanza valores superiores, y el caudal perdido por las fugas es mayor que en horas diurnas y su relación con el consumo real también es superior. De esta forma, la pérdida de carga en los tramos afectados por la fuga es mayor y, por tanto, la presión en la zona de la fuga inferior a la que existente sin fuga.

Una vez detectada la fuga por el modelo, su localización precisa se realizaría mediante la técnica de correlación aplicada sólo en la zona donde el modelo alerta de su existencia.

Esta metodología, aun teniendo en cuenta sus dificultades de aplicación, puede aportar ahorros importantes en la detección de las fugas y en el agua perdida por las mismas al reducir su tiempo de detección.

Se trata, por tanto, de una metodología similar al seguimiento del caudal mínimo nocturno aportado a un sector, con la diferencia que aporta información sobre la ubicación de la fuga dentro del sector. Con respecto a los condicionantes principales para su aplicación se pueden citar los siguientes:

- Disponer de una red organizada en sectores de tamaño no excesivamente grande en los que se registre el agua aportada y se disponga de forma continua de registros de presión en los puntos más representativos del sector.
- Conocer de la forma más precisa posible los consumos nocturnos de los abonados del sector.
- Disponer, considerando los dos aspectos anteriores, de un modelo matemático calibrado de la red.
- Disponer de una herramienta de modelización de redes que permita la autocalibración del modelo realizando, de forma automática, diferentes simulaciones en función de donde se ubique la fuga, para obtener valores de presiones similares a los medidos. Para ello, en el modelo se habrán creado nodos específicos con consumo sólo de fuga que será con los que realice la simulación el modelo en el proceso de autocalibración.
- Finalmente, para que la fuga pueda dar lugar a variaciones de presión detectables, tiene que ser de cierta magnitud, de tal forma, que su aparición dé lugar a pérdidas de carga significativas en las conducciones.

3.4.4.6. Cierre secuencial de válvulas o step testing

El cierre secuencial de válvulas dentro de un sector es una metodología basada en la medición de caudales en horario nocturno (coincidiendo con las horas de menor consumo) en tramos concretos de un sector o secciones de este, para cuantificar los caudales de pérdida en esos tramos o secciones del sector.

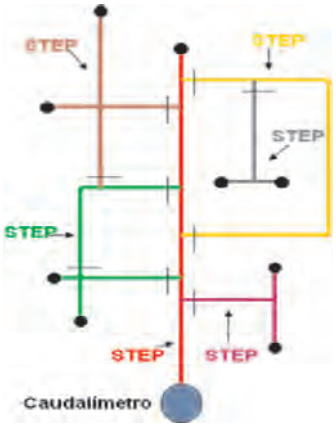


Figura 26. División de un sector en diversos tramos o secciones más pequeñas que se aislarán de forma secuencial

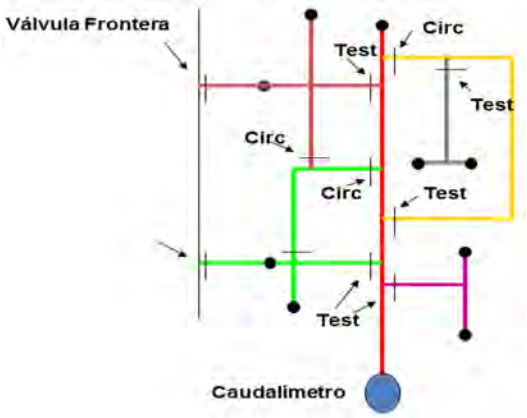


Figura 27. Etiqueta de cada una de las válvulas a manipular durante la prueba

El nombre de "Cierre Secuencial" proviene del inglés "Step Testing", que deriva de la forma en la que se realiza la prueba. La red del sector se divide en tramos o secciones pequeñas. El caudal de entrada al sector se monitoriza de forma continua. Cada uno de los tramos o secciones se cierra por turnos (STEPS o Secuencial) obteniendo un nuevo valor de caudal que por diferencia arroja el caudal de cada secuencia (de cada tramo o sección).

Para llevar a cabo la prueba, se han de considerar 3 categorías de válvulas:

- Válvula de frontera: Son las que están permanentemente cerradas, y aíslan el sector completamente de los sectores colindantes.
- Válvula de circulación: Estas válvulas se cierran únicamente durante el tiempo de duración de las pruebas, y se hace para romper las mallas y dejar un único paso de agua a cada tramo o sección a medir. Estas válvulas vuelven a reabrirse al finalizar la prueba y restablecer el mallado de red previo a la prueba.
- Válvula de test: Son las válvulas de entrada a cada tramo o sección, que una vez cerradas dejan sin agua al tramo o sección correspondiente. Por ello son las válvulas más críticas, pues dejan

temporalmente sin servicio una parte de la red. De forma inmediata producen una disminución en el caudal monitorizado, que se corresponde al caudal que circula por el tramo o sección en cuestión. Según las herramientas empleadas durante la prueba, el cierre de estas válvulas se habrá de mantener durante un largo intervalo de tiempo, lo cual no es muy aconsejable, o por el contrario durante tan solo unos pocos segundos, lo suficiente para cuantificar la caída de caudal monitorizada en el caudalímetro de entrada al sector. Esta caída de caudal se puede realizar escalonadamente cerrando todos los tramos o secciones para luego volver a abrirlos (gráfico 7), o cerrando cada válvula de test por un periodo muy corto de tiempo y abriendo antes de manipular la siguiente válvula (gráfico 8), evitando el vacío del tramo o sección y reduciendo el tiempo de la prueba.

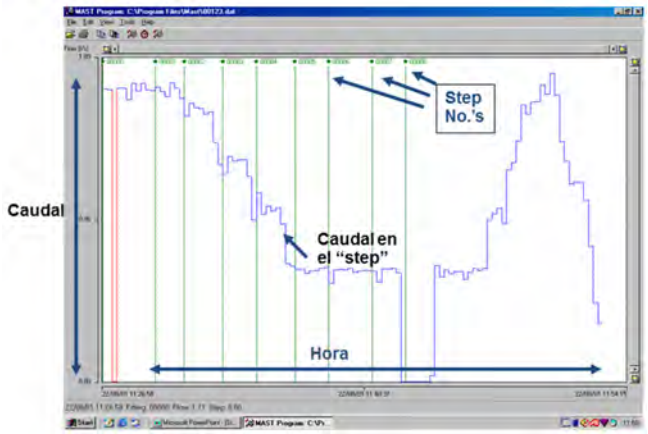


Gráfico 7. Apertura escalonada de cada válvula y posterior cierre

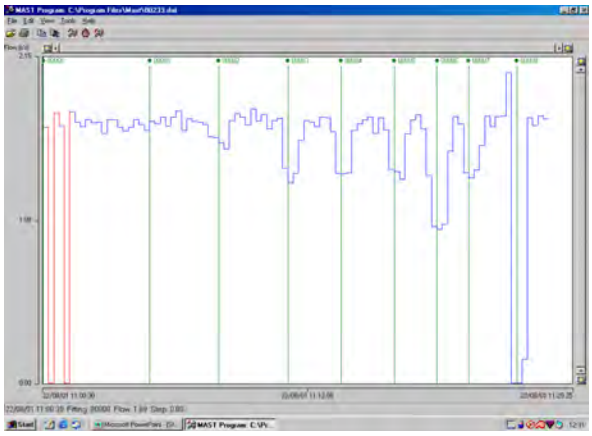


Gráfico 8. Apertura y cierre de cada válvula por separado

Para que el cierre secuencial se pueda emplear de manera efectiva, se han de dar una serie de condiciones previas:

- Que exista una sectorización previa en la que se haya comprobado que en horario nocturno, se puede alimentar el sector a través de una única entrada en la que se mide el caudal.
- Que el sector se encuentre perfectamente delimitado por sus válvulas fronteras, con la seguridad de que no existen conexiones no controladas con otros sectores.
- Que las válvulas a manipular durante la aplicación del método se encuentren en buen estado para garantizar el cierre completo.
- Que el caudalímetro o contador empleado a la entrada del sector tenga la sensibilidad necesaria para suministrar información de caudales instantáneos.

La utilización de este método para cuantificar caudales de fuga por tramos, estuvo muy restringida durante mucho tiempo debido a que no se daban las condiciones necesarias para llevar a cabo la prueba (bien porque no existía sector, o bien porque las válvulas se encontraban en mal estado, etc.). Hoy en día estos no son factores limitantes, pues pocos son los abastecimientos donde no se cumplen las condiciones necesarias.



Foto 13. Unidad de transmisión de datos por radio, a conectar directamente al caudalímetro de entrada al sector

Por otro lado, en muchos casos la prueba se llevaba a cabo con dos personas en comunicación permanente, una situada junto al caudalímetro y la otra manipulando las válvulas. Cuando se cerraba una válvula de test, se comunicaban entre sí para determinar la caída de caudal provocada. Era costoso y además no quedaban bien registrados los resultados de la prueba, por lo que las incertidumbres eran continuas y esto conllevaba que en muchos casos hubiese que repetir la prueba.

En muchos casos la prueba se ha realizado empleando un registrador de datos de caudal conectado al caudalímetro. El operador va manipulando las válvulas siguiendo un orden previamente planificado, pero sin visualizar en tiempo real las fluctuaciones de caudal que cada válvula provoca. Posteriormente correlaciona sus apuntes de las horas de manipulación de cada válvula, con la gráfica de caudal registrada. En este caso también existe mucho margen a las incertidumbres, con lo que la necesidad de repetir la prueba suele darse muy habitualmente.



Foto 14. Unidad receptora vía radio con registrador de los valores de caudal recibidos, teclado para introducir el dato de la válvula manipulada, y pantalla para visualización en tiempo real del caudal instantáneo

Hoy en día existe tecnología para transmitir los datos del caudalímetro en tiempo real hasta un dispositivo que lleva consigo el operador, y en cuya pantalla está visualizando en tiempo real las fluctuaciones de caudal. Dicho unidad receptora registra los valores de caudal así como los datos de manipulación de válvula introducidos por el operador. Toda la información está perfectamente correlacionada y documentada, el operador está viendo en todo momento como sus manipulaciones hacen fluctuar el caudal, y la toma de decisiones es en tiempo real por lo que se optimiza considerablemente el proceso.

3.4.5. Elección de la metodología más adecuada

La tabla siguiente recoge una orientación para la elección de la tecnología más adecuada para la detección de fugas en función de parámetros tales como el tamaño de la red, el estado de sectorización de la misma, su rendimiento, etc.

Obviamente, la aplicación de unas u otras tecnologías deberá tener en cuenta otros condicionantes técnicos y económicos particulares de cada caso.

Tabla 4. Adecuación de las tecnologías a la detección de fugas

Tipo de red		Geófono	Correlador	Control acústico permanente	Prelocalizador + Correlación	Correlador Multipunto	Gas trazador	Sahara/ Smartball
Red microsectorizada Control en tiempo real Conocido el Qmin, noct	Sectores rdto. alto		X				X	
	Sectores rdto. bajo			X	X			
Red extensa / Rendimiento bajo				X	X			
Conducciones de plástico con baja presión		X	X			X	X	
Red Arterial o Transporte						X	X	X
Redes en zonas de difícil revisión					X		X	
Zonas sensibles a la aparición de fugas					X			
Zonas con poco margen en la presión disponible					X			

4

PÉRDIDAS APARENTES

4.1. INTRODUCCIÓN

Según el balance hídrico propuesto tanto por la IWA (Internacional Water Association) como por el grupo de trabajo Control del Agua No Registrada de AEAS se contemplan 2 tipos de pérdidas aparentes bien diferenciadas:

- Consumo no autorizado o fraudes:
- Imprecisiones en la medida: Generalmente se trata de subcontajes aunque en algunos casos se pueden dar también sobrecontajes, aunque éstos últimos son menos frecuentes.

A continuación se caracterizan cada uno de los 2 tipos de pérdidas aparentes anteriormente expuestas, identificando cómo se producen así como los métodos para poder cuantificarlas y reducirlas.

4.2. CONSUMO NO AUTORIZADO

Es todo aquel consumo de agua potable que se ha producido sin el consentimiento de la empresa abastecedora. El consumo no autorizado de agua potable está tipificado como un delito de defraudación de fluidos (Artículo 255 del Código Penal) siempre que el valor económico de dicha defraudación sea superior a 400 €.

A nivel práctico, para las empresas abastecedoras resulta compleja la cuantificación del volumen total en concepto de consumo no autorizado o fraudes.

4.2.1. Tipos de fraude

Existen básicamente 2 tipos de fraudes:

- Manipulación fraudulenta de los equipos de medida
- Sustracción fraudulenta de volúmenes de agua de la red.

La manipulación fraudulenta de los equipos de medida se realiza de diversas formas y siempre se persigue un subcontaje del volumen de agua suministrado e incluso la total inutilización del elemento de medida. Algunas de las formas más utilizadas en la manipulación de los contadores son:

- Introducción de elementos extraños en la cámara de medición para impedir el movimiento de la turbina o émbolo.
- Colocación de imanes para desacoplar la turbina de los engranajes.
- Introducción de elementos como agujas o alambres para conseguir el bloqueo de los engranajes.
- Rotura de los totalizadores en los puntos adecuados.
- Invertir el sentido de colocación del contador (en aquellos cuyo diámetro de entrada es igual al de salida) para que el totalizador descuente.
- Retirada del contador temporalmente y sustitución del mismo por un tubo.
- Consumo intencionado a caudales bajos a fin de situarse por debajo del caudal de arranque del contador.
- En el caso de caudalímetros en alta, la modificación de parámetros de configuración para conseguir subcontajes.

La sustracción fraudulenta de volúmenes de agua de la red se puede realizar mediante 2 formas:

- Mediante la realización de acometidas ilegales: Esta forma de fraude además de provocar pérdidas económicas puede provocar también alteraciones en la presión y el caudal al resto de usuarios, así como problemas en la calidad del agua. Este tipo de fraude es cometido principalmente por empresas. A título de ejemplo, durante el año 2008 la Guardia Civil detectó 99 acometidas ilegales en la comunidad de Madrid, siendo 73 de estas acometidas realizadas por empresas (gasolineras, constructoras, balnearios, etc…) por sólo 26 acometidas realizadas por particulares.
- Mediante la manipulación de elementos de la red como: Ventosas, descargas, hidrantes de bomberos, etc…

A continuación se exponen una serie de fotografías donde se recogen diversos fraudes detectados:

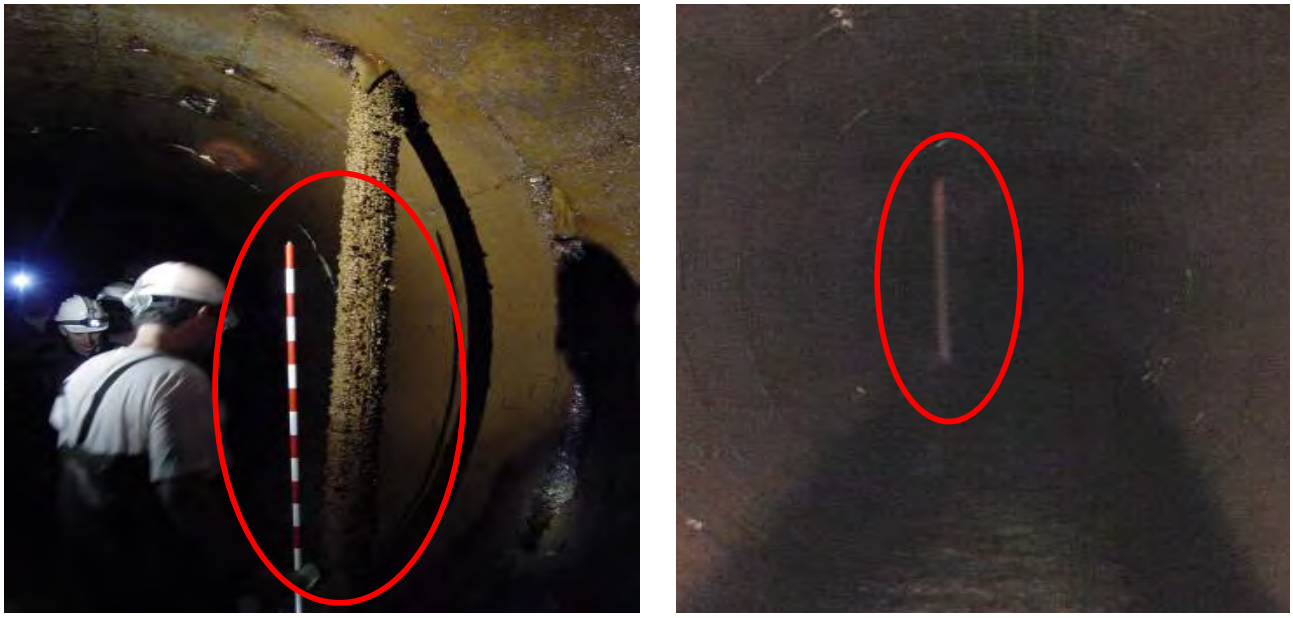


Foto 15. Perforación, con tubo metálico, realizada en una conducción de 3 metros de diámetro para el abastecimiento en alta de una gran ciudad española. Dentro del tubo metálico se alojaba una pequeña bomba sumergible que abastecía agua de forma ilegal a una empresa fabricante de perfiles metálicos

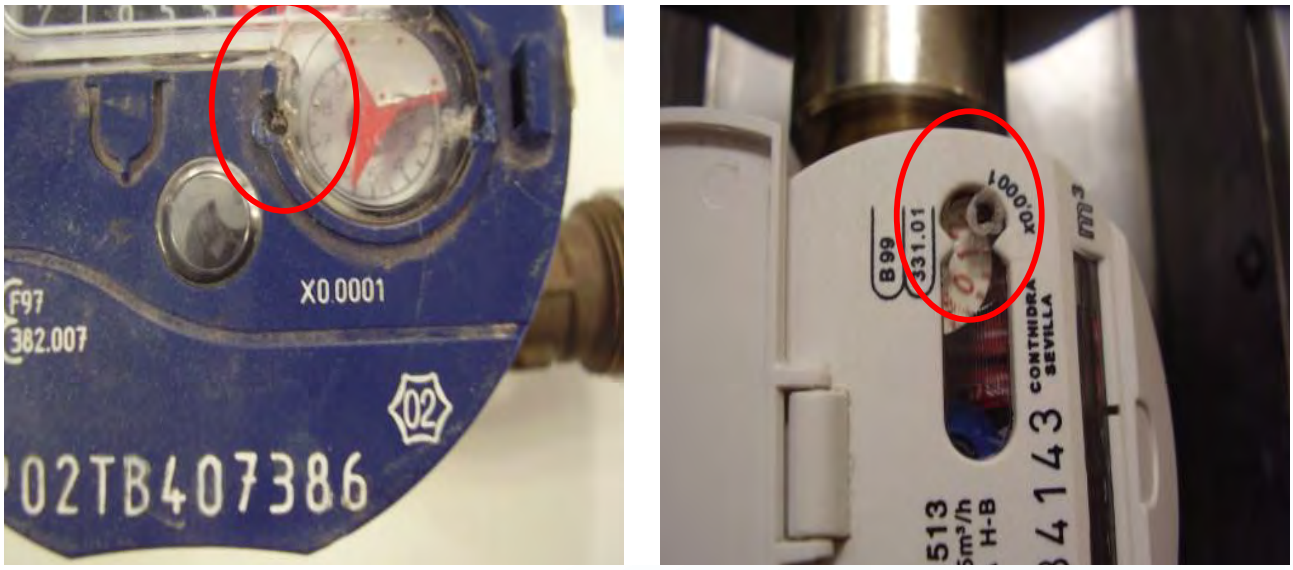


Foto 16. Un elemento bloquea los engranajes que impiden el giro del totalizador



Foto 17. Imágenes de un contador donde se inyectó un líquido corrosivo en el totalizador para inutilizarlo



Foto 18. Instalación de toma ilegal con válvula de bola aguas arriba del contador



Foto 19. Acometida ilegal detectada por agentes de SEPRONA (Guardia Civil)

4.2.2. Reducción del consumo no autorizado

Tanto la cuantificación como las acciones a realizar para detectar el consumo no autorizado son complejas, y en todo caso no aseguran la efectividad total. Para cuantificar el volumen del consumo no autorizado, será necesario conocer previamente el volumen total de pérdidas aparentes y el volumen de agua no registrado por imprecisiones en los equipos de medida, así pues por diferencia entre el primer y el segundo término (según balance hídrico) se obtendría el volumen de agua atribuible a fraudes. Esto lleva aparejada la dificultad que supone conocer "a priori" el volumen total de pérdidas aparentes.

Ni mediante búsqueda bibliográfica ni mediante consulta a empresas del sector se ha obtenido ningún método fiable de estimación directa del consumo no autorizado.

Con el fin de reducir el fraude algunas de las medidas aconsejadas son las siguientes:

- Instalación de contadores más robustos y con protección y/o detección de alteración magnética externa (precintos, materiales de construcción, sensores internos, etc.).
- Instalación de armarios o arquetas resistentes a actos vandálicos.
- Instalación de dispositivos para dificultar los fraudes en tomas de batería en baja (tornillos o tuercas con precinto y/o llaves especiales que dificulten su manipulación).
- Análisis de pautas de consumo, por lecturas más repetidas o con información extra (contadores electrónicos), apoyándose en telelectura y comparando con perfiles de consumo y contadores de control por zonas.
- Inspecciones orientadas en función de análisis de datos, fuera de periodos de lectura, y/o horarios comerciales.
- Desarrollo de normativa municipal que penalice el fraude en el consumo de agua.

4.3. IMPRECISIONES EQUIPOS DE MEDIDAS

4.3.1. Tecnologías de medición

Los contadores de agua pueden ser diseñados aplicando diferentes tecnologías de medición. Éstas se pueden clasificar en los siguientes grupos:

4.3.1.1. Contadores mecánicos de velocidad

En estos, la corriente de agua impacta con un elemento móvil "turbina", accionándola. El número de revoluciones está en función de la velocidad del agua que circula por el contador y, por tanto, del caudal.

Chorro único (de turbina vertical o axial)

En éstos, la corriente de agua impacta contra el elemento móvil por un solo punto. Existe de igual manera, un solo punto de salida.

Aplicaciones:

- Caudal nominal entre 0,6 y 2,5 m3/h: Contador divisionario (bloques de pisos) ó instalación individual (vivienda unifamiliar).
- Caudal nominal entre 3,5 y 25 m3/h: Contador de acometida a edificios medianos ó instalación individual de medianos consumidores.
- Caudal nominal entre 15 y 60 m3/h: Contador de acometida a grandes usuarios.

Chorro múltiple

En éstos, la corriente de agua impacta contra el elemento móvil a través de una cámara de distribución que provoca que la incidencia sea por más de un punto (múltiple). La salida de la misma cámara es también por más de un punto.

Aplicaciones:

- Caudal nominal entre 3,5 y 10 m3/h: Contador de acometida en edificios medianos ó instalación individual de medianos consumidores.

Woltmann

El paso del agua hace mover un elemento móvil, en general una hélice vertical u horizontal, mediante una única entrada y salida.

Aplicaciones:

- Contador para grandes consumidores, control de redes, depósitos, etc.

Proporcional

Contador de paso total, es decir, sin ningún elemento mecánico que interfiera directamente en el paso del agua, permitiendo la circulación por el interior del cuerpo de partículas sólidas (piedras, algas, etc.). Son apropiados para instalaciones de riego, en conducciones de agua procedentes de balsas, pantanos, canales, etc. También se utilizan en instalaciones contraincendios.

4.3.1.2. Contadores mecánicos de pistón rotativo o volumétrico

Un pistón se aloja dentro de una cámara de medida y a cada vuelta del pistón se libera un determinado volumen de agua. En general, son los contadores de mayor precisión de medida.

Aplicaciones:

- Caudal nominal entre 1 y 2,5 m3/h: Contador divisionario (bloques de pisos) ó instalación individual (vivienda unifamiliar).
- Caudal nominal entre 3,5 y 25 m3/h: Contador de acometida en edificios medianos ó instalación individual de medianos consumidores.

4.3.1.3. Contadores electrónicos

Introducen un sistema electrónico en la captación y/o transmisión de los datos de medida.
Se pueden clasificar en contadores:

Con totalizadores electrónicos

Combinan una parte mecánica (sensor hidráulico) y un totalizador electrónico.

Estáticos

Tanto el sensor hidráulico como el totalizador son electrónicos y no existe ninguna pieza móvil.

Tipos de contadores:

Contadores electromagnéticos

Basan su sistema de medida en la ley de inducción electromagnética de Faraday-Neuman en la que existe una relación entre la variación de un campo magnético y la velocidad de paso del fluido lo que lleva a poder determinar el caudal de paso.

Aplicaciones:

- Contador para medición de caudal en redes, depósitos e industrias.

Contadores ultrasónicos

Su sistema de medida es ultrasónico y su principio consiste en medir el tiempo que tarda una onda ultrasónica en recorrer una cierta longitud conocida. Este tiempo varía en función de la velocidad de paso del agua por el contador por lo que se puede llegar a determinar el caudal de paso.

Aplicaciones:

- Contador para medición de caudal en redes, depósitos e industrias.

En cualquiera de los instrumentos descritos anteriormente existe un error de registro, normalmente negativo, que se conoce como subcontaje. Otra posible clasificación de los contadores de agua mecánicos (de velocidad o de pistón rotativo) utilizada muy frecuentemente puede hacer referencia a qué componentes del contador están sumergidos en el agua. Los componentes implicados son:

- **Totalizador**: indica el volumen registrado de agua
- **Tren Reductor**: reduce el número de revoluciones de la turbina, transmitiendo el movimiento al totalizador
- **Turbina (o pistón)**: es el motor del contador y transmite la velocidad del agua al tren reductor

Por tanto su clasificación sería la siguiente:

- Húmedo

Tiene sumergido el tren reductor, el totalizador y la turbina. La transmisión del movimiento es mecánica.

- Semi-húmedo

Tiene sumergido el tren reductor y la turbina. El totalizador está aislado y sumergido en un líquido especial. La transmisión del movimiento es mecánica.

- Seco

Tiene sumergido el tren reductor y la turbina. El totalizador está en seco. La transmisión del movimiento es mecánica o magnética.

- Super-seco

Tiene sumergida la turbina. El totalizador y el tren reductor están en la zona seca. La transmisión del movimiento es magnética

4.3.2. Determinación del volumen de pérdidas aparentes

Los equipos de medida utilizados en la medición de volúmenes de agua son instrumentos que están sometidos a unos errores o imprecisiones en sus lecturas de acuerdo a los límites máximos que marca la normativa aplicable. Los fabricantes suministran las curvas de precisión (y por lo tanto también el error) de sus instrumentos en la documentación técnica. Estos errores siempre tendrán unos límites legales que no podrán ser sobrepasados. En el caso de los contadores de agua fría se establecen 3 clases metrológicas (A, B y C). Las especificaciones que deben cumplir cada una de las clases metrológicas están recogidas en la Orden del 28 de diciembre de 1988 (BOE nº 55, 06-03-89 según la directiva 75/33/CEE). Esta orden quedó derogada por el RD 889/2006 en el que se definen los contadores según un caudal permanente Q3 y un rango de medida R (que es la relación entre el caudal mínimo Q1 y el permanente Q3). Los nuevos contadores puestos en el mercado deben regirse según está nueva normativa. De todos modos, los contadores definidos según la Orden del 28 de diciembre

de 1988 pueden seguir siendo producidos hasta el año 2016 por lo que ambas definiciones pueden coexistir actualmente.

Por razones prácticas, en este documento se han utilizado ejemplos con contadores de clase A, B y C según la definición de la Orden del 28 de diciembre de 1988. Los mismos podrían haberse generado según el RD 889/2006.

Primeramente se mostrará un punto de indicadores para la imprecisión de los equipos de medida, para proseguir en los siguientes apartados con distintas formas de cuantificar la imprecisión de los equipos de medida.

4.3.2.1. Indicadores de imprecisión de equipos de medida

No existe en la bibliografía un indicador, definido como tal, para evaluar la imprecisión de un parque de contadores. No obstante, es comúnmente utilizado en el sector el llamado "subcontaje", definido como el porcentaje del volumen entregado a los usuarios que no es detectado por los contadores. Se habla de "subcontaje" debido a que lo usual es que el volumen medido sea siempre inferior al volumen entregado. Sería quizá más correcto hablar de error del parque de contadores, definido de la siguiente forma:

$$error\ del\ parque = \frac{volumen\ registrado}{volumen\ entregado} - 1$$

Siendo *Volumen Registrado* el volumen de agua medido por los contadores de los usuarios y *Volumen entregado* el volumen de agua que realmente ha entrado en la instalación de los usuarios.

El subcontaje corresponde a valores negativos del error, mientras que el sobrecontaje se correspondería a valores positivos del error.

En ocasiones se suele tratar este mismo concepto como "precisión", que simplemente es el complementario del anterior:

$$precisión = \frac{volumen\ registrado}{volumen\ entregado}$$

Ambos indicadores se utilizan indistintamente entre los profesionales y expertos del sector del agua.

La dificultad de utilización de estos indicadores viene dada porque no se conoce el volumen entregado de forma directa. Se mostrarán en este documento los métodos existentes para estimar el valor del error del parque.

Otra forma de enfocar la evaluación de las pérdidas aparentes por imprecisión de los equipos de medida es como un porcentaje del volumen de agua total de entrada al sistema.

$$\%\ pérdidas\ imprecisión = \frac{Volumen\ entregado\ no\ registrado}{Volumen\ entrada\ al\ sistema}\ x\ 100$$

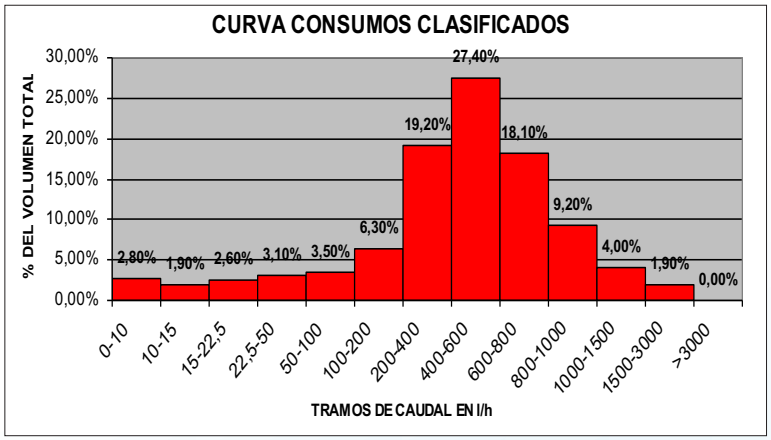
Siendo el *Volumen entregado* no registrado las pérdidas aparentes por imprecisión de los equipos de medida y el *Volumen de entrada al sistema* el volumen total de agua que se suministra al sistema, es decir, la entrada inicial del balance hídrico.

El *error del parque* (o la precisión) es habitual a la hora de evaluar el estado de los contadores, mientras que el porcentaje de *pérdidas por imprecisión* se suele utilizar en el contexto de estudio del balance hídrico de un abastecimiento.

4.3.2.2. Evaluación estadística del error de medición en contadores

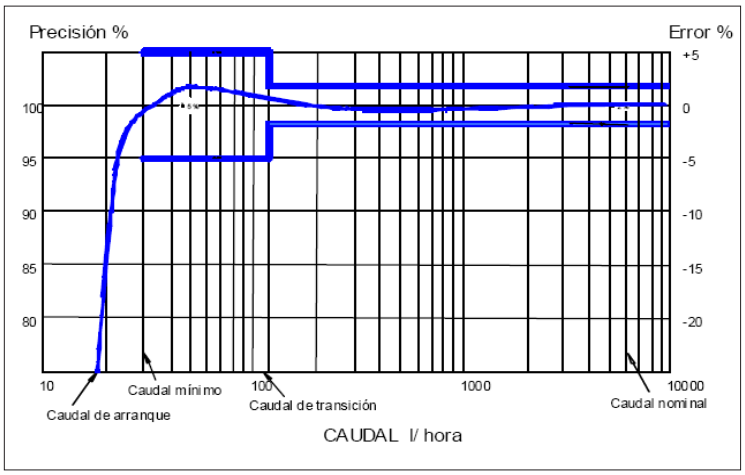
El método que seguidamente se expone para el cálculo del error de medición en un parque de contadores es relativamente sencillo. En cambio, lo que realmente complica la aplicación de dicho método es la obtención de datos fiables. El método se basa en calcular primero la pauta de consumos de la población abastecida (curva de consumos clasificados). A continuación se calcula la imprecisión de la medida de los contadores y se cruza con la curva de consumos clasificados previamente calculada. Para una mejor comprensión, pongamos un ejemplo: Supongamos que se quiere calcular los errores de medida de 1 sólo contador domiciliario de características: Clase metrológica B y caudal nominal Q_n= 1,5 m³/h. Además se conoce con total exactitud la curva de consumos clasificados del domicilio objeto del estudio. Dicha curva es la siguiente:

Gráfico 9. Curva de consumos



A continuación se expone la curva de precisión del contador de Q_n=1,5 m³/h y clase B:

Gráfico 10. Curva de precisión



Así pues para calcular la imprecisión de la medida de este contador, se multiplica el porcentaje de cada tramo de la curva de consumos clasificados por la precisión media de dicho contador en el tramo en cuestión:

Tabla 5. Corrección en porcentaje del volumen

Tramos de caudal	% de volumen	Precisión media del contador	% de volumen corregido
0 - 10 l/h	2,80%	0,00%	0,00%
10 - 15 l/h	1,90%	0,00%	0,00%
15 - 22,5 l/h	2,60%	49,50%	1,29%
22,5 - 50 l/h	3,10%	95,93%	2,97%
50 - 100 l/h	3,50%	101,25%	3,54%
100 - 200 l/h	6,30%	100,31%	6,32%
200 - 400 l/h	19,20%	99,68%	19,14%
400 - 600 l/h	27,40%	99,37%	27,23%
600 - 800 l/h	18,10%	99,37%	17,98%
800 - 1000 l/h	9,20%	99,37%	9,14%
1000 - 1500 l/h	4,00%	99,53%	3,98%
1500 - 3000 l/h	1,90%	99,84%	1,90%
> 3000 l/h	0,00%	100,00%	0,00%
TOTAL	100%	**TOTAL**	93,49%

En este caso la precisión de la medida sería de 93,49%. Es decir tendríamos un subcontaje del 6,51% del volumen total medido.

En la práctica el cálculo de la precisión de la medida de un parque de contadores no es tan trivial como en el ejemplo anterior. Así pues las empresas abastecedoras se encontraran con los siguientes problemas a la hora de emprender una estimación de la imprecisión del parque de contadores:

- Se tendrá que hallar la curva de consumos clasificados mediante muestras de la población abastecida. Ello requiere unos esfuerzos tanto técnicos como económicos importantes si se desean obtener curvas de consumos con una cierta fiabilidad. Existe la opción de obtener dichos datos a partir de estudios realizados con anterioridad, pero ello restará fiabilidad a los resultados obtenidos.
- Se deberá tener un conocimiento importante de la configuración de las redes interiores de los abonados (acometidas, aljibes y/o depósitos, grupos de presión, etc…) así como de las características y estado del parque de contadores.
- Se deberá disponer de un banco de pruebas para poder realizar ensayos de caudal con los contadores de los abonados. En caso de no poder disponer de este banco, se pueden utilizar curvas de precisión de contadores obtenidas a partir de la bibliografía, pero esto también restará fiabilidad a los resultados finales obtenidos.

4.3.2.3. Experiencias en campo

4.3.2.3.1. Determinación de la muestra

A la hora de realizar esta experiencia debemos tener en cuenta que la población a estudiar sea homogénea, tanto en calibres y consumos como en la tipología de la instalación interior. Los resultados obtenidos serán válidos para esa población, pero no para el global del abastecimiento. Así, si en un abastecimiento existieran dos tipos diferenciados de instalación, lo adecuado sería realizar un estudio para cada uno de ellos. Las pérdidas aparentes globales se obtendrían ponderando el peso de cada una de esas poblaciones en el abastecimiento.

A este respecto es notable la diferencia en el patrón de consumo existente entre contadores que alimentan depósitos y contadores que alimentan el consumo directamente, bien mediante la presión de la red o mediante grupo de presión. Los primeros presentan un mayor peso en consumos a caudales bajos, por lo que requieren contadores de mayor precisión en esos rangos.

También, si se quiere afinar el estudio, se puede estratificar por edad de los contadores, volumen acumulado por el contador, o cualquier otra característica que se considere significativa. La determinación del tamaño de muestra dependerá de la homogeneidad de la estratificación realizada, la cual se podrá verificar mediante la dispersión de las medidas obtenidas.

4.3.2.3.2. Instalación de los contadores

Es interesante que la instalación de todos los contadores a la muestra de clientes se realice de forma rápida, preferiblemente en un mismo periodo de facturación, a fin de facilitar el seguimiento de los consumos mediante el programa de facturación del gestor del abastecimiento.

Los nuevos contadores a instalar deberán ser los que recojan con mayor precisión el rango de caudales de los clientes. Normalmente esta es una información que no vamos a conocer de antemano, pero es posible que poseamos alguna orientación al respecto. Por ejemplo, si los clientes poseen depósitos es casi seguro que un porcentaje significativo del consumo se realice a caudales bajos. Si la presión en la red de distribución es muy alta es probable que los consumos sean muy importantes a caudales altos. En la actualidad los contadores que se suelen utilizar para estos estudios son los volumétricos, ya que poseen bajos caudales de arranque y son menos sensibles a la instalación inclinada o vertical que los contadores de velocidad.

4.3.2.3.3. Seguimiento de los volúmenes registrados

Si se ha realizado una sustitución de una muestra de contadores se debe realizar un seguimiento de los resultados obtenidos. Tras la instalación de los nuevos contadores simplemente se continúa realizando lecturas, conforme a la periodicidad habitual en el abastecimiento. Las lecturas obtenidas son las que se utilizan para facturar.

Se aconseja realizar un seguimiento durante un periodo de tiempo largo, como mínimo un año, a fin de evitar que alteraciones debidas a factores externos, como períodos estivales o épocas de lluvias, puedan influir en los resultados. Se puede realizar un seguimiento similar al mostrado en la tabla 6 de la página siguiente.

Comparando el consumo medio después del cambio (B) con el consumo medio antes del cambio (A) obtenemos una estimación del error de medición de nuestro parque de contadores o, al menos, un orden de magnitud de las posibilidades máximas de mejora de la precisión.

Este método, si bien requiere un menor esfuerzo que el de obtención del patrón de consumo (ITA), presenta una serie de inconvenientes:

- Es lento, ya que para que los resultados sean estadísticamente significativo es necesario dejar pasar muchos periodos de facturación.
- Puede verse influido por factores ajenos a la metrología que hagan aumentar o descender el consumo medio de los abonados, tales como la meteorología, variaciones en las tarifas, u otros factores de difícil control.
- Si la muestra no es suficientemente amplia variaciones en el consumo de algunos usuarios pueden influir en los resultados.

Tabla 6. Seguimiento de volúmenes registrados

Periodo	Usuario 1	Usuario 2	Usuario 3	...	Usuario n	Media periodo
Periodo –8						
Periodo –7						
Periodo –6						
Periodo –5						
Periodo –4						
Periodo –3						
Periodo –1						
Periodo 0	Cambio contador	Cambio contador	Cambio contador	Cambio contador	Cambio contador	A :Consumo medio antes del cambio
Periodo 1						
Periodo 2						
Periodo 3						
Periodo 4						
Periodo 5						
Periodo 6						
Periodo 7						
Periodo 8						
						B: Consumo medio después del cambio

- No proporciona herramientas de la potencia del patrón de consumo que permitan gestionar con agilidad el parque de contadores.

4.3.2.3.4. Instalación de contadores en serie

Otra opción para llevar a cabo el estudio es mantener los contadores de los clientes e instalar otros de alta precisión o caudalímetros en serie. De esta forma se registra para los mismos periodos de tiempo el consumo medido por uno y otro tipo de contadores. Esto nos proporciona resultados más fiables que con el método del apartado anterior, puesto que directamente conocemos la imprecisión de la muestra, simplemente comparando los volúmenes registrados por los nuevos contadores y los viejos.

En la práctica las hornacinas o instalaciones interiores no siempre permiten realizar esta instalación en serie para una muestra grande de clientes. En algunos casos la instalación de dos contadores en serie puede provocar disminución en la presión en la instalación interior, con las consiguientes quejas de los clientes.
A cambio tiene las siguientes ventajas:

- Se tiene la seguridad de que el volumen que ha pasado por los nuevos contadores es el mismo que el que ha pasado por los antiguos, por estar instalados simultáneamente.
- La diferencia de volumen total nos da una buena aproximación del volumen no registrado.
- No requiere periodos de tiempo tan largos como el método anterior, en el que eran necesarios para laminar influencias externas en los consumos.

Si se añade un equipo de registro de datos, se puede obtener también el perfil de consumo del cliente, por lo que se puede valorar la precisión del contador con las máxima exactitud (ver [8] en la Bibliografía).

4.3.3. Medidas a tomar para la reducción de las pérdidas aparentes

4.3.3.1. Selección correcta de contadores

La información necesaria para poder realizar una correcta elección del modelo de contador más adecuado para nuestra instalación es:

- Instalación del contador: lugar y posición en la que va a ser instalado el contador, antigüedad y tipo de instalación (con/sin grupo de presión, en batería, etc.).
- Caudal de trabajo, caudal máximo y mínimo permisible a los que tendrá que trabajar el contador.
- Presión máxima de la red donde irá instalado.
- Temperatura y calidad del agua circulante.

Si estos parámetros no se conocen, se recomienda realizar estudios de consumos y presiones en la tubería utilizando registradores de datos u otros sistemas que permitan llegar a conocerlos.

Entre todos los enumerados, uno de los parámetros más influyente es el caudal medio al que el contador tendrá que trabajar el mayor número de horas. De igual manera, se aconseja comunicar al proveedor de contadores el resto de parámetros para que ayuden a realizar una elección más correcta. Nunca se debe seleccionar el diámetro del contador según el diámetro de la tubería pues conllevará un coste mayor de adquisición del contador y una facturación menor.

Por último señalar que un contador sobredimensionado tendrá un subcontaje mayor además de los ya comentados mayores costes de instalación. Por el contrario, un contador infradimensionado requerirá un mantenimiento más frecuente y tendrá más posibilidades de roturas prematuras.

Recomendaciones para dimensionar contadores comerciales

En los casos de contadores de tamaños medios (de 25 a 40 mm) se hace de igual manera imprescindible conocer cómo va a trabajar realmente el contador. Esta información sólo tiene posibilidad de conocerla el cliente final ya que sabe, por ejemplo, de que proceso industrial depende o a que grupo de contadores (en el caso por ejemplo de contador general) va a controlar.

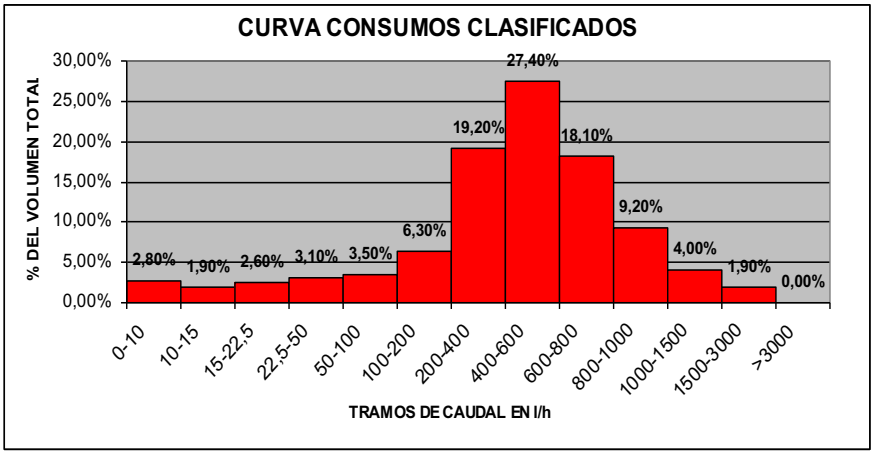
Sin esta información, el contador seleccionado puede tener grandes problemas de rendimiento por trabajar fuera de su rango.

Recomendaciones para dimensionar los contadores de abonados

En este apartado se describe el dimensionado de los contadores de abonados domésticos que normalmente son los que forman la mayoría del parque de contadores de un abastecimiento. La correcta elección del medidor se basará en el estudio de la curva de consumo.

En el gráfico 11 se observa la distribución del consumo de una vivienda en los caudales a los que éstos se registran medidos con un contador de Q_n 1500 l/h.

Gráfico 11. Curva de consumos de una vivienda



La obtención de este histograma de caudales en distintos abonados permite obtener las siguientes conclusiones sobre la curva de demanda:

- En todos los casos, el 90 % del consumo de una vivienda se realiza por debajo de 750 l/h, el 98 % por debajo de 1000 l/h y el 99,8% a caudales inferiores a 1500 l/h.
- En cuanto a la franja inferior de caudales, por debajo de 30 l/h, se consume entre un 7,1 y un 8,2 % del total. Un contador Qn 1500 l/h, clase B, por debajo de este caudal tiene un subcontaje muy importante. Si estos caudales son continuos, el volumen de ANR puede ser representativo.
- Normalmente, un caudal inferior a 30 l/h corresponde a una fuga interior debida al incorrecto estado de los dispositivos interiores.

La mejora de la medida a caudales inferiores a 30 l/h permitiría incrementar el volumen registrado en el contador. Dicha mejora se consigue bien instalando un contador de clase más precisa bien instalando un contador con un caudal nominal menor. En ambos casos, el mayor registro se basa en la instalación de un contador con un caudal mínimo menor que podría llegar a registrar entre un 4 y un 6,9% más.

Por este motivo, es importante conocer la forma de consumir de los clientes finales ya que ello permite seleccionar el contador más adecuado para ese uso en concreto.

4.3.3.2. Instalación de contadores

La precisión de un contador de agua puede estar afectada por perturbaciones en su entrada y salida, por la presencia de codos, piezas, derivaciones, válvulas, etc. Para solventar estos defectos se recomienda seguir las siguientes pautas en el momento de instalar un contador de agua.

- El contador siempre debe estar lleno de agua.
- Asegurar la limpieza de la tubería en la que el contador debe ser instalado.
- Instalar una válvula antes y después del contador.
- Utilizar filtro a la entrada.
- Si es necesario instalar otros elementos que puedan perturbar el flujo, hacerlo preferentemente después del contador.
- Evitar los golpes de ariete.
- Vigilar el estado y la correcta instalación de las juntas de los racores.
- Orientar el contador según la posición de diseño indicada, evitando cualquier desviación de ésta con objeto de facilitar la lectura.
- Eliminar el aire de la instalación.
- Ejecutar un buen plan de mantenimiento de la instalación.

Además hay que tener en cuenta las distancias aconsejadas por los fabricantes para evitar perturbaciones de flujo aguas arriba y aguas abajo del contador. A modo de referencia y pudiendo depender de cada modelo de contador, estas distancias son (para contadores con un diámetro superior a 40 mm):

Elementos perturbadores aguas abajo del contador

Tabla 7. Distancia de colocación aguas abajo de un elemento perturbador

Elemento	Distancia dependiendo del diámetro del contador
Válvula todo/nada Válvula regulación	3 x D

Elementos perturbadores aguas arriba del contador

Tabla 8. Distancia de colocación aguas arriba de un elemento perturbador

Elemento	Distancia dependiendo del diámetro del contador
Válvulas de regulación	10 – 20 x D
Cambios de dirección y T's	10 – 20 x D
Cambios de dirección y de plano	15 – 20 x D
Reducciones	10 x D (convergente) 10 – 15 x D (divergente)
Filtros (dependiendo del fabricante)	3 – 12 x D
Bombas centrífugas	15 – 20 x D

Estas recomendaciones no se aplican a contadores domésticos ya que en éstos, las distancias recomendadas ya quedan incluidas en el propio contador.

También a modo de referencia, destacar que las normas básicas para instalaciones interiores de suministro de agua (BOE nº 11 de 13 de Enero 1976) dan una serie de recomendaciones para la instalación de contadores individuales y en batería.

Comentar también que el Código Técnico de Edificación no especifica todos estos puntos quedándose básicamente en elementos que han de acompañar al contador (llaves antes y después, filtro, posibilidad de lectura a distancia, etc.).

En el caso de los contadores de tecnología electromagnética, y al igual que en el caso de los valores de referencia dados anteriormente para contadores mecánicos, se pueden establecer las siguientes condiciones de instalación:

- El tubo de medida debe estar lleno de agua en todo momento
- No instalarlo en el punto más elevado de la tubería ya que puede acumularse aire
- Dejar un tramo mínimo de 5 x DN antes del caudalímetro y de 2 x DN a la salida del mismo
- Si el caudal tuviera remolinos o torbellinos, se deben aumentar estos tramos rectos aguas arriba y abajo del caudalímetro

- Si en un momento del proceso se realiza una mezcla de diferentes líquidos, instalar el caudalímetro aguas arriba de este punto o a unos 30 x DN aguas abajo para asegurar la homogeneidad de la mezcla
- Evitar campos electromagnéticos intensos cerca del caudalímetro
- No instale el caudalímetro en el lado de succión de una bomba
- Sujetar correctamente la tubería para evitar vibraciones y tensiones excesivas
- Realizar el conexionado de puesta a tierra del caudalímetro

Asimismo, y aunque todas estas indicaciones pueden servir de referencia, es importantísimo consultar la documentación específica suministrada por el fabricante para cada tipo de contador.

4.3.3.3. Revisiones periódicas y mantenimiento

Mantenimiento de los contadores

Hace algunos años era práctica habitual la realización de mantenimiento a los contadores domiciliarios. Estas prácticas consistían en el desmontaje del contador del cliente y su revisión y reparación en un taller. Posteriormente estos contadores se volvían a instalar.

Hoy en día esta práctica ha desaparecido por dos razones: en primer lugar porque la manipulación del mecanismo del contador anularía su homologación legal y en segundo porque no es económicamente viable la realización de estas tareas de mantenimiento, dado que el precio de los contadores es relativamente bajo. La reparación de un contador sólo puede ser realizada por personas o entidades inscritas en el Registro de Control Metrológico y obliga, entre otras cosas, a la realización de una posterior verificación en un laboratorio autorizado. El coste de estos procesos supera, con mucho, el precio de un contador nuevo. En la actualidad cuando se considera que un contador no funciona correctamente simplemente se sustituye por otro. El único mantenimiento que se realiza es la retirada de cuerpos extraños que hayan podido obturar el contador, hecho que se detecta al desmontarlo.

En los contadores de calibres elevados, especialmente en los tipo Woltmann, si se puede realizar la sustitución de parte de contador. La mayoría de estos modelos permiten la sustitución del conjunto formado por la turbina y el totalizador, manteniendo el mismo cuerpo de contador.

También en contadores electromagnéticos o de ultrasonidos se pueden realizar sustituciones de algunas partes del medidor. Sin embargo existe en la actualidad un vacío legal en la homologación de este tipo de contadores para facturar consumos, por lo que no es habitual su uso.

Revisión periódica de los contadores

Hace referencia este epígrafe a la comprobación "in situ" del buen estado de los contadores por parte de lectores o inspectores. Es evidente que estas personas no pueden realizar un análisis del estado metrológico de cada contador, sin embargo sí que pueden detectar una serie de anomalías cuya corrección contribuye a la mejora de la calidad de la medición. Dichas anomalías se pueden detectar mediante la observación del contador o del inmueble abastecido, según el caso. Citamos algunas a continuación:

- Contadores que externamente presentan un mal estado o están rotos.
- El movimiento de los dígitos o de las agujas no es continuo.
- El contador no marca consumo cuando el inspector observa que este se está produciendo.
- El contador está funcionando a caudales por encima o por debajo de los adecuados para el modelo y calibre.
- El modelo de contador no es el adecuado para el tipo de instalación del cliente.
- El contador no está en posición horizontal.
- El consumo registrado por el contador no concuerda con la realidad del inmueble (consumo bajo en vivienda habitada por un número elevado de personas, consumo bajo en vivienda con jardín o piscina, etc.)
- El contador no marca a caudales bajos provocados por el inspector en una purga o en la instalación del cliente.
- Se ha manipulado el contador o los precintos.

Estas tareas pueden ser realizadas por los lectores de los contadores, si bien en ese caso debe entenderse que la velocidad en la toma de lecturas será inferior a la de empleados que únicamente realicen la toma de lecturas, sin reparar en otros aspectos. Lo ideal es la existencia de un cuerpo de inspectores especializado en la revisión de estos aspectos, y concentrar el trabajo en aquellas instalaciones que presenten consumos anormalmente bajos (ver 4.3.3.5).



Foto 20. Válvula con toma de purga

Es útil que los operarios que toman las lecturas de los contadores dispongan de terminales portátiles de lectura en los que sea posible anotar las anomalías detectadas.

Una de las pruebas que son adecuadas para comprobar, de forma intuitiva y aproximada, el buen funcionamiento del contador, es provocar el paso de un pequeño caudal y observar si el contador es capaz de detectarlo. Para ello es útil la existencia de purgas posteriores al contador que permitan al personal de la empresa generar este caudal de verificación. A este efecto existen en el mercado muchos modelos de válvulas que ya vienen dotadas de tornillos o tomas de purga.

4.3.3.4. Renovación del parque de contadores

La gestión del parque de contadores, desde el punto de vista de la rentabilidad económica, debería realizarse con el criterio de minimizar los gastos y maximizar los beneficios. Existen métodos que proporcionan la vida media a la que se debe cambiar un contador. Veremos, sin embargo, que si el precio del agua es bajo los periodos obtenidos son muy altos, incluso superiores a los veinte años. El mantener en activo los contadores periodos tan elevados conlleva una degradación de la calidad de la medición y un incremento de las pérdidas aparentes. Es por ello que muchos gestores, e incluso la administración pública, se obligan a realizar cambios de periodicidad inferior, aún sabiendo que con ello se pierde rentabilidad.

Determinación de la vida útil del contador con criterios de rentabilidad

Este método busca obtener el punto en el que el gestor del abastecimiento obtiene el máximo beneficio. Se basa en que existe un coste inicial de sustitución del contador y un beneficio posterior proveniente de los ingresos por el agua registrada por el contador, los cuales se reciben a lo largo de la vida del contador. Sin embargo, puesto que la precisión del contador va degradándose con el tiempo y el desgaste, llega un momento en el que es interesante volver a realizar el gasto de sustituir el contador por uno nuevo. Ese momento óptimo es el que se busca determinar. Para ello debemos partir de una serie de datos, que se relacionan a continuación:

- Coste de instalación de contador. Comprende tanto el coste de compra del contador como los trabajos de sustitución y los administrativos.
- Inflación. Nos proporciona la pérdida de valor de la moneda para fechas futuras. Naturalmente será una estimación.
- Rentabilidad. Es el valor de la rentabilidad que exigimos a la inversión.
- Decaimiento de la precisión. Nos proporciona el porcentaje del volumen real consumido que dejaremos de registrar cada año por la pérdida de precisión del contador.
- Volumen de agua realmente consumido por el abonado medio en un año.
- Tarifa y su evolución a lo largo del tiempo.

De los datos anteriores es bastante problemático conocer el dato del decaimiento de la precisión. Existen empresas que han realizado estudios sobre el mismo, si bien no suelen ser públicos, ni tampoco son siempre exportables a abastecimientos de características diferentes (calidad del agua, tipo de instalaciones interiores, etc.). En la bibliografía se suelen utilizar valores que van del 0,2% al 0,5% de pérdida de precisión. Se supone, para este método de cálculo, que el ritmo de decaimiento de la precisión es constante a lo largo de los años.

Para realizar el cálculo del momento óptimo de renovación, según el método desarrollado por F. Arregui, se utiliza el VANC, el cual es el VAN de la Cadena de Renovaciones:

$$VANC = \frac{(1 + r')^n}{(1 + r')^n - 1} \times VAN$$

Dónde:

- r' es la tasa de actualización real (o deflactada), la cual descuenta de la rentabilidad prevista el efecto de la inflación $r' = \frac{(1+r)}{(1+s)} - 1$, en donde r es la rentabilidad nominal exigida y s es la inflación prevista.
- n son los años que dejamos instalado el contador.
- VAN es el Valor Actual Neto de los ingresos generados por el contador. Para su cálculo se deberá tener en cuenta el decaimiento de la precisión de contador.

Veamos un ejemplo del cálculo:

Supongamos una población de contadores homogénea los cuales a origen tienen un error del 3,5% y anualmente tienen un decaimiento de la precisión del 0,5 %. El consumo de agua medio de los clientes es de 100 m3/año y el precio de venta del agua es de 1,2 €/ m3. El coste de instalar el contador, incluyendo la compra del mismo y su instalación, es de 30 €. Supondremos que la inflación anual es del 2,5% y que las tarifas de venta del agua se actualizan con la inflación. La tasa de actualización real (r') la empresa la fija en el 0,5%. Con todos estos datos la cuestión que se plantea es ¿cuál es el periodo de vida económicamente óptimo para ese contador?

El cálculo se realiza según lo indicado en la tabla siguiente, siendo el resultado el correspondiente al valor máximo en la columna VANC. En este caso el resultado sería que lo económicamente óptimo es sustituir esos contadores cuando cumplen 9 años de vida:

Tasa de actualización	3,01%	**Precio inicial del agua**	1,20 €
Inflacción	2,50%	**Error inicial**	3,50%
Tasa de actualización real	0,50%	**Coste instalación**	30,00 €
Tarifas = Inflacción		**Deterioro anual**	0,50%

AÑO	COSTE INSTALACIÓN	VOLUMEN REAL	ERROR DE MEDICION	VOLUMEN REGISTRADO	PRECIO AGUA	INGRESO	TOTAL	VAN	VANC
1	-30	120	3,50%	115,8	1,20 €	138,96 €	108,96 €	105,78 €	21364,70588
2		120	4,00%	115,2	1,23 €	141,70 €	141,70 €	239,31 €	24228,17038
3		120	4,50%	114,6	1,26 €	144,48 €	144,48 €	371,50 €	25135,82525
4		120	5,00%	114	1,29 €	147,32 €	147,32 €	502,34 €	25554,61531
5		120	5,50%	113,4	1,32 €	150,21 €	150,21 €	631,84 €	25777,9295
6		120	6,00%	112,8	1,36 €	153,15 €	153,15 €	760,03 €	25903,56415
7		120	6,50%	112,2	1,39 €	156,14 €	156,14 €	886,90 €	25973,43196
8		120	7,00%	111,6	1,43 €	159,19 €	159,19 €	1.012,46 €	26008,48928
9		120	7,50%	111	1,46 €	162,29 €	162,29 €	1.136,74 €	26020,37853
10		120	8,00%	110,4	1,50 €	165,45 €	165,45 €	1.259,73 €	26016,08515
11		120	8,50%	109,8	1,54 €	168,66 €	168,66 €	1.381,45 €	26000,05443
12		120	9,00%	109,2	1,57 €	171,94 €	171,94 €	1.501,90 €	25975,24988
13		120	9,50%	108,6	1,61 €	175,27 €	175,27 €	1.621,09 €	25943,72317
14		120	10,00%	108	1,65 €	178,66 €	178,66 €	1.739,05 €	25906,93977
15		120	10,50%	107,4	1,70 €	182,10 €	182,10 €	1.855,76 €	25865,97436
16		120	11,00%	106,8	1,74 €	185,61 €	185,61 €	1.971,25 €	25821,63294
17		120	11,50%	106,2	1,78 €	189,19 €	189,19 €	2.085,52 €	25774,53186
18		120	12,00%	105,6	1,83 €	192,82 €	192,82 €	2.198,58 €	25725,15052
19		120	12,50%	105	1,87 €	196,52 €	196,52 €	2.310,45 €	25673,86737
20		120	13,00%	104,4	1,92 €	200,28 €	200,28 €	2.421,12 €	25620,98518
21		120	13,50%	103,8	1,97 €	204,11 €	204,11 €	2.530,62 €	25566,74903
22		120	14,00%	103,2	2,02 €	208,00 €	208,00 €	2.638,94 €	25511,35945
23		120	14,50%	102,6	2,07 €	211,96 €	211,96 €	2.746,10 €	25454,9821
24		120	15,00%	102	2,12 €	215,99 €	215,99 €	2.852,10 €	25397,75502
25		120	15,50%	101,4	2,17 €	220,09 €	220,09 €	2.956,96 €	25339,79415
26		120	16,00%	100,8	2,22 €	224,25 €	224,25 €	3.060,68 €	25281,1976
27		120	16,50%	100,2	2,28 €	228,49 €	228,49 €	3.163,28 €	25222,04896
28		120	17,00%	99,6	2,34 €	232,80 €	232,80 €	3.264,76 €	25162,41983
29		120	17,50%	99	2,40 €	237,18 €	237,18 €	3.365,12 €	25102,37199
30		120	18,00%	98,4	2,46 €	241,64 €	241,64 €	3.464,38 €	25041,95893
31		120	18,50%	97,8	2,52 €	246,17 €	246,17 €	3.562,55 €	24981,22726
32		120	19,00%	97,2	2,58 €	250,78 €	250,78 €	3.659,64 €	24920,21776
33		120	19,50%	96,6	2,64 €	255,46 €	255,46 €	3.755,64 €	24858,96626
34		120	20,00%	96	2,71 €	260,22 €	260,22 €	3.850,58 €	24797,50437
35		120	20,50%	95,4	2,78 €	265,06 €	265,06 €	3.944,46 €	24735,86008
36		120	21,00%	94,8	2,85 €	269,98 €	269,98 €	4.037,28 €	24674,05829
37		120	21,50%	94,2	2,92 €	274,97 €	274,97 €	4.129,07 €	24612,12119

Si volviéramos a repetir el cálculo suponiendo que el precio del agua no es de 1,2 €/m³ sino de 0,3 €/m³ los resultados son muy diferentes:

Tasa de actualización	3,01%	**Precio inicial del agua**	0,30 €
Inflacción	2,50%	**Error inicial**	3,50%
Tasa de actualización real	0,50%	**Coste instalación**	30,00 €
Tarifas = Inflacción		**Deterioro anual**	0,50%

AÑO	COSTE INSTALACIÓN	VOLUMEN REAL	ERROR DE MEDICION	VOLUMEN REGISTRADO	PRECIO AGUA	INGRESO	TOTAL	VAN	VANC
1	-30	120	3,50%	115,8	0,30 €	34,74 €	4,74 €	4,60 €	929,4117647
2		120	4,00%	115,2	0,31 €	35,42 €	35,42 €	37,99 €	3845,686055
3		120	4,50%	114,6	0,32 €	36,12 €	36,12 €	71,03 €	4806,06314
4		120	5,00%	114	0,32 €	36,83 €	36,83 €	103,74 €	5277,48782
5		120	5,50%	113,4	0,33 €	37,55 €	37,55 €	136,12 €	5553,349055
6		120	6,00%	112,8	0,34 €	38,29 €	38,29 €	168,16 €	5731,443163
7		120	6,50%	112,2	0,35 €	39,04 €	39,04 €	199,88 €	5853,682853
8		120	7,00%	111,6	0,36 €	39,80 €	39,80 €	231,27 €	5941,024479
9		120	7,50%	111	0,37 €	40,57 €	40,57 €	262,34 €	6005,110458
10		120	8,00%	110,4	0,37 €	41,36 €	41,36 €	293,09 €	6052,92624
11		120	8,50%	109,8	0,38 €	42,17 €	42,17 €	323,52 €	6088,917112
12		120	9,00%	109,2	0,39 €	42,98 €	42,98 €	353,63 €	6116,046597
13		120	9,50%	108,6	0,40 €	43,82 €	43,82 €	383,43 €	6136,366363
14		120	10,00%	108	0,41 €	44,66 €	44,66 €	412,92 €	6151,34189
15		120	10,50%	107,4	0,42 €	45,53 €	45,53 €	442,10 €	6162,047859
16		120	11,00%	106,8	0,43 €	46,40 €	46,40 €	470,97 €	6169,290282
17		120	11,50%	106,2	0,45 €	47,30 €	47,30 €	499,54 €	6173,685521
18		120	12,00%	105,6	0,46 €	48,20 €	48,20 €	527,80 €	6175,712967
19		120	12,50%	105	0,47 €	49,13 €	49,13 €	555,77 €	6175,751086
20		120	13,00%	104,4	0,48 €	50,07 €	50,07 €	583,44 €	6174,10265
21		120	13,50%	103,8	0,49 €	51,03 €	51,03 €	610,81 €	6171,01276
22		120	14,00%	103,2	0,50 €	52,00 €	52,00 €	637,89 €	6166,681953
23		120	14,50%	102,6	0,52 €	52,99 €	52,99 €	664,68 €	6161,275888
24		120	15,00%	102	0,53 €	54,00 €	54,00 €	691,18 €	6154,932615
25		120	15,50%	101,4	0,54 €	55,02 €	55,02 €	717,40 €	6147,768094
26		120	16,00%	100,8	0,56 €	56,06 €	56,06 €	743,33 €	6139,880445
27		120	16,50%	100,2	0,57 €	57,12 €	57,12 €	768,98 €	6131,353252
28		120	17,00%	99,6	0,58 €	58,20 €	58,20 €	794,35 €	6122,258155
29		120	17,50%	99	0,60 €	59,30 €	59,30 €	819,44 €	6112,656915
30		120	18,00%	98,4	0,61 €	60,41 €	60,41 €	844,25 €	6102,603056
31		120	18,50%	97,8	0,63 €	61,54 €	61,54 €	868,80 €	6092,143195
32		120	19,00%	97,2	0,65 €	62,69 €	62,69 €	893,07 €	6081,318121
33		120	19,50%	96,6	0,66 €	63,86 €	63,86 €	917,07 €	6070,16368
34		120	20,00%	96	0,68 €	65,05 €	65,05 €	940,80 €	6058,711498
35		120	20,50%	95,4	0,69 €	66,26 €	66,26 €	964,27 €	6046,989587
36		120	21,00%	94,8	0,71 €	67,49 €	67,49 €	987,48 €	6035,022845
37		120	21,50%	94,2	0,73 €	68,74 €	68,74 €	1.010,42 €	6022,833479

Vemos que con ese precio del agua, mucho más bajo, y manteniendo el resto de parámetros, se obtiene que los contadores deberían cambiarse cada 19 años.

Otros factores que también pueden alargar el periodo de vida económicamente óptimo del contador son un bajo decaimiento de la precisión, un alto coste de instalación o una rentabilidad exigida muy alta. Este mismo cálculo se puede realizar para diferentes modelos de contadores los cuales tendrán diferentes errores iniciales y diferentes decaimientos de la precisión.

Se observa que para muchos abastecimientos, en los que los precios de venta del agua no son muy elevados, el resultado de aplicar este método llevaría a que la edad media de los contadores instalados fuera muy alta. Es por ello que, sacrificando los estrictos criterios de rentabilidad económica, multitud de gestores optan por realizar una renovación del parque de contadores por edad o por volumen máximos para cada tipo de contador o cliente.

Determinación del contador a sustituir con edad máxima o volumen máximo fijados

Los gestores optan en ocasiones por sustituir los contadores cuando se cumplen determinados requisitos:

- Cuando el contador ha llegado a una determinada edad.
- Cuando el contador ha registrado un determinado volumen.

Estos límites pueden ser marcados por el propio gestor o por la legislación, como es el caso de Andalucía.

El objetivo de esta política no es tanto la consecución del máximo rendimiento económico como el asegurar una calidad mínima para la medición de caudales.

Si se sigue este tipo de política la cuestión que debe resolver ya no es cuándo cambiar el contador sino qué modelo de contador conviene instalar en sustitución de los existentes. Éste cálculo es mucho más simple que el anterior, pues basta con calcular el VAN que para la vida útil del contador proporcionará cada modelo.

Veamos un ejemplo del cálculo:

Supongamos una población en la que el precio del agua es de 0,3 €/m3, la inflación se estima en el 2,5% y la tasa de rentabilidad real es de 0,5%. El gestor está obligado a sustituir todos los contadores a los 10 años de vida. Se plantea que contador instalar de entre las tres alternativas que le ofrece el mercado:

- Contador A: error inicial 3,5% y deterioro anual del 0,5%. Coste de instalación 30 €.
- Contador B: error inicial 4,5% y deterioro anual del 0,3%. Coste de instalación 27 €.
- Contador C: error inicial 2% y deterioro anual del 0,6%. Coste de instalación 45 €.

El proceso a seguir sería el cálculo del VAN que proporciona cada uno de los contadores, en función de los datos que conocemos de cada uno de ellos:

Tasa de actualización	3,01%	Precio inicial del agua	0,30 €
Inflacción	2,50%	Año de sustitución	8
Tasa de actualización real	0,50%		
Tarifas = Inflacción			

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Error inicial	3,50%	4,50%	2,00%
Coste instalación	30,00 €	27,00 €	45,00 €
Deterioro anual	0,50%	0,30%	0,60%

MODELO A

AÑO	COSTE INSTALACIÓN	VOLUMEN REAL	ERROR DE MEDICION	VOLUMEN REGISTRADO	PRECIO AGUA	INGRESO	TOTAL	VAN
1	-30,00 €	120	3,50%	115,8	0,30 €	34,74 €	4,74 €	4,72 €
2		120	4,00%	115,2	0,31 €	35,42 €	35,42 €	39,79 €
3		120	4,50%	114,6	0,32 €	36,12 €	36,12 €	75,38 €
4		120	5,00%	114	0,32 €	36,83 €	36,83 €	111,48 €
5		120	5,50%	113,4	0,33 €	37,55 €	37,55 €	148,11 €
6		120	6,00%	112,8	0,34 €	38,29 €	38,29 €	185,28 €
7		120	6,50%	112,2	0,35 €	39,04 €	39,04 €	222,98 €
8		120	7,00%	111,6	0,36 €	39,80 €	39,80 €	261,23 €
9		120	7,50%	111	0,37 €	40,57 €	40,57 €	300,03 €
10		120	8,00%	110,4	0,37 €	41,36 €	41,36 €	339,39 €
			TOTAL m3:	**1131**			**TOTAL €:**	**339,39 €**

MODELO B

AÑO	COSTE INSTALACIÓN	VOLUMEN REAL	ERROR DE MEDICION	VOLUMEN REGISTRADO	PRECIO AGUA	INGRESO	TOTAL	VAN
1	-27,00 €	120	4,50%	114,6	0,30 €	34,38 €	7,38 €	7,34 €
2		120	4,80%	114,24	0,31 €	35,13 €	35,13 €	42,13 €
3		120	5,10%	113,88	0,32 €	35,89 €	35,89 €	77,49 €
4		120	5,40%	113,52	0,32 €	36,67 €	36,67 €	113,44 €
5		120	5,70%	113,16	0,33 €	37,47 €	37,47 €	150,00 €
6		120	6,00%	112,8	0,34 €	38,29 €	38,29 €	187,16 €
7		120	6,30%	112,44	0,35 €	39,12 €	39,12 €	224,94 €
8		120	6,60%	112,08	0,36 €	39,97 €	39,97 €	263,35 €
9		120	6,90%	111,72	0,37 €	40,84 €	40,84 €	302,41 €
10		120	7,20%	111,36	0,37 €	41,72 €	41,72 €	342,11 €
			TOTAL m3:	**1129,8**			**TOTAL €:**	**342,11 €**

MODELO C

AÑO	COSTE INSTALACIÓN	VOLUMEN REAL	ERROR DE MEDICION	VOLUMEN REGISTRADO	PRECIO AGUA	INGRESO	TOTAL	VAN
1	-45,00 €	120	2,00%	117,6	0,30 €	35,28 €	-9,72 €	-9,67 €
2		120	2,60%	116,88	0,31 €	35,94 €	35,94 €	25,91 €
3		120	3,20%	116,16	0,32 €	36,61 €	36,61 €	61,98 €
4		120	3,80%	115,44	0,32 €	37,29 €	37,29 €	98,55 €
5		120	4,40%	114,72	0,33 €	37,99 €	37,99 €	135,60 €
6		120	5,00%	114	0,34 €	38,69 €	38,69 €	173,16 €
7		120	5,60%	113,28	0,35 €	39,41 €	39,41 €	211,23 €
8		120	6,20%	112,56	0,36 €	40,14 €	40,14 €	249,81 €
9		120	6,80%	111,84	0,37 €	40,88 €	40,88 €	288,90 €
10		120	7,40%	111,12	0,37 €	41,63 €	41,63 €	328,52 €
			TOTAL m3:	**1143,6**			**TOTAL €:**	**328,52 €**

Se observa que el contador que proporciona un mayor VAN es el B, por lo que esa sería la mejor opción. El contador C tiene una mayor precisión, como lo confirma el hecho de que el volumen contabilizado durante los 10 años es mayor, sin embargo económicamente está penalizado por su mayor coste inicial.

4.3.3.5. Seguimiento de consumos

En todas las empresas es práctica habitual que entre el proceso de lectura y la emisión de las facturas de los clientes exista un proceso interno de revisión de los consumos. Durante esta revisión se detectan errores de lectura, se estiman consumos y en general se comprueba que los importes que se van a facturar a los clientes son correctos.

El personal que se dedica a estos menesteres también puede contribuir en gran medida a la reducción de las pérdidas aparentes al detectar contadores parados o defectuosos. Naturalmente estas personas poseen una información limitada sobre la causa de las variaciones en el consumo: básicamente el histórico de lecturas y consumos y las anotaciones sobre las características de ese cliente que pueda haber en la base de datos. Es por ello que en muchas ocasiones las decisiones que puedan tomar sobre el estado de los contadores pueden ser erróneas o requerir una corroboración por parte del personal que inspecciona la instalación.

Los programas de gestión suelen poseer herramientas de asistencia a estos procesos de revisión tales como:

- Listados de usuarios cuyo consumo es nulo o inferior a un umbral.
- Listados de usuarios cuyo consumo es muy diferente al habitual para ese periodo de facturación (comparación con el histórico del cliente).
- Listado de contadores con tendencia de consumos descendente.

Este proceso es el que habitualmente permite detectar los contadores que se han parado, los cuales, independientemente de las políticas de mantenimiento del parque de contadores, deben ser sustituidos inmediatamente.

Instalación contador general (baja)

Se ha convertido en práctica habitual en muchos abastecimientos la instalación de un contador general a la entrada de cualquier edificio de viviendas, aun cuando posteriormente existan contadores individuales para cada uno de los inmuebles que componen el edificio.

La finalidad del contador general es comprobar la coherencia entre el volumen de agua que entra al edificio y la suma de los consumos de los contadores divisionarios. Si las instalaciones fuesen perfectas y los contadores midieran con una total precisión debería cumplirse que la suma de los consumos de las viviendas es igual al volumen de agua registrado por el contador general.

En la práctica casi siempre van a existir discrepancias entre ambos valores, aunque se suele cumplir que las diferencias son pequeñas. En caso de que estas diferencias sean elevadas el gestor debe comprobar si se está dando alguna de las situaciones siguientes:

- Existen fugas de agua en el tramo de instalación interior existente entre el contador general y los contadores divisionarios. Esto es bastante habitual en edificios antiguos cuyas instalaciones interiores pueden estar deterioradas y en edificios con depósitos anteriores a los grupos de bombeo en los que se producen reboses.
- Existen mal funcionamiento de los contadores del sistema por deterioro de los mismos. El problema puede encontrarse tanto en los contadores divisionarios como en el general.
- Existen tomas de agua en el interior del edificio que no pasan por contador.
- Hay manipulación en el conjunto de medida o la acometida.

En caso de que existan pérdidas de agua no contabilizadas en la instalación interior del edificio se debe notificar a los propietarios a fin de que reparen las fugas con la mayor brevedad posible.

La instalación de este tipo de contadores está especialmente indicada cuando existen grupos de bombeo con depósito de aspiración, instalaciones interiores de gran longitud antes de los contadores divisionarios, instalaciones antiguas o sospechas de la existencia de fraude.

4.3.3.6. Control en la recepción de contadores

Aunque todo contador nuevo se ensaya individualmente en fábrica antes de ser enviado a la empresa gestora, con lo que se garantiza su buen funcionamiento, podría ocurrir que al ser recibido en las instala-

ciones de la empresa gestora, esto ya no fuera así. Esto podría deberse a posibles manipulaciones posteriores (ej. durante el transporte) que haría que un cierto número de contadores estuvieran fuera de las tolerancias metrológicas legales.

Por este motivo y para evitar las posibles pérdidas económicas que podría suponer para la empresa gestora la instalación de un contador en estas condiciones (en cada caso, dependiendo de las condiciones de instalación, precio del agua, etc.) se puede optar por realizar un control de calidad a la recepción de los contadores.

Este procedimiento se basa en fijar un nivel de inspección (que puede ser reducido, normal o riguroso en función de la confianza que se tenga del proveedor) y un nivel de calidad aceptable (porcentaje unidades defectuosas aceptables en el lote), definidos por la ISO 3951, con el que se verificará el lote recibido del proveedor mediante una muestra seleccionada al azar en función del tamaño del lote.

Con estas variables se escoge la constante de aceptabilidad (en función de los parámetros anteriores) que es comparada con los estadísticos de control de calidad (en función de los límites de especificación del producto que en el caso de los contadores de agua podrían ser ±5% ente Q_{min} y Q_t y ±2% para valores por encima del Q_t) dando como resultado la aceptación o no del lote recibido.

Este procedimiento está basado en la metodología para un plan de muestreo por variables definido en la ISO 3951 (método "s") por lo que se puede consultar con mayor detalle su aplicación en ese documento.

Cabe considerar que con este procedimiento sólo se verifican los errores de los contadores nuevos y que no se asegura la tendencia de éstos con el tiempo. Para este propósito sería importante aplicar una metodología similar a contadores ya en uso y conocer los niveles de subcontaje del parque de contadores con el tiempo.

4.3.3.7. Reducción de las fugas interiores

Las fugas interiores en los domicilios de los abonados presentan un doble problema:

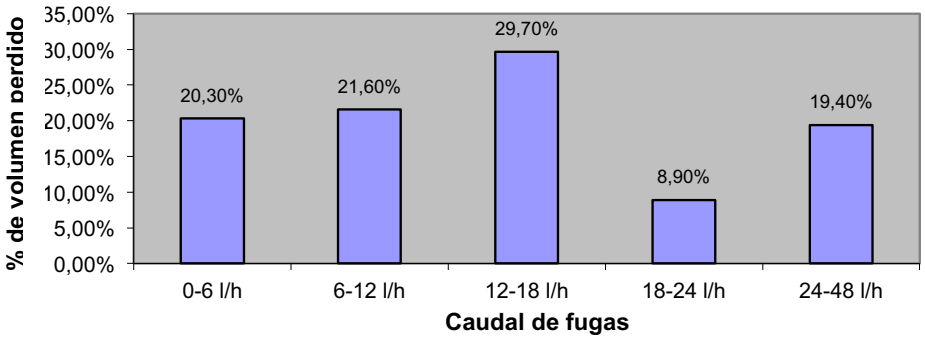
- Volúmenes de agua no registrados por las empresas abastecedoras, con la consecuente pérdida económica y de rendimiento.
- Derroche ecológico al producirse en la mayoría de los casos un desaprovechamiento de volúmenes de agua potable.

Las principales causas que provocan fugas o caudales no contabilizados en las instalaciones interiores de los abonados son:

- Presencia de depósitos o aljibes con regulación de llenado mediante válvulas de flotador.
- Fugas en aparatos consumidores como cisternas o grifos.
- Fugas en las tuberías interiores de los domicilios de los abonados.

Asimismo, cualquier consumo que se sitúe por debajo de 40-30 l/h es susceptible de ser considerado anómalo. En el gráfico 12 (Francisco Arregui 2000), se expone el % de volumen de agua perdido en fugas interiores por tramos y referidos al intervalo 0-48 l/h.

Gráfico 12. Porcentaje de fugas interiores



Así pues se puede observar que en el intervalo de 0-18 l/h representa el 71,6% del volumen total perdido en fugas interiores (considerando el tramo 0-48 l/h).

La reducción de las fugas interiores son realmente complicadas para las empresas abastecedoras ya que se producen dentro de propiedades particulares donde no pueden inmiscuirse. Por otra parte, los abonados sólo actúan cuando la fuga es bien visible o cuando el caudal de la misma les penaliza económicamente. A continuación se exponen una serie de medidas que podrían contribuir a minimizar el impacto de las fugas interiores:

Sustitución de las válvulas de flotador de los depósitos o aljibes de los abonados por válvulas de regulación todo-nada: Esto requiere disponer de un censo de las viviendas que disponen de estos depósitos. Asimismo la empresa suministradora deberá correr con los gastos de instalación de dichas válvulas ya que los abonados no estarán dispuestos a asumir dichos costes. Es importante destacar que la aplicación de dicha medida en contadores de diámetro superior a 20 mm y con presiones relativamente elevadas debe observarse con sumo cuidado, ya que se podrían producir caudales de paso que pueden deteriorar dichos contadores.

Campañas publicitarias para reducir las fugas interiores: Estas campañas deben orientarse a informar al usuario del derroche ecológico que supone tener fugas interiores. Estas campañas deben ser prolonga-

das en el tiempo, tienen un coste económico relativamente elevado y es difícil de valorar la efectividad que producen.

Colocación de contadores con un bajo caudal de arranque y de clase metrológica C: La colocación de contadores volumétricos de clase C contribuiría de forma notable a la reducción de fugas interiores, ya que pequeñas fugas penalizarían económicamente a los usuarios con lo cual éstos mismos tenderían a solventar dichas fugas. Evidentemente para la mayoría de abastecimientos resultaría económicamente inviable una sustitución en masa de su parque de contadores. Así pues la selección de las subpoblaciones de contadores a sustituir se deberían realizar según los siguientes criterios:

- Contadores de clases metrológicas A y B con cierta antigüedad.
- Contadores de viviendas con instalaciones de cierta antigüedad, ya que presentarán un mayor riesgo de fugas interiores.
- Contadores de viviendas con presiones elevadas ya que las fugas se incrementan con el aumento de la presión.

Muestreo de caudales nocturnos en domicilios de los abonados: Siempre que la instalación lo permita se podrían medir los caudales nocturnos (de forma externa al domicilio y sin molestias a los abonados) en domicilios propensos a tener fugas interiores. En caso de detectar caudales sospechosos se podría ofrecer al abonado la posibilidad de inspección de su instalación para hallar la fuga interna y así pueda proceder a su reparación.

Colocación de dispositivos "Reductores de flujo no medido (UFR)": Existen unos dispositivos que no permiten el paso de caudales bajos (cierran el paso) en las tuberías donde se encuentran instalados. Dichos dispositivos se colocan en serie aguas arriba de los contadores de los abonados. Estando cerrados sólo permiten el paso de caudal cuando la diferencia de presión entre la entrada y salida del dispositivo es de aprox. 0,4 bar. La presión necesaria para mantenerlo abierto es de 0,1 bar. A continuación se expone el principio de funcionamiento de dichos dispositivos.

Estos dispositivos no tienen un uso generalizado en España, por lo tanto no se disponen de experiencias contrastadas a nivel nacional. En todo caso se pueden resumir sus ventajas e inconvenientes como:

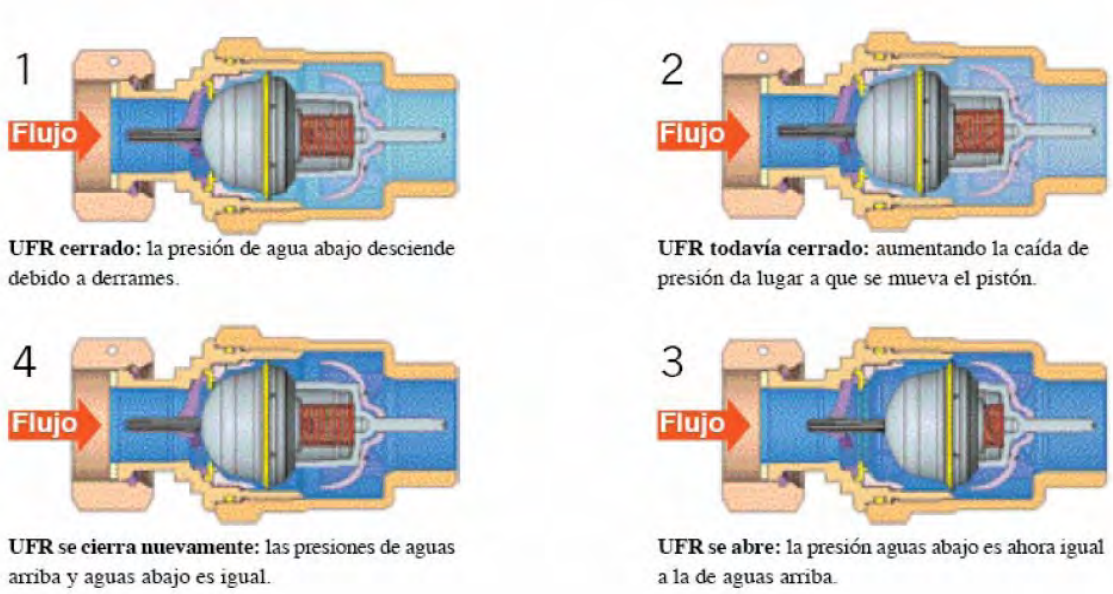
Ventajas:

- Permiten reducir el volumen no registrado debido a fugas interiores y subcontajes entre un 5-10%.

Inconvenientes:

- Introducen una pérdida de carga adicional en el sistema (1,1 mca a 1000 l/h).
- Con el tiempo se pueden producir atascamientos del pistón que pueden inutilizar su función en incluso llegar a obturar el paso de agua al abonado.
- Adición de un elemento que requiere mantenimiento.

Figura 28. Funcionamiento de dispositivo reductor de flujo



UFR cerrado: la presión de agua abajo desciende debido a derrames.

UFR todavía cerrado: aumentando la caída de presión da lugar a que se mueva el pistón.

UFR se cierra nuevamente: las presiones de aguas arriba y aguas abajo es igual.

UFR se abre: la presión aguas abajo es ahora igual a la de aguas arriba.

Definición clara e inequívoca del punto límite entre la propiedad del abonado y la de la empresa de abastecimiento: El punto límite entre la propiedad del abonado y la empresa de abastecimiento debería estar siempre en el exterior del bloque de pisos o viviendas de los abonados. Si se producen fugas dentro de los bloques de pisos, estas deberían ser corregidas siempre por los abonados ya que la compañía abastecedora no tendrá posibilidad de realizar reparaciones en las conducciones interiores. Así pues la ubicación física de los contadores convendría que estuviera siempre en los puntos límite de propiedades (compañía-abonados)

En todo caso, todas estas medidas ayudarán a minimizar las fugas interiores, pero las empresas abastecedoras deberán calcular el importe económico necesario para ponerlas en marcha versus el beneficio real obtenido por la reducción de dichas fugas.

Existirían otras medidas que se podrían aplicar pero para ello sería necesaria la implicación de administraciones públicas y fabricantes de aparatos domésticos de agua potable:

Penalizaciones por consumos a bajo caudal: Esto significaría que las tarifas deberían contener un concepto de penalización por consumos a bajo caudal (por ejemplo Q<30 l/h). Esto también obligaría a las empresas abastecedoras a la colocación de contadores de clase metrológica C y pequeños caudales de arranque para poder controlar dichos caudales.

Fabricación de aparatos domésticos de agua potable eficientes: Por ejemplo, las cisternas de los inodoros deberían regular su llenado a través de válvulas todo-nada. Otra medida interesante sería la generalización en el uso de griferías monomando para reducir las fugas por goteos.

4.3.3.8. Evaluación de la precisión de la medida en caudalímetros y contadores en alta

En el caso de caudalímetros ultrasónicos y electromagnéticos las imprecisiones en la medida suelen ser bastante bajas (< 2% en la zona lineal de trabajo). No obstante a partir de velocidades de paso del agua inferiores a 0,5 m/s esta imprecisión aumenta y por regla general para velocidades de paso inferiores a 0,2-0,3 m/s los fabricantes no aseguran el valor de la imprecisión. Así pues, un buen dimensionamiento del diámetro de estos caudalímetros deberá evitar velocidades de paso inferiores a 0,3 m/s para que trabajen en zonas de buena precisión.

Un problema añadido que tienen los caudalímetros y contadores utilizados en la distribución en alta y de diámetros nominales superiores a 400 mm es que por regla general no pueden calibrarse. Los motivos de este hecho se deben a:

- A nivel nacional no existen torres de calibración que puedan dar estos servicios a diámetros elevados, con lo cual obliga a las empresas que disponen de estos caudalímetros a bien disponer de una instalación con torre de calibración propia o bien a llevar el caudalímetro a instalaciones en el extranjero con el consecuente elevado gasto económico.
- Asimismo el tener que retirar caudalímetros de diámetro importante para su calibración, obliga a complicadas maniobras en la operación, ya que están colocados en tuberías de transporte que abastecen a un gran número de personas. Además esta operación tiene un elevado coste económico.

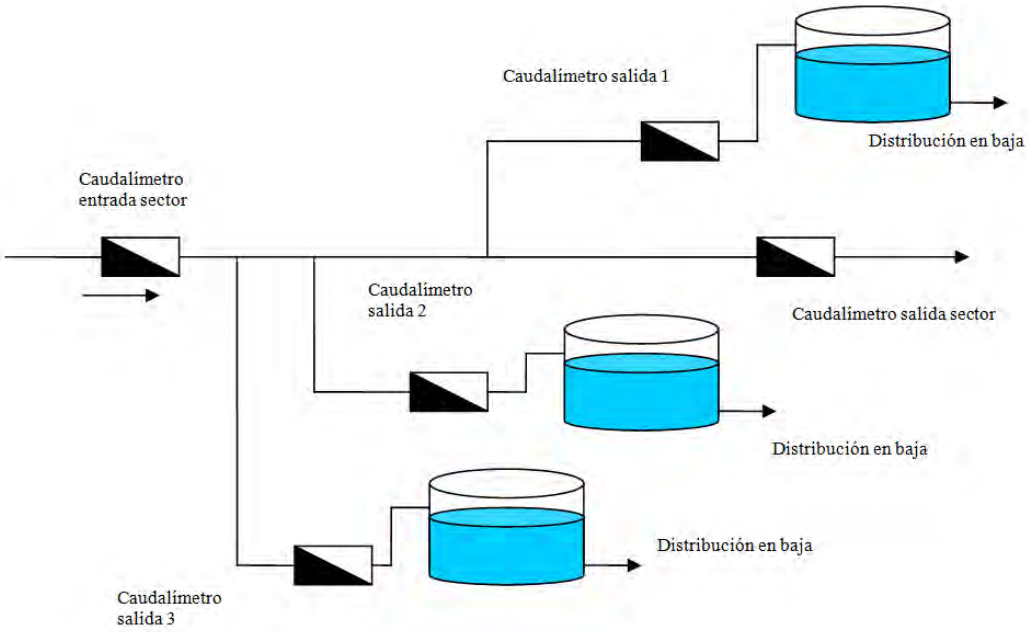
Así pues en un caudalímetro en alta, la calibración periódica es una opción difícil y económicamente inviable. Es preferible en la mayoría de los casos la substitución por un equipo nuevo.

Por ello, a continuación se exponen un par de métodos que pueden dar información e indicios a las empresas abastecedoras en alta acerca de la “buena“ o “mala“ precisión de la medidas de sus caudalímetros.

Evaluación estadística de la imprecisión en caudalímetros y contadores en alta

El siguiente método consiste en modelizar los volúmenes circulantes por sectores de red en el cual hay interconectados varios medidores de caudal. Este método tiene especial aplicación en el caso de caudalímetros de distribución en alta, donde no se pueden aplicar patrones para medir su imprecisión. Habitualmente la distribución en alta presenta una distribución similar al siguiente esquema:

Figura 29. Esquema de distribución



En ausencia de fugas, consumos ilegales o imprecisiones de los medidores debe cumplirse el siguiente balance de masas:

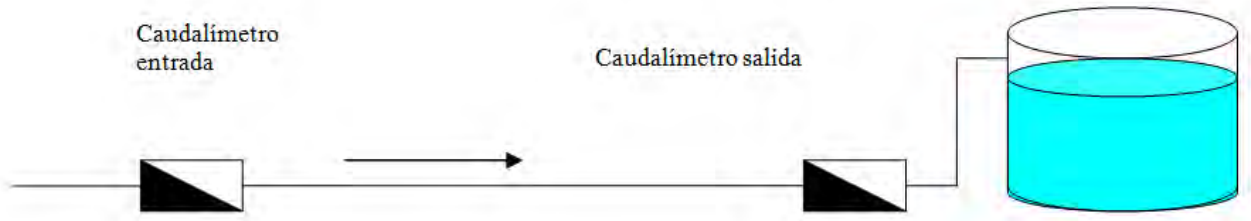
$$Volumen\ de\ Entrada\ = \sum Volúmenes\ de\ salida$$

Para aplicar el método de modelizado de la red se hacen 3 suposiciones:

- Existe un correcto mantenimiento tanto mecánico, eléctrico y de programación de los caudalímetros. Esto asegurará una minimización de los errores sistemáticos. Esta primera suposición es muy importante ya que no se dispone de patrones para calibrar este tipo de caudalímetros (suelen ser electromagnéticos o ultrasónicos).
- Los errores aleatorios (repetibilidad del instrumento) siguen una distribución normal o gaussiana.
- Los errores aleatorios de los distintos instrumentos no tienen correlación entre ellos.

Para una mejor comprensión del método simplificaremos el modelo. Supondremos que tenemos un sector tal como el siguiente:

Figura 30. Esquema de distribución simplificado



El modelo que relaciona estos dos caudalímetros es:

$$V_e(t) = k \times V_s(t) + M$$

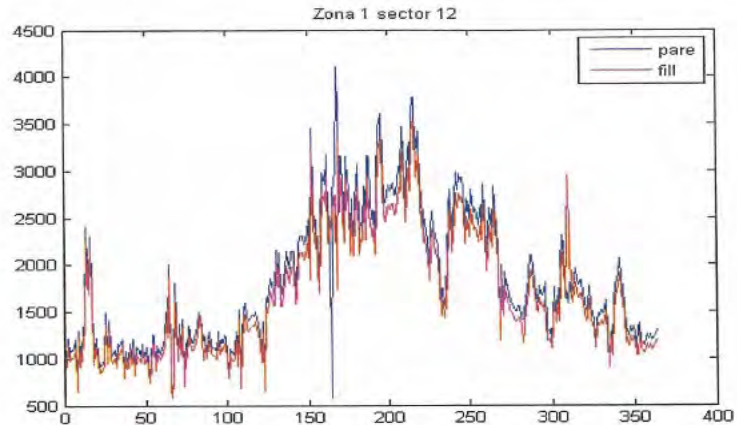
Siendo:

- $V_e(t)$ = Volumen totalizado diario de entrada
- K = Coeficiente de regresión lineal
- $V_s(t)$ = Volumen totalizado diario de salida
- M = Intercepto sobre el eje vertical

Este modelo se hallará a partir de la técnica estadística de los mínimos cuadrados (rectas de regresión). Para ello se debe disponer de los volúmenes totalizados diarios de los 2 caudalímetros. Estos volúmenes sin filtrar se llamarán datos brutos.

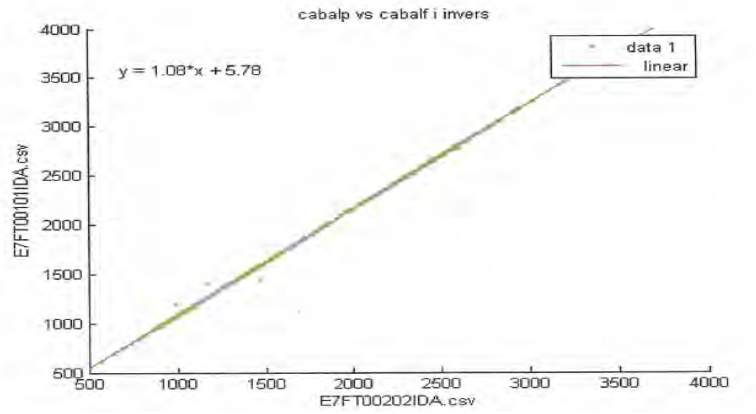
En la figura 13 se puede observar un ejemplo de totalizados de 2 caudalímetros durante un año entero:

Gráfico 13. Caudal anual registrado por dos caudalímetros



Si graficamos dichos volúmenes totalizados en un diagrama XY de dispersión se obtiene la siguiente recta de regresión lineal:

Gráfico 14. Regresión lineal de volúmenes totalizados

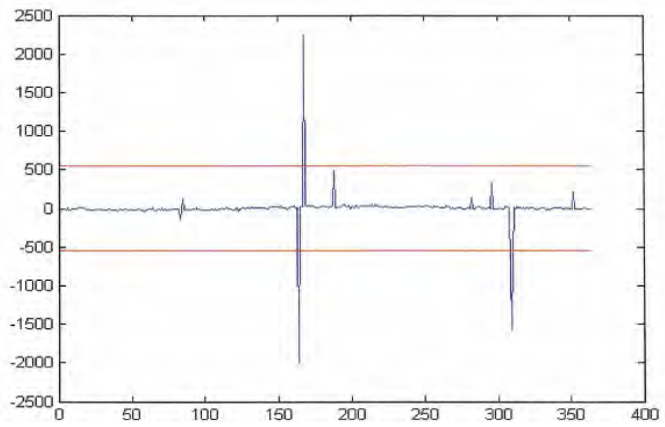


El modelo obtenido será: $V_e(\text{estimado}) = 1{,}08 \times V_s(t) + 5{,}78$

El error de estimación será: $\varepsilon_e = V_e(t) - V_e(\text{estimado})$

Si se analiza estadísticamente el error de estimación se obtiene un valor medio igual a cero (εe=0) y una desviación estándar (σε). Si se adopta un intervalo de confianza del 95% (±2 σε), de esta forma se pueden detectar aquellos valores atípicos ("outliers") o valores diarios inexistentes ("agujeros"). A continuación se grafica el error de estimación con los datos en bruto a lo largo de los 365 días del año:

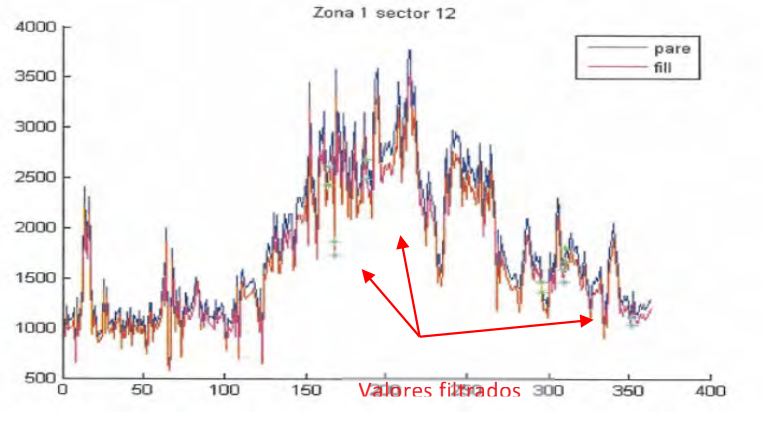
Gráfico 15. Error de estimación anual



A partir de la gráfica anterior se pueden detectar aquellos valores atípicos (están por encima o por debajo de las líneas rojas ±2 σε). Una vez detectado estos valores se suprimen y se sustituyen interpolando linealmente entre el valor de volumen totalizado anterior y posterior a dicho valor.

Esta operación se conoce con el nombre de filtrado. Con los datos filtrados volveríamos a repetir las gráficas anteriores y volveríamos a calcular la recta de regresión:

Gráfico 16. Caudal anual registrado filtrado

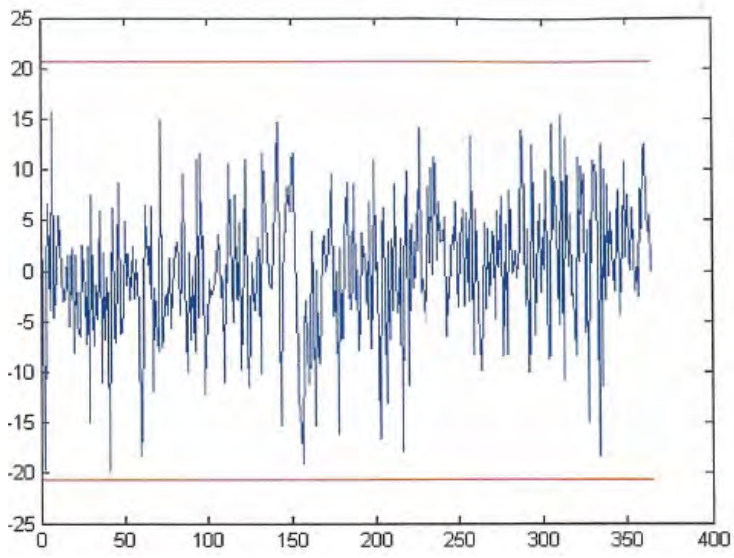


En este ejemplo la nueva recta de regresión coincidiría con la expuesta anteriormente

$$V_e(\text{estimado}) = 1{,}08 \times V_s(t) + 5{,}78$$

Si se grafica de nuevo el error, se puede observar como ya no existen valores fuera de las 2 rectas rojas. Estas rectas marcan el doble de la nueva desviación standard del error.

Gráfico 17. Error de estimación anual filtrado



Cada caudalímetro tendrá errores aleatorios con una determinada desviación standard:

- ε_e = Error de estimación del modelo
- σ_e = Desviación standard del error del modelo
- ε_{ent} = Error aleatorio del caudalímetro entrada
- σ_{ent} = Desviación standard del error del caudalímetro de entrada
- ε_{sal} = Error aleatorio del caudalímetro salida
- σ_{sal} = Desviación standard del error del caudalímetro de salida

Para valores de K≈1 se cumple que: $\sigma_{ent} \approx \sigma_{sal} \approx 0{,}7071\ \sigma_e$

A partir de este momento ya se pueden calcular las imprecisiones de cada uno de los caudalímetros implicados:

$$Imprecisión\ caudalímetro\ entrada\ (\%) = \frac{2\ \sigma_{ent}}{Media\ (V_e)} \times 100$$

Estos valores obtenidos de la imprecisión de los caudalímetros se pueden comparar con las curvas de precisión especificadas por los fabricantes de dichos caudalímetros.

Así pues con este método se puede conseguir:

- Filtrado de los datos de volúmenes totalizados diarios, desechando aquellos valores fuera del rango $\pm 2\sigma_\varepsilon$
- Cálculo de las imprecisiones de medida de los caudalímetros que conforman el sector.
- A partir de la ecuación de regresión lineal se pueden dar los siguientes casos:

  - Si K≈1 y M≈0 se puede concluir que hay una buena precisión en la medida y no hay fugas intermedias.
  - Si K>>1 y M≈0 posiblemente se trata de un desajuste en la calibración de uno y/o los dos caudalímetros.
  - Si K≈1 y M>>0 posiblemente de trata de fugas intermedias entre los 2 caudalímetros.
  - Si K<<1 y M<<0 posiblemente se trata de un desajuste en la calibración de uno y/o los dos caudalímetros, aparte de posibles fugas intermedias.

- Este método tiene especial aplicación en distribución en alta cuando no se dispone de patrones para poder hallar las imprecisiones de los caudalímetros.

Contraste de las medidas en caudalímetros y contadores en alta

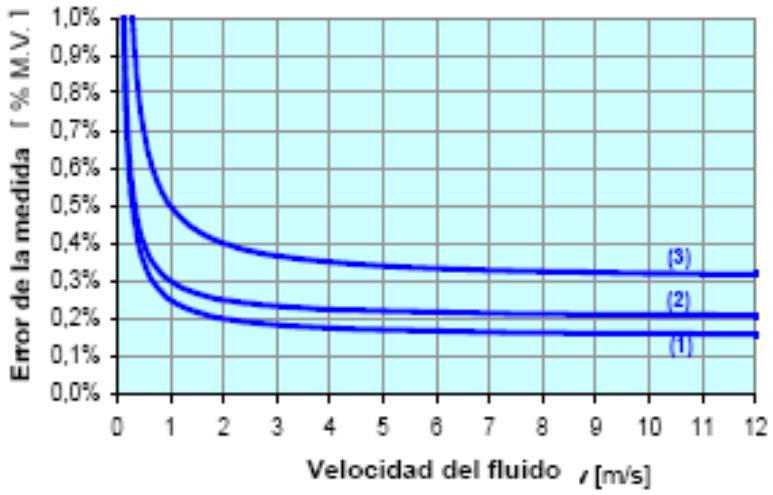
En la distribución en alta para la medición de los caudales y volúmenes circulantes se suelen utilizar mediante 3 tipos de tecnologías de instrumentos:

Caudalímetros electromagnéticos: Tienen una elevada precisión. Típicamente tienen los siguientes valores de imprecisión:

- Velocidades del agua entre 1-12 m/s: ±0,15%-±0,3% del VM (valor medido)
- Velocidades del agua entre 0,3-1 m/s: Hasta un máximo de ±1,5% del VM
- Velocidades del agua inferiores a 0,3 m/s: Los fabricantes no especifican los errores

A continuación se adjunta una curva típica de precisión/error de un caudalímetro electromagnético:

Gráfico 18. Precisión/error de un caudalímetro electromagnético



Se grafican 3 modelos de caudalímetros electromagnéticos con 3 valores de error (±0,15%;±0,20;%; ±0,30;%). Los fabricantes siempre referencian estas curvas de precisión/error a las condiciones de la norma EN 29 104 (se especifican parámetros tales como rango de temperatura del agua, conductividad mínima, variación de tensión de alimentación, temperatura ambiente, etc…)

Caudalímetros ultrasónicos: Son más precisos que los contadores mecánicos pero menos que los caudalímetros electromagnéticos. Típicamente tienen los siguientes valores de imprecisión:

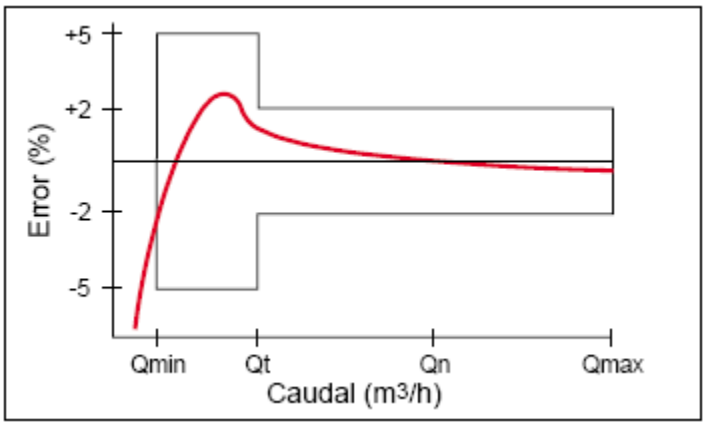
- Velocidades de agua entre 0,7-10 m/s: ± 0,5%-±2% del VM (valor medido)
- Velocidades de agua entre 0,3-0,7 m/s: Entre un máximo de ±2,5%-±3,5%
- Velocidades de agua inferiores a 0,3 m/s: Los fabricantes no especifican los errores.

Las curvas de precisión/error de estos caudalímetros tienen la misma forma que la de los caudalímetros electromagnéticos pero con los umbrales de velocidad especificados en estas líneas.

Contadores mecánicos tipo Woltmann: Este tipo de contadores tienen también las mismas clases metrológicas que los contadores domésticos). Son más imprecisos que los caudalímetros electromagnéticos y ultrasónicos.

La curva de precisión/errores típica de este tipo de contadores serán parecidas a la que sigue:

Gráfico 19. Curva de precisión/error



Los caudalímetros electromagnéticos y ultrasónicos deben ser periódicamente sometidos a unos tests donde se verifica el correcto funcionamiento eléctrico y electrónico. Este mantenimiento es esencial, de todas formas de esta forma no se puede asegurar la correcta medida de dichos instrumentos. Para ello sería necesario disponer de caudalímetros patrón para poder realizar una calibración, o bien extraer los caudalímetros de su ubicación física y trasladarlos hasta una torre de calibración (opción antieconómica como ya se ha comentado anteriormente).

Existe una alternativa que consiste en instalar un caudalímetro ultrasónico portátil de colocación externa en serie con el caudalímetro a verificar. Es importante destacar que esta comparación entre caudalímetros no sirve en absoluto para calibrar el caudalímetro objeto de la verificación; simplemente es un "contraste entre medidas". Los caudalímetros ultrasónicos portátiles tienen una imprecisión típica en su zona lineal entre ± 1,5%-± 2% en cambio en el caso de los caudalímetros electromagnéticos las imprecisiones típicas en su zona lineal será entre ± 0,15%-± 0,30%.

A la hora de colocar en serie un caudalímetro ultrasónico portátil con cualquiera de los 3 tipos de tecnologías se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El caudalímetro ultrasónico portátil debe estar debidamente calibrado con su correspondiente certificado. Generalmente esta calibración se realiza una vez al año.
- Se deben respetar escrupulosamente las distancias aguas arriba y aguas debajo de tuberías libre de elementos singulares (válvulas, codos, reducciones, etc…) respecto la colocación de los transductores ultrasónicos. Generalmente los fabricantes recomiendan unas distancias mínimas de 10D (aguas arriba) y 5D (aguas abajo). De todas formas para obtener una mayor precisión, y en caso de disponer espacio, es aconsejable aumentar estas distancias.

- Los lugares de colocación de los transductores ultrasónicos externos deberían estar marcados en la tubería; incluso si es posible con algún tipo de acoplamiento mecánico. Esto permitirá que las sucesivas medidas se realicen siempre en el mismo lugar.
- Se debe conocer con bastante exactitud el espesor y naturaleza del material de la tubería donde se realiza la medición. Se debe tener en cuenta que errores en el espesor de milímetros, producen importantes errores en la medición del caudalímetro ultrasónico.
- Ya que la medida se realiza con un solo haz de ultrasonidos, es importante garantizar que la sección de la tubería es circular en el punto donde se colocan las sondas. Si la tubería se ha deformado y la sección no es circular, el error del equipo puede ser muy importante.
- Se deben registrar los parámetros de configuración tanto del caudalímetro ultrasónico como del medidor a verificar. Esto permitirá que las sucesivas medidas se realicen siempre en las mismas condiciones.
- El contraste se realizará sobre los volúmenes totalizados en un periodo de tiempo determinado de ambos medidores (caudalímetro ultrasónico y medidor a verificar). El tiempo mínimo de contrate debería ser de 1 hora, aunque para grandes diámetros (grandes volúmenes) este tiempo se debería incrementar.
- Se debería poder conocer los periodos de tiempo en que el agua circuló a una velocidad inferior a 0,5 m/s, ya que en esta zona el error de imprecisión empieza a ser importante en caudalímetros electromagnéticos y ultrasónicos.

Para el caso de contraste de caudalímetros (fijos en la instalación) con un caudalímetro ultrasónico (portátil) se puede aceptar como normal que la discrepancia entre medidas sea inferior ±4%. A partir del ±4% de diferencia, se tendrían que investigar las causas que han propiciado dicho desvío (siempre que se hayan cumplido las condiciones anteriormente expuestas).

Así pues se puede concluir que el método expuesto en este punto sirve para detectar derivas en la precisión de caudalímetros y medidores de distribución en alta. Este método no sirve para calibrar dichos medidores. A continuación a modo de ejemplo se aneja una hoja de contraste de un caudalímetro electromagnético con un ultrasónico portátil:

Protocol dels cabalímetres Xarxa Distribució Zona

C.1 Tipus: CONTRAST DE MESURES.

CERTIFICAT DE VALIDACIÓ CABALÍMETRE ELECTROMAGNÈTIC. Tipus: KROHNE OPTIFLUX / AQUAFLUX I CONVERTIDOR IFC010 / 110 / 300.

Identificació Cabalímetre			
Descripció	**Número**	**Marca**	**Model**
Identificació TAG (NAVISION)	H4FT09201	----------	AQUAFLUX
Identificació local capçal	1256789JK	KROHNE	AQUAFLUX
Identificació local unitat electrònica	YT6789JK	KROHNE	IFC 110
Identificació Estació			
TAG	H4-92		
Descripció	PRESA DIRECTA DERIVACIÓ PALLEJÀ (DN300)		
Validesa de certificat (d'un any a partir de la data de verificació)			
Periodicitat comprovació	Cada .....1..... any. (anual)		
Data de comprovació	15/01/2009		
Certificat vàlid fins a	15/01/2010		

Equip de comparació: (Lapse de temps mínim 1 hora)

Instrumentació emprada			
	Descripció	**Número de sèrie o altra identificació**	**Data de validesa de calibratge**
1	Cab. Ultrasònic.	Minisonic Ultraflux 535	Fins 19/11/2009
	Electromagnètic Q=m3	**Ultrasònic Q=m3**	**Diferència =<4%**
	179	176	1.70%
	Mesura totalitzat	**Mesura totalitzat**	**Valor requerit: OK**
	Data i hora d'inici i final	28/01/2009 12:23h	28/01/2009 13:44h

Σ%= [(Qf - Qc) / Qc]*100

5

CONCLUSIONES

A modo de conclusión final, resaltar, que por encima de todo, la clave de cualquier acción que queramos emprender, descansa en la necesidad de medir.

MEDIR → **CONTROLAR** → **GESTIONAR**

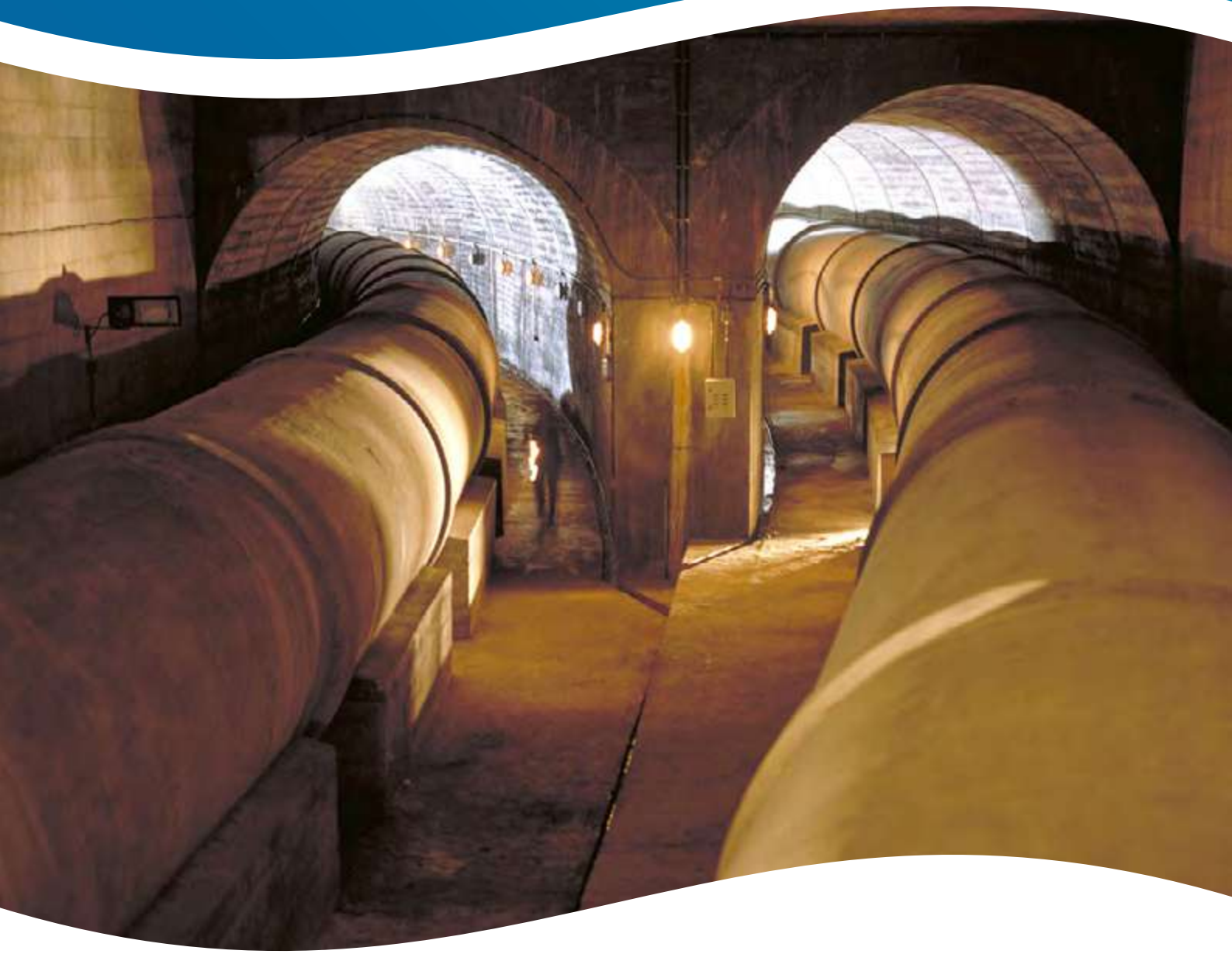
Si medimos, tendremos conocimiento de lo que ocurre y seremos capaces de controlar nuestros procesos, para a partir de ahí, hacer una gestión correcta y lo más eficaz y eficiente posible. Partiendo de esta base, una visión estratégica del problema que nos permita conocer la demanda de los diferentes grupos de usuarios y una continuidad en el tiempo de las medidas de control, seguimiento y actuación, nos llevará a enfrentarnos con éxito al reto de la reducción del ANR y de las pérdidas, aumentando con ello la eficiencia de nuestro sistema. Este debe ser, en definitiva, el objetivo último de cualquier empresa abastecedora que esté realmente comprometida con un enfoque eficiente del recurso agua..

6

BIBLIOGRAFÍA

- Internacional Water Association Performance Indicators
- Manual de Indicadores de Gestión para abastecimientos de agua (AEAS Mayo de 2005)
- Documento Guía para el Control del Agua No Registrada (AEAS Octubre de 2003)
- Tecnología Sahara. http://www.wrcplc.co.uk/wrc-sahara.aspx. WRc plc.
- Tecnología Smartball. http://www.puretechltd.com/platforms/smartball. Pure Technologies
- Tecnología basada en gases trazadores. Aqualogy
- Gestión Integral de Contadores de Agua. Autores: Francisco Arregui de la Cruz, Enrique Cabrera Rochera y Ricardo Corbacho Jordán. Editado en 2007 por el Instituto Tecnológico del Agua. ISBN 84-608-0539-5
- Precisión de la medida de los consumos individuales de agua en la Comunidad de Madrid. http://www.canalgestion.es/es/galeria_ficheros/comunicacion/publicaciones/Cuaderno8_IxDxi.pdf. Canal de Isabel II, 2010.

GUÍA MANTENIMIENTO Y REPARACIÓN DE GRANDES ARTERIAS



COMISIÓN 3.ª
REDES DE ABASTECIMIENTO

Aeas
Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento



Índice

1. Objeto y campo de aplicación 7

2. Tipología de materiales utilizados en la construcción de arterias 9

3. Estado de las grandes conducciones. Necesidad de evaluación del estado de las grandes arterias 10

3.1. Problemática y modos de fallo 10
3.1.1. Tuberías de acero 12
3.1.2. Tuberías de fundición dúctil 12
3.1.3. Tuberías de fundición gris 12
3.1.4. Tuberías de hormigón armado 13
3.1.5. Tuberías de hormigón pretensado 19
3.1.6. Tuberías de PRFV 21
3.2. Mantenimiento y control de la corrosión 21
3.2.1. Corrosión externa en zonas aéreas y en arquetas inundables 22
3.2.2. Riesgos de corrosión externa y corrientes vagabundas en tuberías enterradas 22

4. Métodos de inspección y evaluación 24

4.1. Inspección visual 24
4.1.1. Inspección de circuito cerrado de televisión (CCTV) 24
4.1.2. Escaneo láser 25
4.2. Métodos electromagnéticos 25
4.2.1. Dispersión del flujo magnético (MFL) 25
4.2.2. Prueba de corrientes parásitas de campo remoto (RFEC) 26
4.2.3. Electromagnetismo de banda ancha (EMBA) 27
4.2.4. Prueba de corrientes parásitas pulsadas (PEC) 27
4.2.5. Radar de penetración en el suelo (GPR) 27
4.3. Métodos acústicos 28
4.3.1. Sistema de perfiles mediante sonar 28
4.3.2. Impacto-Eco 28
4.3.3. Métodos acústicos internos y externos para detección de fugas de tuberías de gran diámetro 29
4.4. Métodos de ultrasonidos 33
4.4.1. Ultrasonidos de onda guiada 33
4.4.2. Ultrasonidos discretos 34
4.4.3. Tecnología Transductores multi-elemento o “Phased Array” 34
4.4.4. Inspección UT combinada 35
4.5. Otros métodos 35
4.5.1. Métodos radiográficos 35
4.5.2. Métodos de termografía 36
4.5.3. Método del trazador de gas 37
4.5.4. Conductividad de bajo voltaje 39
4.5.5. Detección de fugas por satélite 40

5 Tecnologías de inspección para tuberías de hormigón y metálicas 45

5.1. Inspección de tuberías de hormigón 45
5.1.1. Tecnología electromagnética 45

5.1.2. Tecnología electromagnética para identificar espesor y corrosión de las camisas ... 60
5.2. Inspección de tuberías metálicas ... 61
5.2.1. Inspección electromagnética ... 64
5.2.2. Inspección ultrasónica ... 66

6. Estrategias de gestión con las roturas ... 70

6.1. Protección, inspección y supervisión ... 70
6.2. Decisiones estratégicas de apoyo ... 70
6.3. Rehabilitación y sustitución ... 71
6.4. Metodología detallada de FEA (análisis de elementos finitos) ... 72

7. Sistemas de reparación, rehabilitación y reemplazo ... 76

7.1. Introducción y resumen de sistemas ... 76
7.2. Polímeros reforzados con fibra ... 85
7.3. Entubado continuo con tubería de diversos materiales ... 101
7.3.1. Entubado continuo simple / con espacio anular ... 101
7.3.2. Entubado contínuo ajustado/sin espacio anular ... 102
7.4. Proyección de cemento (cement mortar lining) ... 106
7.5. Rehabilitación continua estructural con tubería flexible reforzada (Kevlar) ... 109

8. Normativa de aplicación ... 112

9. Tuberías de acero ... 116

9.1. Introducción ... 116
9.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación ... 116
9.2.1. Corrosión y protección catódica externa de tuberías enterradas de acero ... 116
9.3. Experiencias ... 118
9.3.1. Experiencia N.º 1 – Rehabilitación con manga continua ... 118
9.3.2. Experiencia N.º 2 – Rehabilitación interior con fibra de carbono ... 123
9.3.3. Experiencia N.º 3 – Refuerzo exterior con fibra de carbono ... 126
9.3.4. Experiencia N.º 4 – Encamisado con tubería de fundición dúctil ... 128
9.3.5. Experiencia N.º 5 – Rehabilitación con Primus Line ... 133

10. Tuberías fundición dúctil ... 138

10.1. Introducción ... 138
10.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación ... 142
10.3. Experiencias ... 142
10.3.1. Experiencia N.º 1 ... 142
10.3.2. Experiencia N.º 2 ... 143

11. Tuberías fundición gris ... 144

11.1. Introducción ... 144
11.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación ... 145
11.3. Experiencias ... 146
11.3.1. Experiencia N.º 1 – Refuerzo exterior con fibra de carbono ... 147
11.3.2. Experiencia N.º 2 – Rehabilitación interior con tecnología primusline ... 152
11.3.3. Experiencia N.º 3 ... 155
11.3.4. Experiencia N.º 4 ... 157
11.3.5. Experiencia N.º 5 ... 157

12. Tuberías hormigón armado ... 159

12.1. Introducción ... 159
12.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación ... 163
12.2.1. Corrosión y protección catódica de tuberías enterradas de hormigón armado ... 163
12.3. Experiencias ... 163
12.3.1. Experiencia Nº 1 – Reparación juntas fibra de vidrio y refuerzo estructural fibra de carbono ... 163

13. Tuberías hormigón pretensado 173

13.1. Introducción 173
13.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación 175
13.3. Experiencias 175
13.3.1. Experiencia Nº 1 – Reparación y rehabilitación interior con fibra de carbono 175

14. Tuberías PRFV 185

14.1. Introducción 185
14.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación 188
14.2.1. Generalidades 188
1.2.2. Corrosión y protección de piezas especiales de acero 189
14.3. Experiencias 189
14.3.1. Experiencia Nº 1 – Reparaciones puntuales 189
14.3.2. Experiencia Nº 2 – Reparaciones puntuales 191

15. Monitorización 195

15.1. Monitorización de la presión y mitigación de los transitorios 195
15.2. Monitorización acústica de rotura de espiras 196

Bibliografía 201



1 Objeto y campo de aplicación

En todo sistema de abastecimiento, las conexiones de las captaciones con las estaciones de tratamiento, depósitos de cabecera, y red de distribución, se realizan mediante tuberías de gran diámetro, generalmente denominadas arterias.

Las arterias de un sistema de abastecimiento constituyen la red estratégica para mantener la carga hidráulica, y, por tanto, las condiciones de caudal y presión en la red de distribución.

Actualmente, la mayoría de las empresas de abastecimiento tienen la red dividida en sectores, y los sectores se alimentan por las grandes conducciones o arterias reseñadas.

La carga hidráulica, y las condiciones de caudal y presión en los sectores de la red de distribución es proporcionada por las grandes conducciones. El estado de conservación, y por ende la vida útil de una gran conducción depende de factores externos que han podido afectar la capacidad estructural de la tubería, como, por ejemplo, fenómenos de corrosión, asientos diferenciales del terreno, ataques químicos como carbonatación, presencias de corrientes vagabundas, especialmente cerca de líneas eléctricas, o vías de FFCC electrificadas, mal drenaje de la zanja en la instalación de la tubería, etc.

Generalmente, son las roturas de las tuberías de hormigón pretensado y fundición gris, las que registran los caudales más elevados, y esto es debido a que la sección de la rotura supone una parte muy importante de la sección de la conducción.

Las grandes tuberías, cuando se construyeron, habitualmente discurrían por zonas no urbanizadas, en mitad del campo, y en bastantes casos, por el desarrollo urbanístico han quedado integradas dentro de la ciudad.

A continuación, expondremos procedimientos preventivos de mantenimiento y de reparación de las grandes conducciones, algunos de ellos de muy reciente aplicación en España, como consecuencia de la dificultad de renovación de una gran conducción o arteria que ha quedado en zonas de difícil tránsito, como tramas urbanas con gran densidad de viviendas, cruces de vías de comunicación con altas densidades de tráfico, profundidad importante al desarrollarse el planeamiento.

Esta Guía, sólo pretende exponer las posibles soluciones para el mantenimiento y renovación de las arterias. Las soluciones son variadas, y cada una exigirá un estudio particularizado para determinar la más conveniente a criterio del ingeniero que esté al frente del mantenimiento de la red.

En los apartados 2 y 3 la Guía analiza los problemas que se plantean según los distintos materiales empleados en las tuberías y algunas operaciones generales de mantenimiento preventivo para evitar la corrosión de las mismas.

Los apartados 4 y 5 describen los métodos existentes de inspección y evaluación del estado de las grandes arterias.

En los apartados 6 y 7 se contemplan las estrategias de gestión de las roturas y los distintos métodos de reparación y rehabilitación existentes.

Los capítulos 9 a 14 describen las mejores soluciones de mantenimiento, rehabilitación y reparación aplicables para los distintos materiales y presentan algunos casos prácticos.

Finalmente se aborda la Monitorización y se relacionan algunas normas y referencias.

Agradecer la inestimable colaboración de otras empresas abastecedoras, de sus ingenieros, y de AEAS que ha promovido la redacción de esta Guía sin cuyo apoyo no podría haber visto la luz. Han intervenido de forma directa en la elaboración de este documento los siguientes profesionales:

Adriá Gomila
GULDAGER

David Hervás Jorge
Canal de Isabel II, S.A.

Diego V. Limones González
Canal de Isabel II, S.A.

Ferrán Bosch
XYLEM

Francesc Robles
NAVEC

Francisco Biel Sanchis
Global Omnium

Gabriel Casado Mateos-Aparicio
Canal de Isabel II, S.A.

Jon Gorriti Cabrejas
Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia

José Luis Lavilla Martínez
AQUALIA

Juan Roman Corchado Mesa
Aguas de Barcelona

Luis Cornejo García
AQUALIA

Mario Losañez
NAVEC

Miguel Ángel Pardo
HAWLE

Miguel Ángel Pérez Navarro
Saint Gobain

Pablo Duran Zafrilla
Global Omnium

Pedro Pina
XYLEM

Sergi Menéndez Olcina
Aguas de Barcelona

Xavier Barreau Orubeondo
Pipeline Infrastructure

2 Tipología de materiales utilizados en la construcción de arterias

La tipología de los materiales de los que están compuestas las arterias son fundamentalmente las siguientes:

- Fundición dúctil.
- Acero helicosoldado.
- Hormigón Armado con camisa de chapa.
- Hormigón pretensado con camisa de chapa para estanqueidad.
- Polietileno.
- Policloruro de vinilo orientado molecularmente (PVC-O).
- Poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV)
- Fibrocemento.
- Fundición gris.

De este conjunto de tipologías de materiales, la más utilizadas hasta diámetro 1000 milímetros es la tubería de fundición dúctil. A partir de diámetro 1000 mm, las tipologías más utilizadas son hormigón armado con camisa de chapa, y acero helicosoldado. En los años setenta del siglo XX, se instalaron tuberías de hormigón pretensado en un rango de diámetros que van desde 600 mm a 1600 mm.

3 Estado de las grandes conducciones. Necesidad de evaluación del estado de las grandes arterias

3.1. Problemática y modos de fallo

Canal de Isabel II realizó en el año 2016 un estudio de causas y modos de fallo en tubería, cuyas conclusiones dejó reflejadas en el *Cuaderno nº 24 de I+D+i Estudio de casuística y modos de fallo en tuberías, acometidas y conjuntos de medida de la Comunidad de Madrid*. Lo expuesto en este capítulo ha sido extraído en su mayoría de este estudio.

No hay una causa única de fallo para que se produzca la rotura de una tubería, entre las que se pueden distinguir la edad de la tubería, el estado de la misma, la instalación, las condiciones de explotación, agentes externos, etc. En general, deben concurrir una combinación de algunas de estas condiciones para que se produzca el fallo.

Entre dichas causas destacan la variación de presiones o maniobras, los asentamientos del terreno y la corrosión.

En la siguiente tabla quedan recogidas las causas de fallo consideradas:

Agrupación	Número	Causas de fallo
Agentes externos a la tubería	1	Presencia de raíces
	2	Provocadas
	3	Heladas o condiciones climáticas extremas
	4	Sobrecargas extremas
Características intrínsecas del material	5	Procesos de corrosión
	6	Defectos de material
Condiciones de instalación	7	Asentamientos del terreno
	8	Defectos de instalación
Operación de la red	9	Variaciones de presión o maniobras
	10	Vibraciones o esfuerzos continuados (fatiga)

Las **características del material** fueron la causa mayoritaria de fallo, siendo la corrosión la causa principal de fallo, observándose un aumento de las roturas en zonas con presencia de tráfico pesado. Los materiales en los que mayoritariamente se pre-

sentó corrosión fueron la fundición gris, el acero y la fundición dúctil, por orden decreciente.

Un alto porcentaje de las roturas se produjo por las **condiciones de la instalación**: ausencia de cama de asiento en zanjas, presencia de escombros, defectos de alineación y ángulos forzados por ausencia de codos, ausencia de macizos de anclaje, defectos de montaje, etc. Se confirmó su importancia en la ocurrencia de las roturas, aunque no se considerara como causa desencadenante del fallo. En un alto porcentaje de los casos no se cumplían los recubrimientos mínimos en zanja especificados y en la mayoría de los casos la causa de fallo fue debida a agentes externos que la provocaron.

En los casos de estudio donde la causa de fallo fue **provocada**, se observó que la mayoría de las instalaciones no disponían de banda señalizadora.

En menor medida, se encontraron casos de rotura en zonas con rellenos procedentes de escombros, que podían provocar tensiones puntuales en la tubería o contener sustancias que favorecieran la corrosión.

También se observaron roturas en zonas donde no se cumplían las separaciones mínimas con otros servicios, provocando la presencia de corrosión externa en canalizaciones metálicas no protegidas.

Se apreció una relación de la causa de fallo de **asentamiento del terreno** con roturas en las que se había producido lavado de finos, provocando asientos diferenciales en el terreno que ocasiona el fallo de los materiales más rígidos. Los asentamientos por la presencia de arquetas cercanas constituyeron un porcentaje considerable de las roturas por esta causa, comprobándose que estos fallos apenas estaban influidos por la edad.

Las sobre cargas y la variación de presiones o maniobras fueron las causas más relacionadas con roturas en cadena, mostrando una cierta relación entre las roturas próximas.

Analizando la relación entre la causa y la localización del fallo, casi el 80% de los fallos se produjeron en la pared del tubo, independientemente de la causa que desencadenara la rotura, aunque destaca principalmente para las causas de corrosión y operación de la red.

En cuanto a la clasificación de los modos de fallo:

Número	Modos de fallo
1	Circunferencial
2	Longitudinal
3	Explosiva
4	Poro
5	Agujero > 1 cm
6	Fuga
7	Otro

La corrosión se ligó al modo de fallo en forma de agujero, al modo longitudinal, tipo poro y circunferencial. Las roturas ocasionadas por presiones o maniobras no habituales (tensiones axiales provocadas por la oscilación de presiones) se asociaron con fallos longitudinales y roturas explosivas. Se relacionaron roturas circunferenciales con fallos ocasionados por asentamientos y sobrecargas externas, pues las cargas derivadas de estas causas de fallo generan fuerzas sobre las tuberías. La literatura existente asocia el modo de fallo circunferencial con fuerzas de flexión y el modo longitudinal con esfuerzos radiales.

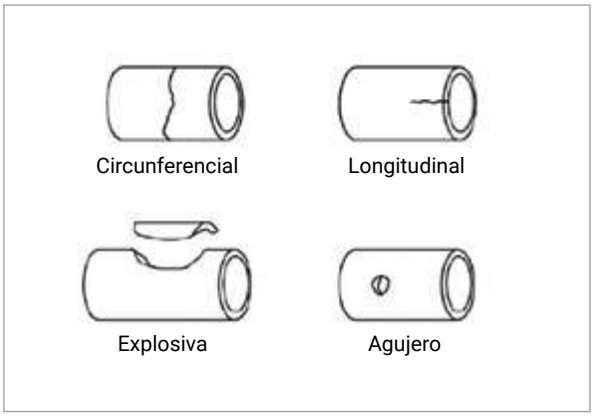


Figura 3.1. Modos de fallo en tuberías (Figuras tomadas de Federation of Canadian Municipalities and National Research Council).

Tras la clasificación del suelo de acuerdo con los parámetros y límites establecidos en el PG-3, se confirmó que el 50% de las muestras con relleno clasificado como suelo **tolerable** presentaron causa de fallo por asentamientos, y que en el 54% de las muestras con material de relleno clasificado como **marginal** o **inadecuado** por su elevado contenido en materia orgánica, el fallo se ocasionó por corrosión.

3.1.1. Tuberías de acero

La principal causa de rotura en las tuberías de acero es producida por la corrosión, con modo de fallo tipo agujero o poro, detectándose fallos en las pinturas de recubrimiento. Otro posible fallo en estas tuberías son los fallos en la soldadura.

En este material, es muy importante tener un correcto dimensionamiento del espesor del tubo, ya que un incorrecto cálculo en lo que se refiere a las presiones de trabajo de la tubería, puede hacer que la vida útil se vea reducida considerablemente.

En el caso de las tuberías enterradas de acero nuevas, es siempre más fácil y económico evitar la corrosión externa tomando medidas preventivas que verse obligado a actuar en plan correctivo con operaciones de reparación o sustitución. En estas tuberías es de importancia capital un correcto recubrimiento exterior, preferiblemente de polietileno o poliuretano. Es importante, al instalar las tuberías, cuidar en particular el revestimiento de las zonas de soldadura entre tubos. También puede ayudar en gran medida, para evitar la corrosión externa, especificar en el proyecto de las nuevas tuberías la instalación de un sistema de protección catódica, para lo que debe realizarse un estudio previo. En el caso de tuberías existentes, un sistema de protección catódica correcto puede frenar los procesos de corrosión.

En los apartados 3.2.2 y 9.2.1 se analiza con mayor detalle el tema de la protección catódica externa de las tuberías enterradas de acero.

3.1.2. Tuberías de fundición dúctil

La causa mayoritaria de fallo se produce por las condiciones de instalación, con modo de fallo circunferencial. Este material es robusto en general, pero parece mostrar un punto débil en las juntas, representando la mitad de sus roturas, principalmente debido a defectos de instalación, como ausencia de codos y macizos de anclaje.

3.1.3. Tuberías de fundición gris

El principal problema es la aparición de fugas explosivas con gran caudal de salida por la geometría de las mismas y los efectos asociados.

El origen de este problema es precisamente la geometría de los nódulos de carbono que la caracterizan, con aristas en su geometría, la que favorece la concentración de tensiones en el material. Esta concentración de tensiones es el origen de la aparición de micro roturas entre los nódulos, de tal modo que una acumulación de estas favorece la formación de líneas de rotura por perdida de resistencia, caracterizando este material como frágil y muy poco dúctil.

Otro problema que se puede observar en este tipo de tuberías es la “sudoración” a través de poros de la tubería, pero es poco frecuente.

Desde los primeros usos de este material ha habido constantes mejoras en la producción y en la propia materia prima, que han hecho que este material haya desaparecido como material para producción de tubería. Si se utiliza en fabricación de fundición para piezas, donde las solicitaciones son soportadas de mejor manera.

Los tubos primarios estaban caracterizados por grandes espesores y presencia de anillos intermedios de refuerzo, así como una evidente limitación de diámetro y longitud.

La evolución de las técnicas de producción y la mejora en la obtención de las fundiciones favoreció la ampliación de diámetros, presiones admisibles y longitud de los propios tubos.

Los calibres más habituales en este tipo de tubería no suelen exceder los 1.400 mm.

La unión de tubos y piezas desde el origen y hasta el final de los años de su instalación es muy variada, desde juntas de cuero, juntas de cáñamo y plomo o en sus últimos estadios ya juntas de goma.

Habitualmente se empleaban juntas enchufadas. Es muy poco habitual ver tuberías con otros tipos de junta, pero pueden encontrarse acerrojadas o embridadas cuando es necesario soportar esfuerzos de tracción y cuando hay que hacer conexiones con otros elementos de la red.

Otro problema importantísimo de estas conducciones es que debido a la inexistencia de recubrimientos al material base, existen gran cantidad de incrustaciones calcáreas y de óxido en las tuberías que, además, favorecen la formación de biofilm, siendo un gran problema para el mantenimiento de la calidad del agua en primer lugar, además de la pérdida de capacidad hidráulica de las infraestructuras.

Se consideran como modos de fallo los asociados a las dos principales problemáticas:

- El caso del fallo mecánico, la rotura, es el más característico de este material de base en conducciones. Se detecta de forma rápida debido a la caudalosidad de las roturas.
- El otro fallo, que permanece latente y no aflora tan fehacientemente es la formación de incrustaciones. Puede provocar perdidas de carga, taponamientos y problemas a la calidad del agua.

3.1.4. Tuberías de hormigón armado

Los fallos que se dan habitualmente sobre las tuberías de hormigón con camisa pueden ser sobre la caña de la tubería, tubuladura o bien sobre la junta.

Una rotura sobre la caña ocasionará una avería en forma de gran escape que puede tener consecuencias graves para la ciudadanía, además de un alto coste económico.

Las roturas sobre las juntas ocasionan escapes, sin llegar a una gran avería, pero pudiéndose convertir en una de este tipo si no se repara a tiempo y aumenta el nivel de degradación de la tubería. En general las roturas sobre juntas inciden únicamente sobre el rendimiento de la red.

Las ventajas de las tuberías de hormigón con camisa de chapa respecto a otros sistemas en cuanto a averías es que antes de producirse un gran escape éste se manifiesta un tiempo antes en forma de charco o pequeña fuga sobre el pavimento dando tiempo a reaccionar y reparar el tubo de forma programada sin provocar grandes afecciones a la ciudadanía. Otra gran ventaja es que se trata de un sistema que permite en muchos casos la reparación de las tuberías y piezas especiales sin necesidad de sustituir la pieza o el tramo de tubo, o incluso realizar una reparación de urgencia con ciertas garantías hasta tener el material necesario para la reparación definitiva.

Generalmente las roturas se pueden clasificar en cuatro tipologías:

- Roturas transversales.
- Roturas longitudinales.
- Roturas en las juntas.
- Roturas en las tubuladuras.

3.1.4.1. Roturas transversales

Las roturas transversales son aquellas que se producen de forma perpendicular al eje de la tubería, en general no suelen cubrir toda la sección de la tubería, únicamente se suelen partir los tubos por la zona más traccionada hasta alcanzar su fibra neutra. A este tipo de rotura en el argot de las canalizaciones se la conoce como “Tubo tronchado”.

Las roturas transversales se hacen habituales cuando el tubo se encuentra enterrado y se produce un cruce con otro elemento rígido donde queda apoyado, por ejemplo, la bóveda de un colector o un prisma de telecomunicaciones.

Esta rotura también se puede dar en los casos en que se ha producido un mal compactado de las tierras ya sea al realizar la instalación en origen o en futuras actuaciones.

Otro de los motivos podría ser cuando el tubo está empotrado en un muro, o en el entronque de una cámara de alojamiento.

El motivo de esta rotura puede ser por dos causas:

- Por una sobrepresión o golpes de ariete.
- Por efecto de la corrosión de las partes metálicas.

En ambos casos se deberá sustituir el tubo completo, con la complicación que implica esta operación. Dejando la tubería fuera de servicio por un periodo largo, se deberá hacer una gran excavación, en la mayoría de los casos proteger al personal que trabaja mediante una entibación adecuada y realizar los trabajos por personal especializado como expertos en calderería y albañilería.

En la mayoría de los casos esta rotura se produce en la zona de riñones de la tubería al ser ésta la que está sometida a mayores esfuerzos de tracción.

Otra causa de rotura es el mal compactado del terreno, dando lugar a asientos diferenciales que nos acabaran rompiendo la tubería.

Cuando se encuentre una rotura transversal, lo primero que se ha de mirar es el entorno más cercano de la tubería.

El motivo de falla más habitual es que la tubería esté apoyada sobre un punto que la rigidice o tenga apoyado algo sobre ella. Como puede ser un prisma en sentido perpendicular a la tubería o un albañal.

En estos casos es muy importante dejar una holgura entre el elemento rigidizador y la tubería. De no ser posible se cortará el tubo a lado y lado del elemento que pasa perpendicular y se unirá de nuevo el tubo con bridas tipo Arpol.

3.1.4.2. Roturas longitudinales o en ventana

Las roturas longitudinales se suelen dar en la zona de riñones de la tubería, ocasionando un agujero en forma de ventana produciendo un gran escape.

Roturas por efecto de sobrepresión o por golpes de ariete

Al producirse una sobrepresión, ésta aumenta en todo el tramo de la canalización, siendo los puntos más sensibles a rotura las uniones, puntos donde se ha manipulado anteriormente (al no conservar la tubería sus propiedades originales) y las zonas de cota más baja (en estos puntos la presión será todavía más alta). Esta sobrepresión hará trabajar más al acero, pudiendo darse el caso que este no sea capaz de soportar los esfuerzos a tracción generados por la sobrepresión llegando a romper las barras, si no se alivia el exceso de presión acabará generando un escape que irá aumentando la rotura hasta compensar la pérdida de carga generada por el escape con la superficie de acero necesaria para soportar la presión.

La sobrepresión puede dar lugar a fisuración de la capa exterior de la tubería, coincidiendo con el armado transversal, estas fisuras dejan las armaduras desprotegidas y expuestas al ambiente.

En el caso de golpe de ariete, éste actuará como una carga dinámica sobre la tubería produciendo una rotura en forma de ventana, es por ello por lo que es muy importante diseñar la tubería para soportar este efecto.

En ambos casos, estas roturas estarán originadas por fallos humanos a partir de malas maniobras o la avería de válvulas reductoras de presión.

Roturas por efecto de la corrosión

En muchos casos el origen del problema está en la fase de fabricación, cuando las exigencias de la normativa no eran tan estrictas. Todo esto acaba facilitando la corrosión de la armadura.

La corrosión también se puede dar por fisuración del hormigón quedando los armados desprotegidos, estas fisuras se pueden dar con gran facilidad sobre todo en tuberías de hasta 500 mm de diámetro interior al tener un recubrimiento exterior muy delgado y, por tanto, muy fácil de fisurarse por acción de las cargas, ya sean de presión o de las externas (tierras y tráfico).

Al producirse corrosión en la armadura, ésta disminuirá de sección, llegando al punto que no tengamos suficiente acero para soportar las solicitaciones. Es en este momento cuando se produce la rotura en forma de fisura a lo largo de la tubería, aumentando su longitud hasta compensarse la presión interna con la pérdida de carga producida por el escape y encontrar suficiente sección de acero útil para dejar de fisurarse. La rotura producida combinada con la presión interna, originan roturas en forma de ventana.

Cuando hablamos de tubo reventado, quiere decir que se ha producido una abertura significativa a lo largo de la sección de la cañería. Para que se de este tipo de avería se ha de dar el fallo del armado trasversal y de la camisa de la pieza.

Motivos para el fallo del armado:

Se puede dar por exceso de tensión de la armadura, por ejemplo, un exceso de presión o por corrosión de la armadura, si se da ésta se produce una disminución de sección de los redondos, que al estar sometidos a una carga constante, puede dar lugar a que lleguen a ser insuficientes para soportar la presión de la cañería produciendo la rotura de estos, el tipo de rotura en este caso es muy característico.

En caso de tener una avería de este tipo, deberemos contrastar varias informaciones. Cuando se den estas premisas seguiremos los siguientes pasos:

- Buscaremos el registro de presiones en el momento de la rotura y las habituales de trabajo, así como determinar la presión de timbre del tubo, ésta suele estar inscrita con pintura sobre el tubo, pero con el paso de los



Figura 3.2. Detalle de rotura longitudinal en forma de ventana, 2016 (J. Corchado).



Figura 3.3. Rotura de tubería en forma de ventana en la zona de riñones de la tubería, 2013 (J. Corchado).



Figura 3.4. Rotura por efecto de sobrepresión (D. Gómez).



Figura 3.5. Rotura longitudinal debida a la corrosión de la camisa (C. Medina).

años y la propia avería difícilmente la encontraremos, para saberla deberemos saber nº de espiras por ml (nº de redondos en sentido transversal), el diámetro de estos y espesor de la camisa de acero. Según bibliografía, la presión de rotura es 1,8 veces la presión de timbre.

- Si la rotura se da por una sobrepresión, observaremos cómo han roto las partes metálicas, ya que ésta será en forma de cizalladura.
- En los casos en que la rotura es debida al efecto de la corrosión, observaremos si encontramos presencia de ésta y el estado de las partes metálicas.
- En este caso también miraremos la profundidad de carbonatación y la presencia de posibles fisuras sobre la superficie de la tubería que puedan haber favorecido la corrosión.
- Miraremos si hay presencia de líneas eléctricas en estado dudoso o líneas de ferrocarril cercanas, para descartar que la causa del daño se dé por corrientes vagabundas. En caso de duda pueden realizarse registros de potencial para verificar la existencia de corrientes vagabundas peligrosas en la zona.
- Miraremos el recubrimiento del acero y si la tubería está instalada en una zona donde se producen cambios de humedad frecuentes como puede ser un parterre.
- También es importante saber si hay cambios bruscos en la temperatura del agua si el tubo está enterrado, ya que al estar bajo tierra la diferencia de temperatura entre el terreno y la tubería puede hacer que se produzcan condensaciones en el exterior de la tubería.
- Los cambios de humedad son muy importantes, ya que la porosidad del hormigón durante muchos años no se controló en las fábricas de este tipo de tubos como se debiera al no ser demasiado exigido por la norma. Esto da lugar a que se favorezca la corrosión de las armaduras por el efecto de la corrosión por aireación diferencial.

3.1.4.3. Roturas en las juntas

Las roturas en las juntas es la patología más común de las tuberías de hormigón, dependiendo de la solución de junta adoptada, del diámetro de la tubería, de la instalación, la explotación de la canalización y la convivencia con otros servicios por el lugar donde discurre la canalización, tendremos una vida diferente de la junta.

Hemos de recordar que las juntas son elementos que se terminan de construir en obra, por lo que no siempre habrán tenido el control necesario de la mano de obra y materiales a la hora de ejecutarlas, por tanto, el parque de juntas no será homogéneo ni tan siquiera dentro de una misma canalización. Es por este hecho que las juntas reducen mucho la calidad de la canalización.

Las juntas soldadas, igual que las retacadas, también han sufrido una evolución, siendo en este caso las más modernas de peor calidad al disponer de menor recubrimiento y la calidad del hormigón en muchos casos no es la más adecuada.

Las averías en este tipo de juntas generalmente no se producen en el aro que conforma la junta, si no en la chapa de la camisa justo al lado de la unión de éstas.

Este fenómeno está muy ligado a que el espesor de la camisa de un tubo puede ser alrededor de una cuarta parte que el de la boquilla.

El hecho de que la canalización forme largos tramos compuestos por numerosos tubos soldados entre sí hace que estos actúen como una gran viga, donde por efecto de las dilataciones/contracciones se originan grandes esfuerzos que hacen que la canalización rompa y que esto sea por uno de los puntos más débiles, en este caso la camisa, al tener menor espesor y estar debilitada por el proceso de soldadura en fábrica al unirla con la boquilla.

Otro aspecto que origina degradación de las juntas es que en tubos fabricados entre 1960 y 1970, se emplearon aceros diferentes tanto para la camisa, como para las boquillas sin cuidar la alea-

ción empleada a la hora de hacer las soldaduras. A la larga esto puede provocar corrosión de origen galvánico, provocando serios daños sobre las partes metálicas, e indirectamente al hormigón.

Otro motivo por el que se originan daños en las boquillas soldadas es el hecho que en diámetros inferiores a Ø 800 mm, la junta no es posible rejuntarla interiormente debido a la imposibilidad de que entre una persona para hacer esta operación, quedando la junta expuesta al fluido que transporta la tubería.

Cuando las juntas son soldadas miraremos el diámetro de la tubería y la longitud entre cambios de dirección y los elementos de maniobra.

Normalmente son los diámetros inferiores a 600 mm los que fallan, dando lugar a roturas al lado del cordón de la soldadura que une la camisa de chapa y la boquilla por el lado de la camisa.

El motivo de esto es que el espesor de la camisa de chapa para estos diámetros es aproximadamente de 1,5 mm y al trabajar como una larga viga la tubería no es capaz de soportar las tensiones que ocasionan las dilataciones que se dan, por ejemplo, al hacer cambios de agua superficial a subterránea o acueductos donde las variaciones de temperatura son muy elevadas y bruscas. El tubo no es capaz de absorber las tensiones y rompe por la zona más débil, coincidiendo con la que hemos recalentado al unir dos chapas con espesores muy diferentes.

3.1.4.4. Roturas en las tubuladuras

Este tipo de rotura está causada normalmente por la corrosión y pérdida de resistencia de la camisa de chapa de la zona de inserción de la tubuladura. Si a esta degradación del material se le añade un pequeño asiento diferencial, la avería está garantizada.

La rotura habitual consiste en un levantamiento de la camisa en una zona cercana a la tubuladura, lo que produce la fuga entre la conducción principal y sus ramificaciones.



Figura 3.6. Rotura de tubuladura, 2016 (J. Corchado).

Al llegar a la zona de la avería, en primer lugar, se comprobará si la tubuladura se realizó *in-situ* o si se realizó en fábrica ya que la calidad del material que la recubre puede ser muy diferente en cuanto a resistencia y porosidad.

También es muy importante ver la posición sobre la cañería en que se realizó o quedó instalada, esto nos dará una idea del tipo de esfuerzos que ha tenido que soportar.

Dependiendo de la posición, si está en la clave o en los riñones de la tubería, puede originar una rotura mayor.

Si la tubuladura está en riñones que es la zona donde suelen existir mayores esfuerzos a tracción, la rotura de la tubuladura puede ocasionar el desprendimiento de ésta casi por completo, incluso desgarrando la chapa originando una gran ventana al tubo.

Si la tubuladura está en claves, al estar en una zona generalmente comprimida, únicamente originará un escape que para que llegue a producir una gran avería deberá de alargarse mucho en el tiempo.

Cuando se den roturas sobre las tubuladuras, miraremos la posición en la que está instalada la tubuladura y el diámetro de ésta.

El diámetro nominal de la tubuladura no deberá ser mayor a 1/3 del diámetro nominal de la tubería, y deberá estar instalada perpendicularmente al eje de ésta.

De lo contrario se deberá hacer un refuerzo adicional entre la tubería y el cuello de la tubuladura.

En los casos en que la tubuladura esté instalada en zonas sometidas a tracción de la tubería, aumenta el riesgo de rotura, por lo que debemos estudiar cómo recibe las cargas y a qué esfuerzos estaba sometida antes de romper.

Otro aspecto importante es identificar si la tubuladura se realizó in-situ o si ya venía de fábrica. Generalmente las de fábrica son de mayor calidad que las realizadas in-situ, ya que están controladas por el mismo proceso de fabricación de los tubos.

La calidad de las tubuladuras in-situ, puede ser muy variable incluso entre dos realizadas en un mismo lugar y en la misma fecha, ya que durante mucho tiempo no se controlaron los morteros ni los hormigones realizados en obra manualmente.

También se mirará si la tubuladura estaba en servicio en el momento de la rotura o era un cabo sin flujo de agua, cuando tenemos cabos, es muy fácil que al hacer maniobras donde hayamos tenido un vaciado, incluso parcial, al poner en carga se acumulen bolsas de aire en estos puntos. Si esto coincide con la tubuladura, facilitará su rotura en caso de corrosión por el aumento de presión que produce el aire ocluido, además, tendremos una zona donde pasa de estar sumergida a no estarlo, siendo estos puntos propicios a la corrosión.

Por último, se revisará si existen otros elementos cercanos que rigidicen la tubería en este punto, ya que estos pueden ayudar a provocar la rotura debido a sobreesfuerzos.

Protección de las tuberías

Con el fin de aumentar la durabilidad de las tubería, es conveniente que a estas se les dote con protecciones adicionales frente a la corrosión, para ello existen diferentes posibilidades.

En los casos en que la tubería esté a la intemperie, o discurra por el interior de una galería, es muy conveniente que la tubería esté pintada con pintura anticarbonatación, con el fin de evitar el avance del frente de carbonatación y que el acero quede desprotegido frente a la corrosión.

En los casos en que la tubería enterrada esté expuesta a corrientes vagabundas, como puede ser el caso del cruce o proximidad con vías férreas electrificadas o con tuberías con sistemas de protección catódica por corriente impresa, se realizará un estudio, que suele incluir registros de potencial, para determinar cuál es la mejor solución al problema. Este tema se aborda en el apartado 3.2.2.

En el caso de tuberías enterradas con continuidad eléctrica longitudinal, un modo de detener los procesos de corrosión externa es el diseño e instalación de un sistema de protección catódica como se indica en el apartado 12.2.1.

Según los distintos casos se decidirá si es preferible un sistema de ánodos de sacrificio o de corriente impresa para lo que se seguirá lo indicado en la norma UNE-EN ISO 12696 “Protección catódica del acero en el hormigón”.

A modo de resumen, se indica que:

- Las causas de los mecanismos de degradación debidos al desconocimiento del material en épocas concretas puede ser el exceso de porosidad o falta de recubrimiento.
- Los tubos más propensos a fallar son los de diámetro ≤550 mm, al tener recubrimientos muy ajustados.
- El exceso de porosidad de tuberías fabricadas en épocas donde la normativa lo permitía provoca que los tubos sean más propensos a la corrosión.
- Cuando las tuberías discurren bajo parterres o zonas con variaciones de humedad, la degradación de la tubería se acelera, especialmente si es de bajo diámetro y con porosidad elevada.
- Cuando las tuberías están enterradas apenas sufren carbonatación.

- El origen de la degradación, o incluso el colapso del tubo en muchas ocasiones, viene dado por actuaciones en las inmediaciones de la tubería, como excavaciones propias o de terceros, o la colocación sobre la canalización de sobrecargas. Esto puede originar fisuraciones debidas a golpes o sobre esfuerzos que dejarán desprotegido al acero
- En juntas soldadas la rotura se da justo al lado del cordón de soldadura que une las boquillas, se producen frecuentemente en diámetros ≤ 550 mm y de tramos formados por tubos de 6 m, con una longitud de a partir de 100 m.
- El anillo de hormigón que disponían las juntas antiguas le daba más fiabilidad al conjunto y evitaba el desplazamiento horizontal sobre el eje de la tubería al hacer actuaciones sobre la tubería o cercanas a esta.
- El origen de las roturas es muchos casos es debida a la corrosión de las partes metálicas.
- La ovalización genera mayores momentos en la zona de riñones, por lo que el acero en esa zona cobra mucha más importancia.

3.1.5. Tuberías de hormigón pretensado

Las causas de fallo de una tubería PCCP podrían ser: un ambiente de alto contenido de cloruro, mala calidad del recubrimiento de mortero, mala calidad del cable de pretensado, un ambiente corrosivo, resistencia de empuje inadecuada, daños en la construcción, fisuras en las soldaduras del cilindro y deslaminación del recubrimiento.

La mayoría de los fallos de PCCP se deben a una pérdida de la protección contra la corrosión que conduce a la corrosión o la fragilización por absorción de hidrógeno del cable pretensado. Esto conduce a un deterioro del tubo por ruptura de cable que crece con el tiempo hasta la eventual rotura completa de la tubería. A medida que se rompe cada espira, la resistencia de cada tubo particular se reduce gradualmente.

Un resumen de los fallos de PCCP como se reporta en el informe de la Fundación de Investigación AWWA son:

- Ruptura en los cables de pretensado.
- Fugas en las uniones.
- Grietas en núcleo de hormigón.
- Baja calidad del núcleo (baja resistencia del hormigón).
- Defectos de fabricación y construcción de PCCP.
- Fisura en soldaduras de cilindros (mal ajuste).
- Cable pretensado de baja calidad.
- Envoltura excesiva del cable pretensado, espaciado demasiado cercano entre ellos, pretensado total inadecuado en la tubería o pérdida de tensión de pretensado durante la fabricación.
- Cable empalmado (pretensado total inadecuado).
- Baja calidad del mortero (baja densidad, insuficiente espesor, bajo contenido de cemento).
- Altos cloruros en el suelo (suelo corrosivo/agresivo).
- Tubería movida exponiendo la unión al medio ambiente.
- Daños en la construcción (revestimiento dañado y no reparado).
- Delaminación del Recubrimiento.
- Fragilización por absorción de hidrógeno.
- Fisuras en soldaduras de uniones.
- Presión de operación por encima de la presión de diseño.
- Carga externa excesiva (mayor que la carga de diseño).
- Recubrimiento faltante en juntas.
- Sobreesfuerzo debido a exceso de carga estática y dinámica durante la vida útil.
- Presión transitoria excesiva.

En las tuberías de PCCP de tipo ECP (embebidas), la espira de alta resistencia está arrollada helicoi-

dalmente alrededor del núcleo de hormigón. En las tuberías de PCCP de tipo LCP (revestidas), la espira está arrollada directamente en la camisa de chapa de acero. Se aplica un revestimiento de mortero rico en cemento para proteger la espira de la corrosión. La camisa de chapa de acero es la membrana impermeable frente al agua de la tubería, y proporciona algo de resistencia estructural a la tubería, en particular a las tuberías diseñadas para una presión de servicio relativamente baja. No obstante, en el caso de PCCP de presión de moderada a alta, la espira es el componente estructural primario.

El grosor del núcleo de hormigón es al menos de una dieciseisava parte del interior del diámetro del tubo. El tubo se considera que es rígido, dado que sufre deflexiones mínimas bajo la carga del terreno. El tubo se suele fabricar con boquilla hembra de acero, boquilla macho de acero y juntas de goma. La continuidad eléctrica es inherente a las PCCP de tipo LCP porque la espira está arrollada directamente a la camisa de chapa de acero. No obstante, en las PCCP de tipo ECP, puede haber presencia de flejes metálicos entre el núcleo de hormigón y la espira para proporcionar continuidad eléctrica entre las espiras. En ambos tipos de PCCP, la continuidad eléctrica entre las tuberías se consigue soldando las juntas o creando uniones en cada junta.

La degradación y las roturas de las tuberías de PCCP pueden producirse en modo circunferencial o longitudinal. La degradación del modo circunferencial se suele producir en forma de corrosión o de fragilización por hidrógeno de la espira[1]. El proceso de rotura incluye el inicio de fatiga seguido de agrietamiento y la laminación del revestimiento de mortero, que provoca que la espira de acero o la camisa de chapa embebida pueda quedar expuesta a los elementos. Se pueden producir daños en el revestimiento durante la construcción, pueden ser provocados por un tercero, por una colocación deficiente o por un asentamiento diferencial entre la tubería y el revestimiento o las estructuras. La calidad y el estado del revestimiento de mortero sobre la espira son muy importantes para proteger la espira de los elementos agresivos. La corrosión adicional puede provocar que se rompa o se agriete el núcleo de hormigón, que se produzca corrosión en la camisa de chapa de acero, así como una eventual rotura bajo la presión de servicio y la presión transitoria. Las roturas pueden o no estar precedidas por fugas, dependiendo del diseño y presiones de la tubería. Otro modo de rotura predominante es la rotura por fragilización de espiras de alta resistencia (clases III y IV) debido a la corrosión inducida por la fragilización por hidrógeno. Este tipo de rotura puede estar provocada por corrientes vagabundas debidas a los ferrocarriles electrificados, a la protección catódica por corriente impresa de tuberías enterradas cercanas o incluso a la propia protección catódica de la tubería de PCCP si es excesiva, así como a la fabricación de la espira del pretensado.

La sensibilidad a la fragilización se produce con más frecuencia en espira pretensada de mayor resistencia y se ve afectada por el proceso de fabricación, incluidas la temperatura, la velocidad y la reducción del área. La espira de clase IV es espe-

[1] La fragilización por hidrógeno es un tipo de corrosión en la cual el hidrógeno atómico se difunde en el material y se deposita en la estructura reticular del metal. El hidrógeno sufre una recombinación molecular, en particular en defectos y límites de veta en el material. El incremento de volumen asociado puede conducir a una presión interna alta y, por consiguiente, a esfuerzos a tensión internos, lo que hace frágil al material y crea grietas (llamado agrietamiento inducido por hidrógeno). Los esfuerzos a tensión internos y los esfuerzos de cargas causan la fractura por fragilización. La aparición de este agrietamiento también puede ser retrasado debido al tiempo que tarde el hidrógeno en ser incorporado. Este proceso de incorporación inhibe el deslizamiento, lo que causa que un componente se rompa prácticamente sin deformación. La fragilización por hidrógeno ocurre frecuentemente durante la soldadura y electrogalvanización de aceros debido a que se forma hidrógeno en el acero catódico. La recocción de bajo hidrógeno (templado) contrarresta esto. Con la excepción de los aceros austeníticos de alto grado, los aceros son tan susceptibles a la fragilización por hidrógeno como el titanio altamente sensible. La fragilización por hidrógeno también afecta a los grados de cobre que contienen oxígeno, que se usan en el campo de la ingeniería eléctrica. Esto resulta en grietas y cavidades.

cialmente vulnerable a este tipo de corrosión cuya fabricación en definitiva demostró, al analizar las roturas posteriores de las PCCP, que producía una espira que se deformaba con el paso del tiempo propenso a quebrarse longitudinalmente y a romperse por fragilización. Las pruebas han determinado que todas las espiras de clase IV son propensas a sufrir fragilización por hidrógeno, y algunos de Clase III podrían serlo también. Las espiras de clase I y II no suelen ser propensas a sufrir fragilización, excepto la resultante de la corrosión. En el modo longitudinal, las tuberías de presión de hormigón pueden presentar roturas debido al movimiento de la tubería originado por asentamiento diferencial, la restricción de un empuje hidráulico inadecuado, el efecto de Poisson de presión, cargas térmicas, una explosión cercana o bien cargas de vibración o sísmicas.

El proceso de rotura puede implicar que se abran las juntas o se agriete el núcleo de hormigón, o que se desgaste la camisa de chapa de acero con o sin corrosión, y que se produzca la rotura con o sin fugas previas.

Entre los mecanismos de acción dañina más típicos en las tuberías de PCCP se encuentran los siguientes:

- **Corrosión o fragilización por hidrógeno de las espiras**, lo que provoca que se rompa la espira y se pierda el pretensado. La pérdida del pretensado puede provocar agrietamiento longitudinal o circunferencial del núcleo de hormigón y desprendimientos entre el núcleo de hormigón interior y la camisa de chapa de acero.
- **La sobrecarga del tubo** puede generar un agrietamiento longitudinal cerca de la generatriz inferior o superior del tubo, o un agrietamiento del revestimiento en la línea media "springline". El agrietamiento del revestimiento hace que la espira sea propensa a la corrosión y la rotura, lo que origina la pérdida del pretensado.
- **El agrietamiento longitudinal y circunferencial del núcleo y la pérdida del pretensado** pueden permitir que la presión del agua se introduzca tras el núcleo/recubrimiento de hormigón interno y empujar la camisa de chapa de acero, lo que provoca que se separe el núcleo/recubrimiento interior de la interfaz de la camisa de chapa de acero.
- **Una inadecuada restricción del empuje** puede provocar fallos en la junta debido al movimiento del tubo, el desgaste de la camisa de chapa debido a la deformación, el desgaste de la soldadura de la boquilla macho y hembra, y el agrietamiento circunferencial del núcleo.
- **Una colocación inadecuada** puede provocar que se agriete el núcleo/recubrimiento interior de hormigón y el combado de la camisa de chapa de acero, ambos detectables visualmente, o que se agriete el revestimiento de mortero, lo que lleva a la corrosión de la espira y a la pérdida del postesado.

3.1.6. Tuberías de PRFV

A pesar de no existir una gran longitud de tuberías instaladas en este material, y el que está instalado no lleva muchos años en servicio, la causa principal de fallo se produce por asentamientos del terreno, con modo de fallo circunferencial.

También se pueden presentar problemas de corrosión en las piezas especiales de unión, por tratarse habitualmente de materiales metálicos.

En el apartado 14.2.2 se contempla la protección catódica de las piezas especiales metálicas enterradas contra la corrosión externa.

3.2. Mantenimiento y control de la corrosión

La corrosión de las instalaciones metálicas acaba inutilizándolas y obligando a complicadas y costosas operaciones de reparación o sustitución.

La evaluación a tiempo del impacto de la corrosión y ciertas operaciones de mantenimiento y

protección contra su progreso permiten adelantarse a la necesidad de actuaciones correctivas importantes.

3.2.1. Corrosión externa en zonas aéreas y en arquetas inundables

Los tramos vistos de las tuberías y estructuras metálicas en contacto con la atmósfera sufren un proceso de corrosión externa a causa de la humedad del ambiente o del contacto eventual con agua a causa de distintos motivos como pueden ser la lluvia, la condensación o la inundación de las arquetas.

En el caso más habitual de que estas tuberías y estructuras sean de acero, el único modo de evitar su corrosión son los recubrimientos, normalmente a base de pinturas, que al degradarse con el paso del tiempo deben aplicarse de nuevo periódicamente, mediante operaciones de mantenimiento.

Antes de proceder a la aplicación de las pinturas, las superficies metálicas deben someterse a un proceso de limpieza para asegurar una correcta adherencia de las pinturas de imprimación y acabado. Es fundamental una adecuada preparación de la superficie para conseguir un buen comportamiento de las pinturas. Para las tuberías de acero el abrasivo a utilizar suele ser chorro de arena o granalla de acero. El perfil de rugosidad a obtener estará comprendido entre 50 µ y 100 µ, de acuerdo con norma UNE-EN ISO 4287-1.

En algunos casos concretos, como, por ejemplo, en la transición de una tubería de enterrada a aérea o en el interior de las arquetas inundables, para proteger contra la corrosión las superficies exteriores existe la posibilidad de utilizar, en vez de pinturas, revestimientos a base de cinta de cera de petróleo y vaselina denominados en general Wax-Tape, de acuerdo con la norma AWWA C217-09 “Petrolatum and petroleum Wax Tape coatings for the exterior of connections and fittings for steel wáter pipelines”. Estos recubrimientos tienen la gran ventaja de poderse aplicar con una preparación de superficie muy sencilla a base de un simple cepillado.

3.2.2. Riesgos de corrosión externa y corrientes vagabundas en tuberías enterradas

Las tuberías metálicas enterradas, de acero o de fundición, sufren un proceso de corrosión exterior al estar en contacto con el suelo húmedo si no se protegen adecuadamente.

Para evitar la corrosión de las nuevas tuberías metálicas, al instalarlas estas se protegen exteriormente con distintos tipos de revestimientos que pretenden aislar el metal del suelo húmedo y así, si no existiesen fallos en el revestimiento, prevenir los ataques por corrosión.

En la práctica, aunque se suelen aplicar revestimientos de gran calidad, es imposible garantizar que no se producirán daños en el revestimiento tanto en la fase de instalación y enterramiento de la tubería como en la de explotación de esta, por trabajos en la zona, movimientos del terreno, raíces o envejecimiento. En los fallos del revestimiento el metal queda en contacto con el suelo y se inician los procesos de corrosión.

En las tuberías nuevas de acero que transportan agua, una buena recomendación sería complementar los revestimientos pasivos con sistemas de protección catódica tal como se hace de modo obligatorio en las tuberías de gas. En las tuberías existentes, gracias a la continuidad eléctrica longitudinal de las mismas, es posible instalar la protección catódica durante la fase de explotación para detener los procesos de corrosión ya iniciados en los fallos del revestimiento, como se verá en el capítulo correspondiente.

Sin embargo, en el caso de las tuberías de fundición habitualmente no existe continuidad eléctrica longitudinal a causa del tipo de uniones entre tubos, lo que implica que en la práctica sea muy complicado o directamente imposible la utilización de la protección catódica.

En las tuberías de hormigón armado con camisa de chapa, la protección contra la corrosión de las armaduras y de la camisa se debe a la pasivación que el pH alcalino del mortero le proporciona al acero. En el caso de que por algún motivo en las tuberías existentes se pierda esta pasividad, veremos más adelante que en ciertos casos es posible instalar sistemas de protección catódica en las mismas para frenar la corrosión externa cuando las condiciones lo aconsejan.

En las tuberías de hormigón pretensado debe evitarse todo riesgo de fragilización, por lo que la instalación de un sistema de protección catódica debe evitarse directamente o si se decide abordar este tipo de instalación, hacerlo con especial cuidado para evitar todo tipo de sobrepolarización.

En cuanto a las tuberías de PRFV, lógicamente no sufren corrosión, pero si pueden sufrir corrosión externa las piezas especiales enterradas de acero que suelen instalarse por distintos motivos en algunas zonas. Mas adelante veremos algunas soluciones posibles para estas piezas especiales metálicas.

Corrientes vagabundas

Además de la corrosión provocada por el contacto del metal con el suelo más o menos húmedo, las corrientes vagabundas, ocasionadas normalmente por la cercanía de la tubería metálica enterrada a trenes o tranvías electrificados, pueden acelerar localmente de modo importante los problemas de corrosión. También puede producirse corrosión por corrientes vagabundas si la tubería metálica enterrada está demasiado cerca del lecho de ánodos de un sistema de protección catódica por corriente impresa de otra tubería enterrada.

En las tuberías metálicas enterradas existentes, cercanas a algún foco de corrientes vagabundas, es posible que existan riesgos importantes de corrosión acelerada en las zonas en las que estas corrientes que circulan por el suelo y se canalizan por la tubería salen de la misma para retornar al elemento emisor. Para determinar los posibles riesgos y las soluciones más adecuadas debe realizarse un estudio específico basado en la medición de los potenciales electroquímicos entre el tubo y el suelo.

La norma UNE-EN 50162:2005 “Protección contra la corrosión provocada por corrientes vagabundas provenientes de sistemas en corriente continua” aborda esta problemática y las mediciones y soluciones a aplicar en las tuberías con continuidad eléctrica longitudinal como las de acero y las de hormigón armado con camisa de chapa. Esta norma será sustituida en breve por la ISO/FDIS 21857 “Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Prevention of corrosion on pipeline systems influenced by stray currents”

La norma indica que, en el caso de las tuberías de fundición, cuyas uniones entre tubos rompan su continuidad eléctrica, el riesgo de las corrientes vagabundas sólo se debe tener en cuenta en zonas con gradientes de potencial elevados en el suelo. Estas condiciones se pueden dar en una distancia de 10 metros alrededor de los carriles de los sistemas de tracción que funcionan en corriente continua y en la proximidad de los lechos de ánodos de un sistema de protección catódica por corriente impresa. Si se espera que se produzcan interferencias inaceptables se deben cortocircuitar las juntas de las tuberías mediante el uso de cables y se deben tomar las medidas que se detallan para las tuberías con continuidad eléctrica, lo que puede representar un problema importante en una tubería existente.

4 Métodos de inspección y evaluación

Los materiales con los que se fabrica un tubo y la forma en que se fabrica determinan los métodos aplicables. Para las tuberías metálicas, existe una gama más amplia de tecnologías que utilizan las propiedades eléctricas, magnéticas y electromagnéticas de estos materiales, así como tecnologías de medición directa del espesor de la pared. Por otra parte, hay menos métodos disponibles para los materiales plásticos (cloruro de polivinilo [PVC] y polietileno de alta densidad [HDPE]), en los que los fallos suelen derivarse de pequeños defectos difíciles de encontrar de antemano.

Los métodos de detección de fugas se aplican esencialmente a todas las tuberías, pero su grado de éxito depende a menudo del material y el tamaño de la tubería. Las tuberías grandes y masivas, como las de hormigón, atenúan el sonido más que las pequeñas tuberías metálicas, por lo que la detección acústica de fugas es más difícil. De la misma manera, el sonido se atenúa en los tubos de plástico más que en los materiales más rígidos.

Las observaciones físicas también son útiles para muchos tipos de tuberías y condiciones. Las observaciones visuales pueden realizarse utilizando cámaras de CCTV montadas en tractores tipo robot, sondas de empuje, submarinos en miniatura y otras plataformas. Estas inspecciones a menudo incluyen instrumentos de láser y sonar para medir varias condiciones físicas. En el caso de las tuberías más grandes, la entrada física (inspecciones "tripuladas") por parte de personal capacitado puede ser útil, no sólo para la observación, sino para la realización de diversas pruebas físicas desde el interior de la tubería.

Aunque los circuitos cerrados de televisión se utilizan ampliamente en las tuberías de aguas residuales y otras tuberías de gravedad, los defectos que hacen que las tuberías de presión fallen no suelen ser fáciles de observar. En las tuberías de agua, la CCTV puede determinar la presencia (o ausencia) de revestimiento e incluso puede que la degradación esté oculta. El grafito y otros productos de corrosión ocultan el deterioro de los tubos de hierro. El deterioro de las tuberías de fibrocemento y de hormigón se oculta de forma similar.

4.1. Inspección visual

4.1.1. Inspección de circuito cerrado de televisión (CCTV)

El circuito cerrado de televisión es una técnica bien adoptada para la inspección de la superficie interior del tubo. La inspección por circuito cerrado de televisión se aplica principalmente a las al-

cantarillas y a las tuberías de aguas pluviales. Para la inspección de las tuberías de agua, la CCTV se utiliza comúnmente para la rehabilitación de la red principal de agua. Un sistema de CCTV comprende una cámara de CCTV y un aparato de iluminación montado en un soporte. Un sistema de cabestrante y polea mueve el módulo de CCTV a través de la tubería. Los módulos más grandes pueden utilizar un sistema de cable umbilical, que puede suministrar energía y comunicación al centro de control y actuar como un dispositivo de recuperación.

La técnica tradicional de CCTV tiene sus propias limitaciones. Necesita pandeo e inclinación para ver los lados y los laterales. Para asegurar una calidad de vídeo aceptable, la velocidad del portador se limita a 15 cm/s. La cámara tiene que detenerse en cada lugar para identificar los defectos. La tecnología de evaluación de escaneo lateral (SSET) proporciona imágenes tanto frontales como de 360° de la superficie interior de la pared del tubo. Dos cámaras capturan una vista frontal y una perpendicular de la tubería respectivamente. El sistema SSET puede viajar a través de una tubería a una velocidad constante sin detenerse a observar los defectos. No se necesita una cámara de pandeo o inclinación. Una ventaja clave del SSET es que permite la comparación de datos de 1 año a otro.

4.1.2. Escaneo láser

Esta tecnología se utiliza típicamente para mediciones a distancias relativamente largas. Para distancias muy largas, se utiliza un rayo láser pulsado. Un sistema de haz modulado también utiliza la duración de tiempo para que la luz viaje hacia el objetivo y de vuelta; sin embargo, en este caso, el tiempo no se mide directamente. En cambio, la intensidad del láser se varía para producir una señal que cambia con el tiempo. La demora de tiempo se identifica indirectamente comparando la señal del láser con la señal demorada que regresa del objetivo. Los sensores de haz modulado se utilizan normalmente en aplicaciones de alcance intermedio.

Para obtener el perfil del interior del tubo se necesita un aparato giratorio para controlar el rayo láser. Este tipo de control del alcance del láser no requiere ninguna iluminación especial y puede llevarse a cabo en la oscuridad total. La velocidad de giro, la tasa de muestreo y la velocidad de movimiento del portador determinan la resolución y afectan a la precisión del escaneo. La inspección se ve afectada por la rugosidad, así como por el color de la superficie del tubo.

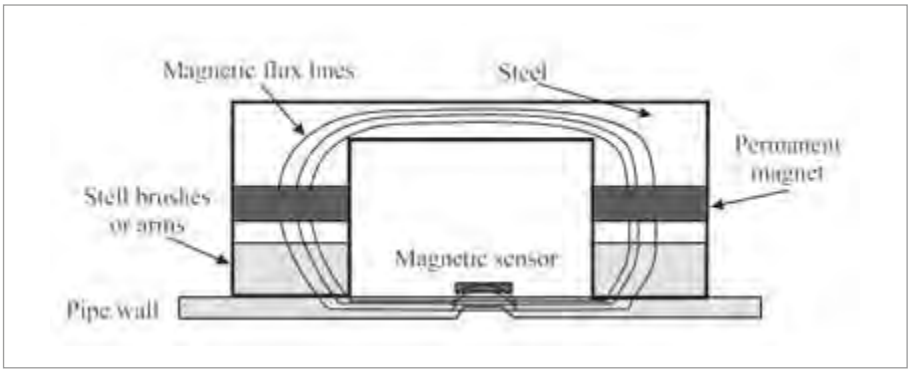
Otro método se basa en la luz estructurada, que utiliza un anillo de luz láser proyectado en la superficie interior del tubo. Se utiliza una cámara detectora para capturar las imágenes de este anillo proyectado. El dispositivo láser se mueve con la cámara a través del tubo. El software de análisis extrae la forma del anillo láser a partir de las imágenes capturadas y reconstruye un perfil digital del tubo. La medición del diámetro, el perímetro y el área de la sección transversal es precisa si tanto la cámara como el láser están correctamente ajustados. Sin embargo, falta la información de "profundidad". Se ha demostrado que un dispositivo portátil, que es una combinación de láser y visión estereoscópica, permite crear rápidamente el perfil de superficie con alta resolución.

4.2. Métodos electromagnéticos

4.2.1. Dispersión del flujo magnético (MFL)

El método de dispersión del flujo magnético (MFL) utiliza grandes imanes para inducir un campo magnético saturado alrededor de la pared de una tubería ferrosa. Si la tubería está en buen estado, se obtiene una distribución homogénea del flujo magnético.

Anomalías, como la pérdida de metal, alterarán la distribución del flujo magnético. Las áreas dañadas no pueden soportar tanto flujo magnético como las áreas no dañadas, lo que resulta en un aumento del flujo en las áreas dañadas. En otras palabras, las zonas dañadas provocan un cambio



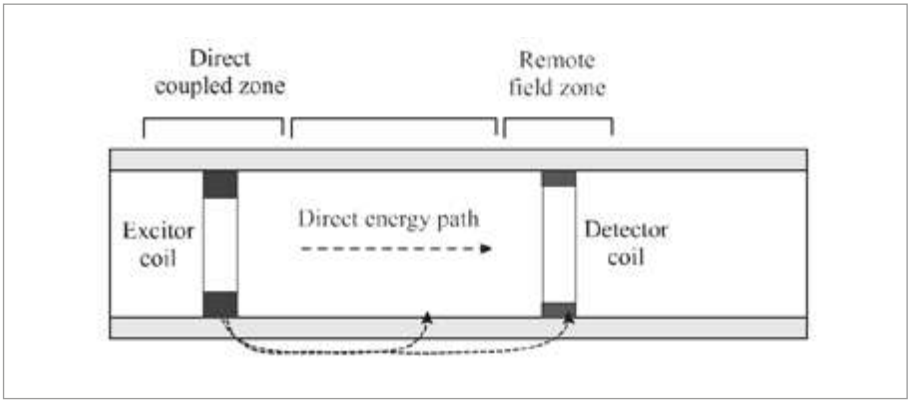
en la reluctancia magnética en el circuito magnético cerrado que da lugar a un cambio en la cantidad de flujo que se escapa al aire. Dicha fuga de flujo se registra mediante un sensor magnético como se muestra en la Figura adjunta. La prueba MFL necesita ser calibrada para interpretar los datos necesarios para la medición del espesor de la pared de la tubería. El uso del MFL en la industria del agua está limitado a tuberías limpias y sin revestimiento y también requiere accesibilidad al exterior de las tuberías. La excitación pulsada para MFL se ha desarrollado para extraer información en profundidad de los defectos en tuberías de agua de acero laminado.

4.2.2. Prueba de corrientes parásitas de campo remoto (RFEC)

Un sistema de corrientes parásitas de campo remoto consiste en una bobina de excitación y uno o más detectores. La bobina excitante es conducida por una señal de corriente alterna de baja frecuencia. La región de interacción se divide en tres zonas, como se muestra:

- **Zona de acoplamiento directo:** el campo magnético de la bobina excitadora interactúa con la pared del tubo para producir un campo concentrado de corrientes parásitas.
- **Zona de transición:** hay interacción entre el flujo magnético de la bobina excitadora y el flujo inducido por la corriente parásita.
- **Zona remota de campo:** esta es la región en la que el acoplamiento directo entre la bobina excitadora y la bobina receptora es insignificante.

Existen dos caminos de acoplamiento distintos entre el excitador y el detector. El campo electromagnético directo dentro del tubo es atenuado rápidamente por las corrientes parásitas circunferenciales inducidas en la pared del tubo conductor. El campo indirecto se difunde radialmente hacia el exterior a través de la pared del tubo. Este campo se extien-



de rápidamente a lo largo del tubo con poca atenuación. Estos dos campos se re-difunden de nuevo a través de la pared del tubo y son dominantes en la zona remota de campo. Cualquier discontinuidad en el camino indirecto causará cambios en la magnitud y la fase de la señal. Esta tecnología no requiere que los sensores estén en estrecho contacto con la pared de la tubería.

4.2.3. Electromagnetismo de banda ancha (EMBA)

A diferencia de la técnica convencional de corrientes parásitas, que utiliza una sola frecuencia para las pruebas, la técnica electromagnética de banda ancha transmite una señal que cubre un amplio espectro de frecuencias que va de 50 Hz a 50 kHz. Una bobina transmisora pasa una corriente alterna a la superficie del tubo, lo que genera un campo magnético alterno. Las líneas de flujo de este campo magnético pasan a través de la pared del tubo de metal, generando un voltaje a través de él. Este voltaje produce corrientes parásitas en la pared de la tubería, que inducen un campo magnético secundario. El grosor de la pared se estima indirectamente midiendo la atenuación de la señal y el retardo de fase del campo magnético secundario. La tecnología EMBA se ha utilizado principalmente para la evaluación de la condición de las tuberías de agua. Sólo puede utilizarse en materiales ferrosos para medir el espesor de la pared, cuantificar la grafitización y localizar los cables rotos en Hormigón Pretensado y Hormigón Armado.

El sistema EMBA se puede emplear para medir las perforaciones de corrosión, además de facilitar la inspección de tubos expuestos en excavaciones con perforadoras.

4.2.4. Prueba de corrientes parásitas pulsadas (PEC)

La corriente parásita pulsada es un método para determinar el grosor de la pared de las tuberías de acero aisladas y no aisladas mediante una inspección externa. Una corriente parásita de forma rectangular es generada por una bobina transmisora. Cada ciclo consta de un pulso positivo y uno negativo. La intensidad de las corrientes parásitas se mide a cierta distancia de la pared de la tubería (por ejemplo, debido al levantamiento o al grosor del aislamiento) cuantificando la reacción del campo magnético recogida por la bobina receptora. La intensidad está relacionada con el grosor de la pared. El grosor medio del metal se calcula comparando el tiempo transitorio de ciertas características de la señal con señales calibradas similares. El contacto entre el campo magnético y el componente inspeccionado produce una traza que representa el área inspeccionada para el cálculo del espesor de la pared. El diámetro de la huella varía entre 25 y 150 mm, dependiendo del grosor de la pared, el grosor del aislamiento y el tamaño del sensor. La herramienta de inspección es compacta y puede ser fácilmente desplegada por vehículos operados a distancia. El sistema PEC comercial se ha utilizado para la inspección de tubos/depósitos aislados en plantas químicas y en la industria del petróleo y gas.

4.2.5. Radar de penetración en el suelo (GPR)

Las antenas de radar que penetran en el suelo transmiten pulsos de ondas electromagnéticas al suelo. Estos pulsos se propagan a través del suelo y se reflejan fuera de los límites de la sub-superficie. Las reflexiones se detectan por una antena receptora y posteriormente se deben interpretar. El procesamiento de los datos y las señales del GPR es un trabajo arduo pero necesario.

Los sistemas GPR convencionales se operan desde la superficie del suelo. También existen sistemas GPR que operan en tuberías en servicio. Estos sistemas utilizan dos o tres antenas con diferentes frecuencias para investigar la estructura del suelo circundante, la interfaz entre el suelo y la tubería, y la estructura de la tubería. El GPR puede potencialmente identificar fugas en tuberías de agua enterradas, ya sea detectando los huecos subterráneos creados por la fuga de agua o detec-

tando anomalías en la profundidad de la tubería a medida que la velocidad de propagación del radar cambia debido a la saturación del suelo con la fuga de agua. La técnica GPR también se aplicó para determinar el grado de lixiviación interna de los hidróxidos en las tuberías de fibrocemento.

La técnica del radar de penetración en el suelo (GPR) es similar en principio a las técnicas sísmicas y de ultrasonido. Una antena transmisora envía un pulso de corta duración de energía electromagnética de alta frecuencia al suelo. El pulso se refleja parcialmente en la superficie del suelo a través de objetos enterrados o huecos en el suelo o por los límites entre las capas del suelo que tienen diferentes propiedades dieléctricas. Las señales de radar reflejadas son captadas por una antena receptora. El interior del suelo se explora con las ondas de radar de forma similar a la de un ultrasonido para obtener imágenes transversales.

En principio, el GPR podría utilizarse para detectar fugas en las tuberías de agua, detectando los vacíos subterráneos creados por las fugas de agua al circular cerca de la tubería o detectando las anomalías en la profundidad de la tubería medidas por el radar. El suelo saturado por las fugas de agua ralentiza las ondas de radar y hace que la tubería parezca más profunda de lo que debería ser. El GPR detecta todo tipo de agua en el suelo, por lo que su uso se limita a las zonas en las que la tubería está por encima del nivel freático y a los suelos que pueden estar saturados de agua. En la práctica, el GPR suele combinarse con la termografía.

4.3. Métodos acústicos

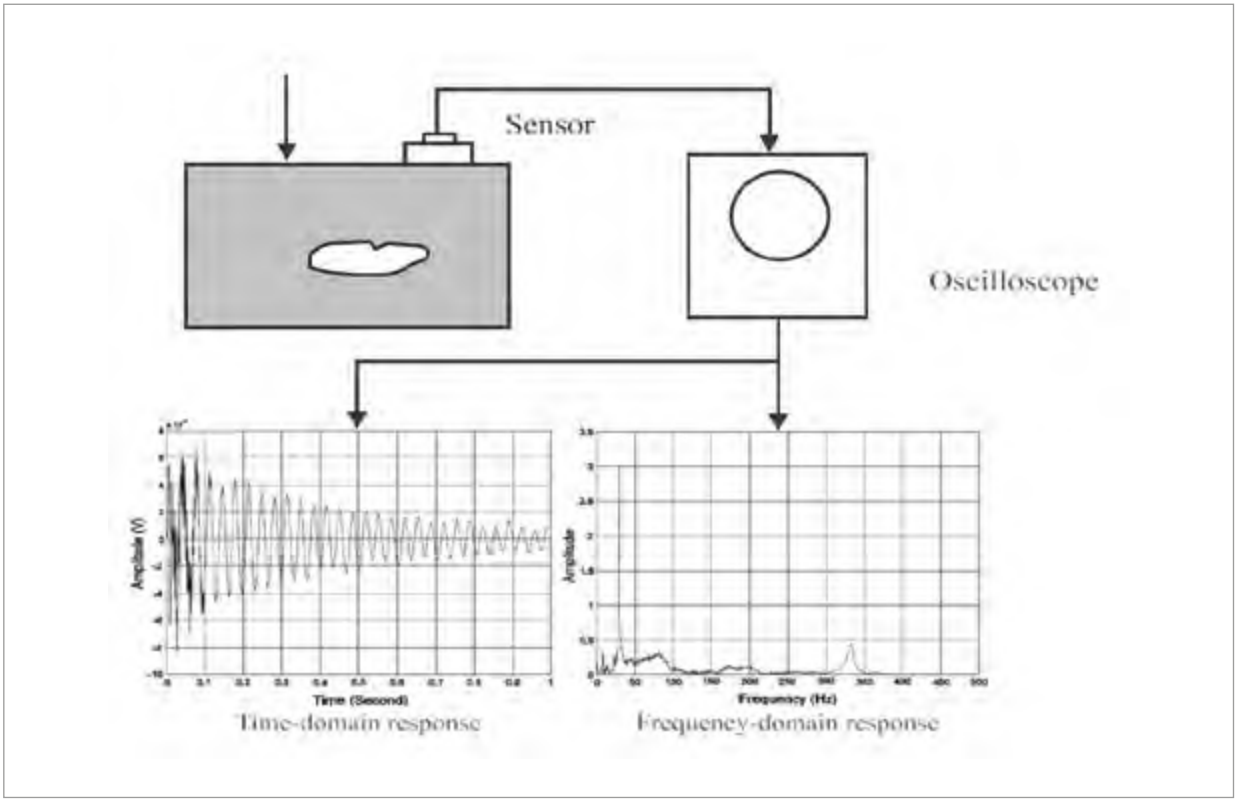
4.3.1. Sistema de perfiles mediante sonar

El sonar es una tecnología de detección acústica diseñada para operar bajo el agua. En el campo de evaluación de la condición de tubos se ha adaptado para proporcionar información sobre los elementos de la tubería que están sumergidos bajo la línea de agua. Estos pueden incluir restos de desechos que estén sumergidos dentro de la tubería (alcantarillas), nivel de grasa (alcantarillas), el asentamiento diferencial y otras deformaciones y defectos que están ocultos. Un sistema de sonar puede consistir en una unidad de escáner submarino, un sonar flotante con sifón desmontable, un procesador/monitor sonar, un conjunto de patines y todos los cables de interconexión necesarios. Típicamente viaja en las tuberías a velocidades en el rango de 0,1-0,2 m/s y envía un pulso aproximadamente cada 1,5 s. Cada pulso proporciona un esquema de la sección transversal de la parte sumergida de la tubería. Las mediciones de la velocidad de acumulación pueden realizarse basándose en estos contornos.

El sistema de perfiles mediante sonar puede ser usado con diferentes frecuencias para lograr diferentes objetivos. El sonar de alta frecuencia puede proporcionar una exploración de mayor resolución, pero un pulso de alta resolución se atenúa rápidamente y, por tanto, tiene una capacidad de penetración relativamente baja. Por el contrario, el sonar de baja frecuencia tiene una capacidad de penetración alta, pero está limitado en su resolución de exploración. Por consiguiente, mientras que el sonar de alta frecuencia puede ser adecuado para condiciones de agua clara, el agua turbia con altas concentraciones de sólidos en suspensión puede requerir una señal de menor frecuencia. Es más probable que se observen pequeños defectos por una señal de alta frecuencia. Algunos sistemas son capaces de una exploración multifrecuencia para obtener la máxima información. También se dispone de un sistema que integra el sonar y el vídeo para su uso en tuberías sumergidas y grandes tuberías semi-sumergidas.

4.3.2. Impacto-Eco

Las pruebas de impacto-eco se basan en el uso de ondas de tensión generadas por impacto que se propagan y se reflejan por el objeto. Los datos de prueba en el dominio del tiempo del martillo de impulso y del acelerómetro se transforman en el dominio de la frecuencia como se ilustra en la Figura adjunta.



Se calcula una función de transferencia entre el martillo y el receptor en función de la frecuencia. Picos en la función de transferencia reflejan el espesor efectivo de la pared del tubo en el lugar de la prueba.

El impacto-eco se aplica típicamente al hormigón, la piedra, el plástico, los materiales de mampostería, la madera y algunas cerámicas. Hay varios instrumentos disponibles en el mercado. La prueba se realiza golpeando la superficie de prueba en un lugar determinado con un pequeño martillo de impulso monitorizado y registrando la onda reflejada con un desplazamiento del sensor acelerómetro adyacente al lugar del impacto. El acelerómetro suele estar montado o presionado contra la superficie de prueba. El análisis en el dominio de la frecuencia es complicado cuando se necesita información distinta del espesor y la geometría y se requiere experiencia. Los elementos incrustados pueden afectar al comportamiento de las ondas y a los resultados de la prueba. Este método no está limitado por el tamaño de la tubería y puede aplicarse tanto interna como externamente.

4.3.3. Métodos acústicos internos y externos para detección de fugas de tuberías de gran diámetro

Los dispositivos utilizados dentro de un tubo de agua a menudo son capaces de llegar a centímetros de la fuga, lo que permite la detección de fugas más pequeñas, particularmente en tuberías donde el sonido no se transmite a grandes distancias. La detección desde el interior de la tubería también puede permitir la localización altamente precisa de la fuga, particularmente cuando el dispositivo está sujeto por un cable. La detección de fugas internas es aplicable tanto a los sistemas de distribución como a las tuberías de transmisión.

El dispositivo de detección se suele insertar en una tubería a presión, utilizando las salidas de las tuberías existentes. El dispositivo es impulsado por el flujo de agua o empujado a través de la tubería para escuchar y registrar el sonido del agua

que sale de la tubería en un entorno de menor presión (es decir, una fuga). Los métodos acústicos externos tradicionales se basan en la pared de la tubería para transmitir el sonido de la fuga y, por tanto, se ven cuestionados por una serie de variables, como se ha explicado anteriormente. El material de la tubería, el diámetro de la misma y las distancias entre los puntos de conexión a menudo limitan el tamaño de la fuga que se puede detectar. Sin embargo, las tecnologías de detección de fugas desde el interior de la tubería se enfrentan a una menor resistencia cuando el sensor se acerca directamente a la fuga. Por tanto, estos dispositivos tienen la capacidad de detectar fugas más pequeñas con un nivel de confianza mayor que el que ofrecen los métodos externos. Al igual que con los métodos acústicos en general, la presión de funcionamiento debe ser de 15 psi (1 bar) o superior para que se detecte incluso el sonido característico producido por las fugas más pequeñas.

Las consideraciones operacionales y los detalles de la inspección dictan qué tecnología será la más adecuada para cada situación individual. Debido a la complejidad y el gasto del equipo de detección de fugas en línea y al nivel de destreza requerido del operador, la detección de fugas en línea casi siempre se ha proporcionado como un servicio contratado. Esto puede cambiar a medida que los dispositivos evolucionen y el aumento de la competencia reduzca los costos.

A) Dispositivos de detección de fugas anclados

En los dispositivos que se encuentran anclados, un sensor que contiene un hidrófono se inserta en una tubería en servicio a través de una salida existente, como una derivación con válvula de aireación (para las tuberías de transporte) o una boca de incendios (para las tuberías de distribución). El dispositivo se sujeta a un cable que se utiliza para controlar su movimiento. Si no se dispone de un punto de entrada adecuado, se puede instalar una llave de paso para facilitar la inserción. Para los recorridos de larga distancia en las tuberías de transporte, el sensor es propulsado por el flujo de agua utilizando un paraguas de arrastre que lleva la cabeza del sensor anclada a la tubería. La velocidad de desplazamiento del dispositivo sensor se controla mediante un cable de cobre o de fibra óptica reforzada que también transmite datos acústicos (y opcionalmente de televisión en circuito cerrado [CCTV]) a la unidad exterior de recogida de datos. En tuberías de distribución más pequeñas, se puede utilizar un cable más corto, pero más rígido para empujar el dispositivo a través de la tubería a una distancia de hasta 90 metros. Este tipo de inspección es “en tiempo real” y, además del hidrófono utilizado para detectar fugas, el sensor acústico también puede contener una cámara para la inspección de CCTV. La CCTV puede mostrar el estado general del interior de la tubería, revelar bolsas de aire y mostrar válvulas y accesorios.

El sistema anclado ofrece al operador un mayor control sobre la inspección con la capacidad de posicionar el dispositivo sobre puntos de interés particulares y evaluar visualmente el estado de la tubería en el momento de la inspección. Esta característica aumenta significativamente la precisión del sensor y la sensibilidad; por tanto, se pueden localizar fugas muy pequeñas, tan pequeñas como de 18,8 l/min. Sahara ha detectado fugas tan pequeñas como 0,002 l/s a 6Bar y 0,02 l/s a 1Bar. También tiene la capacidad de identificar múltiples fugas en una sola inspección a lo largo de la sección sospechosa de la tubería. El material de la tubería no dicta la operatividad de un sistema anclado; sin embargo, el diámetro de la tubería es algo restrictivo desde una perspectiva operacional, ya que la tubería debe ser lo suficientemente grande como para permitir que el sensor fluya libremente a través de ella. Este sistema particular es adaptable a redes urbanas complejas debido a los altos niveles de ruido ambiental y al nivel de control sobre el dispositivo. La Figura 4.1 muestra una típica configuración de inserción de detección de fugas anclada para una inspección a larga distancia.



Figura. 4.1. Herramienta de detección de fugas anclada. Fuente: Xylem Assessment Services (modelo SAHARA®).

B) Dispositivos de libre desplazamiento (nado libre)

Los dispositivos de detección de fugas de nado libre se insertan en una tubería presurizada a través de una salida con válvula nueva o existente, como una llave de paso de tamaño suficiente o un hidrante. El dispositivo atraviesa la tubería a una velocidad proporcional a la velocidad del flujo. Si las condiciones de flujo son óptimas, el sensor puede recorrer una distancia significativamente larga, navegando a través de las válvulas de compuerta y las válvulas de mariposa sin limitación. Es importante ser consciente de la dirección del flujo, ya que el dispositivo seguirá el flujo más significativo. A medida que el sensor se mueve a través de la columna de agua, registra datos acústicos utilizando un hidrófono. El dispositivo puede ser recuperado en otra abertura aguas abajo con un dispositivo similar a una red. Después de retirar el sensor, los datos se descargan y se analizan para determinar si hay fugas. La firma acústica de una fuga varía según el tipo y el tamaño de la misma. La Figura 4.2 es una ilustración de un dispositivo de detección de fugas de nado libre desde la inserción hasta la extracción.

El rendimiento de este tipo de tecnología de detección de fugas no está restringido por el material o el diámetro de la tubería, ya que el mismo sensor es adaptable a todas las situaciones. Sin embargo, desde el punto de vista operacional, la tubería tiene que soportar el tamaño del dispositivo, ya que debe poder moverse libremente a lo largo de la tubería sin restricciones. Para rastrear la ubicación del dispositivo, los receptores se fijan al exterior de la tubería en múltiples lugares, a menudo en dependencias existentes.

La sección de la tubería a inspeccionar debe estar aislada, donde pueda haber derivaciones laterales "conocidas", para que el dispositivo no se pierda. Todas las válvulas de la línea principal a lo largo de la inspección deben abrirse completamente de manera que no haya obstrucciones y el dispositivo pueda desplazarse libremente. Las válvulas de mariposa y las válvulas de compuerta podrán ser atravesadas fácilmente siempre que estén abiertas. Los receptores colocados en el exterior de la tubería (aproximadamente cada 1 km.) se utilizan para rastrear la ubicación del dispositivo. El dispositivo de nado libre utiliza un hidrófono interno para escuchar la señal acústica de los sonidos de

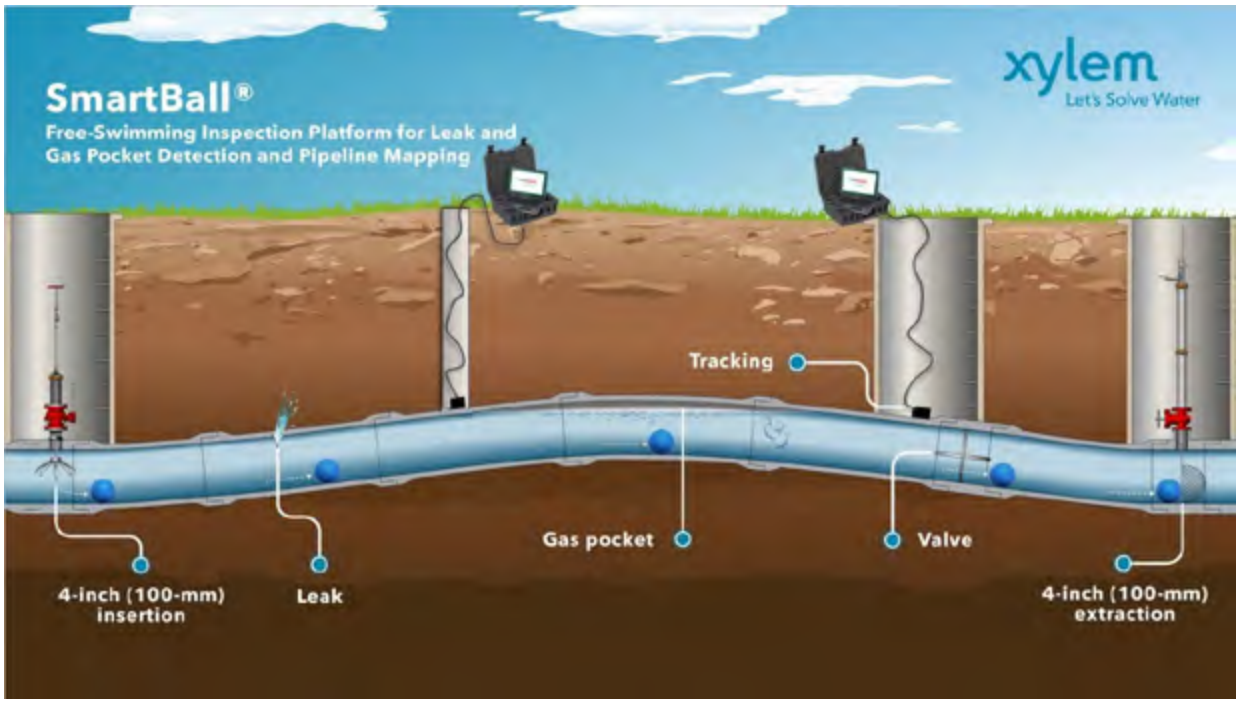


Figura 4.2. Herramienta de detección de fugas de nado libre. Fuente: Xylem Assessment Services (Modelo SMARTBALL®).

la fuga, y los datos se almacenan a bordo para su análisis después de la inspección.

Los datos que se capturan en el dispositivo de nado libre son interpretados por analistas especialistas que revisan los datos visualmente y por las señales acústicas del ruido registrado. Estos datos indicarán la distancia de la fuga desde un punto referenciado a lo largo del tubo, y el análisis determinará si las fugas provienen de una junta, del cuerpo del tubo, o si estas pudieran estar vinculadas a algún otro elemento de la red (válvulas, derivaciones, etc.).

El aumento de la presión de funcionamiento puede amplificar el sonido de la fuga; sin embargo, a diferencia de los métodos externos tradicionales, el sensor se lleva directamente al lugar de la fuga, lo que permite detectar fugas más pequeñas y aumentar la precisión, ya que en el momento en el que el dispositivo pasa por el evento este se encontrará a una distancia no mayor a un diámetro de la tubería inspeccionada. Con las tecnologías convencionales de detección de fugas (externas), el sonido de la fuga debe viajar hasta el sensor fuera de la tubería; por tanto, la presión operativa y una serie de otros desafíos afectan a la precisión de la detección de fugas. Los sensores externos deben competir con el ruido de fondo, el material de la tubería, la disponibilidad de puntos de acceso, la distancia entre los puntos de acceso, la profundidad de la tubería, la composición del suelo, el diámetro del tubo y el tamaño de la fuga, por nombrar sólo algunos. Por otro lado, la detección de fugas internas no se ve afectada por estas limitaciones.

Si bien los dispositivos de nado libre se utilizan principalmente para la detección de fugas, algunos dispositivos disponibles en el mercado también pueden llevar múltiples sensores adicionales, como una cámara de circuito cerrado de televisión para la inspección por vídeo y una grabadora de presión para la correlación de la ubicación de la fuga durante el análisis de los datos. Los dispositivos son capaces de informar de las ubicaciones generales de la orientación de la distancia a lo largo del tubo donde se está grabando la inspección por vídeo.

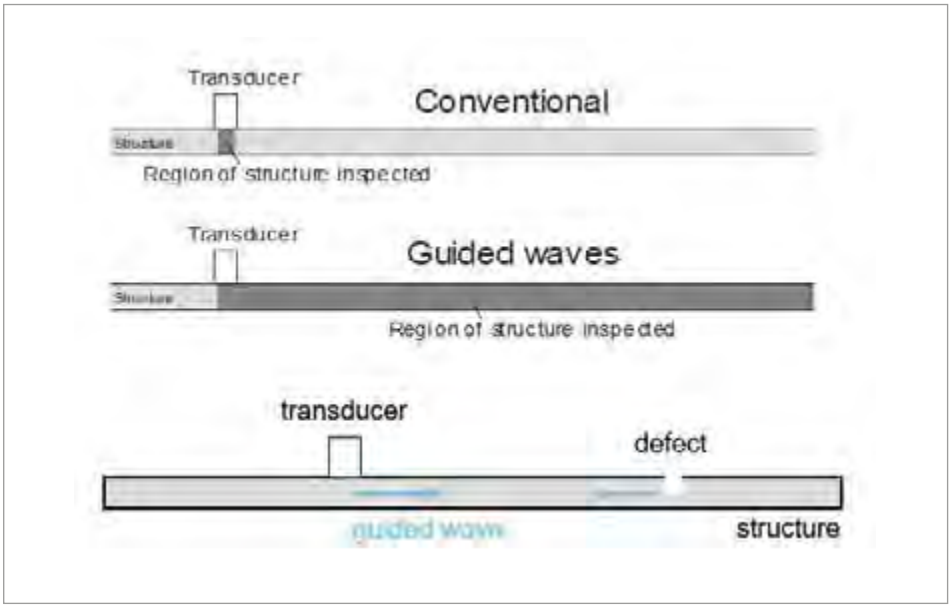
4.4. Métodos de ultrasonidos

4.4.1. Ultrasonidos de onda guiada

La técnica de ultrasonidos de onda guiada se basa en la capacidad de propagar una onda a larga distancia. El nombre de una onda guiada depende del tipo de estructura y de cómo se transmite la energía a través de ella. Las ondas torsionales viajan a través de un movimiento de cizallamiento paralelo a la dirección circunferencial. La atenuación por el agua y los revestimientos es menor para el movimiento de cizallamiento. Las ondas longitudinales se desplazan mediante un movimiento flexural/de compresión en las direcciones radial y axial y pueden verse fácilmente afectadas por el agua y los revestimientos. Dependiendo del tipo de onda guiada, el número de transductores puede oscilar entre dos y cuatro. Las ondas torsionales requieren dos transductores mientras que las ondas longitudinales requieren de tres a cuatro transductores.

Los transductores de ondas guiadas torsionales funcionan en una configuración de pulso-eco en la que los transductores se utilizan tanto para la excitación como para la detección de las señales. Las ondas guiadas torsionales o longitudinales se inducen en la tubería y se propagan a lo largo del segmento de tubería. Un sistema de ondas torsionales puede utilizarse en tuberías llenas de agua, mientras que el sistema longitudinal no. En un sistema longitudinal, tres transductores sólo pueden operar en una sola frecuencia. Si se utilizan cuatro transductores, se pueden aplicar varias frecuencias, lo que mejora el resultado de la inspección.

Cuando estas ondas guiadas encuentran una anomalía o un accesorio del tubo, las ondas laminares se reflectan hacia la ubicación original del transductor. El tiempo de vuelo de cada firma se calcula para determinar su distancia desde el transductor. La amplitud de la firma determina la importancia del tamaño del defecto.



Las ondas guiadas pueden alcanzar rangos de inspección mucho mayores que los métodos de ensayo por ultrasonidos convencionales, ya que utilizan la propia estructura como guía de ondas aprovechando las resonancias entre los límites de la estructura (por ejemplo, las superficies de una placa o el diámetro exterior e interior de un tubo).

Por tanto, mientras que los sistemas convencionales de UT de ondas “masivas” generalmente sólo pueden inspeccionar un área muy cercana o directamente debajo del transductor, los sistemas de ondas guiadas pueden detectar defectos a muchos metros de distancia del transductor, y en algunos casos a varios cientos de metros. Debido a

las propiedades únicas de las ondas guiadas, también son capaces de detectar pequeños defectos a frecuencias muy bajas en comparación con la UT tradicional. Esta capacidad aumenta el poder de penetración.

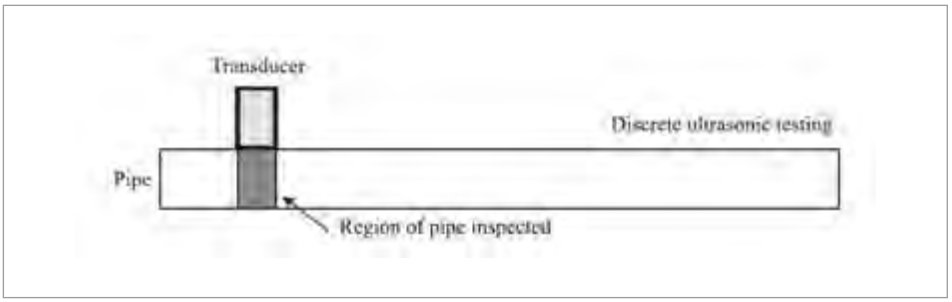
4.4.2. Ultrasonidos discretos

La medición por ultrasonidos discretos transmite una onda corta de alta frecuencia a través de un acoplador al material que se está probando. La onda puede ser generada por varios métodos, incluyendo cerámica piezoeléctrica, transductor acústico electromagnético, sensor magnetostrictivo, láser y polímeros piezoeléctricos. Las ondas se proyectan hacia la pared posterior de la muestra y se reflejan hacia el transductor. El tiempo de transición se registra y se utiliza en combinación con la velocidad de la onda que se propaga en el material para calcular la distancia de recorrido de la onda. Para calibrar el sensor se utilizan materiales con espesores conocidos.

Un sistema típico de UT consiste en un pulsador/receptor, un transductor y una unidad de visualización. Accionado por el pulsador, el transductor genera una energía ultrasónica de alta frecuencia que se propaga a través de los materiales en forma de ondas. Cuando se encuentra un objeto en su camino, parte de la energía se refleja desde la superficie del objeto. La onda detectada se transforma en una señal eléctrica, de la que se puede deducir información sobre la ubicación, el tamaño, la orientación y otras características del reflector. Los tipos de visualizaciones del sistema ultrasónico incluyen:

- **A-scan:** profundidad de la discontinuidad y amplitud de la señal.
- **B-scan:** profundidad de la discontinuidad y distribución en la vista transversal.
- **C-scan:** distribución de la discontinuidad en vista plana.

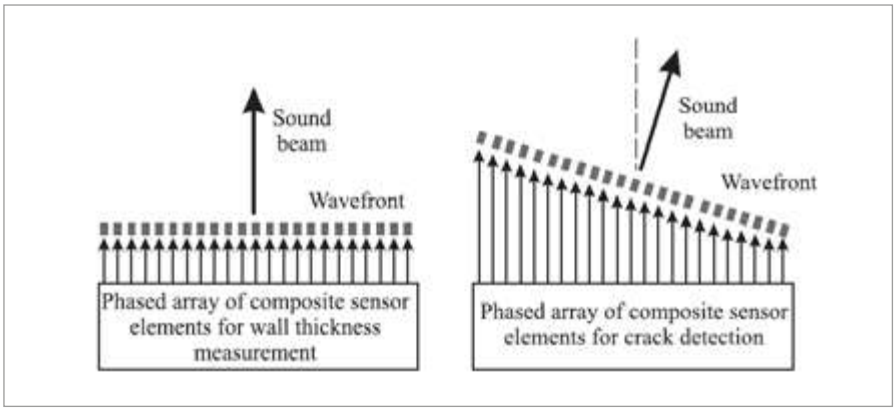
La inspección por UT de las tuberías puede realizarse tanto externa como internamente. Por lo general, la inspección por ultrasonidos necesita un acoplante o agua para transmitir la onda entre el transductor y la pared de la tubería. Sin embargo, el transductor electromagnético-acústico (EMAT) no necesita acoplamiento.



4.4.3. Tecnología Transductores multi-elemento o “Phased Array”

En las UT convencionales, la forma de un haz de sonido y su dirección de desplazamiento están fijados para cada sensor. Un transductor Array contiene un número de elementos individuales en una sola carcasa. Con la tecnología “Phased Array”, es posible programar disposiciones virtuales de los sensores, que pueden enviar haces de sonido con diferentes características y en diferentes direcciones, es decir, se puede controlar la apertura, la forma y la dirección del haz de ultrasonidos.

Los elementos centrales de esta tecnología son matrices formadas por elementos sensores compuestos que son controlados individualmente por la electrónica de ultrasonidos. Un conjunto de ele-



mentos sensores compuestos vecinos se activa simultáneamente. El haz de sonido y su dirección están determinados por la forma en que se activan los elementos sensores compuestos.

Los Arrays en fase utilizan un conjunto de elementos sensores, todos ellos cableados individualmente, pulsados y desplazados en el tiempo. Cualquier conjunto de elementos sensores puede utilizarse como sensor virtual. Por ejemplo, un sensor virtual de medición del espesor de la pared puede ser construido por un grupo de elementos sensores compuestos. Si estos elementos se activan simultáneamente, se genera un haz de sonido perpendicular a la superficie de la pared, como se ilustra en la Figura adjunta. Si los elementos vecinos se disparan con un cierto desplazamiento de tiempo de elemento a elemento, se genera un haz de sonido angular. Un sensor de detección de grietas virtual está formado por un grupo de estos elementos sensores. La mayor ventaja de la tecnología Phased Array es su capacidad para interpretar defectos complejos, como la discriminación entre grietas y pérdida de metal, y la identificación de grietas en forma de gancho. Las características técnicas de la tecnología ultrasónica Phased Array incluyen:

- Multiplexación de un gran número de cristales idénticos como una sola sonda.
- Control de la profundidad focal.
- Control del ángulo de dirección.
- Control de la anchura del haz.
- Programa de la apertura virtual de la sonda.
- Exploración con un gran número de A-scans.
- Visualización de los datos del UT en una vista genérica denominada S-scan.

El ultrasonido Phased Array está disponible en el mercado y se está desarrollando continuamente, pero todavía no se ha informado de su aplicación a la red de suministro de agua.

4.4.4. Inspección UT combinada

Una técnica combinada de UT puede cuantificar simultáneamente la pérdida de metal y detectar grietas. Esta técnica utiliza un portador de sensores de nuevo diseño y optimizado para realizar ambas inspecciones en un solo recorrido. Se coloca un número suficiente de sensores UT para cubrir la circunferencia de la tubería. Estos sensores trabajan en un modo de pulso-eco con una alta frecuencia de repetición. La incidencia recta de los pulsos ultrasónicos se utiliza para medir el grosor de la pared y la incidencia de 45° se utiliza para la detección de grietas. Aunque esta técnica se desarrolló para gasoductos y oleoductos, también puede ser una herramienta prometedora para las tuberías de agua.

4.5. Otros métodos

4.5.1. Métodos radiográficos

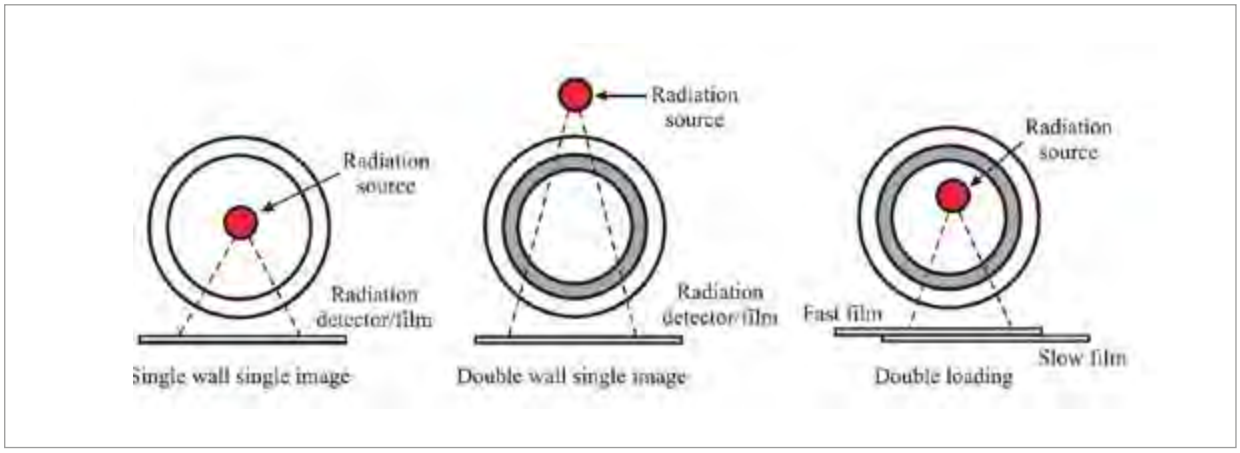
Las pruebas radiográficas utilizan una fuente de radiación, ya sea gamma o de rayos X, que atraviesa el material y se refleja en una película fotográfica.

Hay tres configuraciones básicas para las pruebas radiográficas en el sector del agua, como se ilustra en la Figura adjunta. Los cambios de densidad en la película indican posibles imperfecciones. En la actualidad, se han utilizado cámaras digitales para sustituir la película, pero están limitadas por el tamaño del conjunto de fotodiodos de óxido metálico (CMOS) complementarios en el sensor de imagen.

Los rayos X creados por los tubos de rayos catódicos se utilizan para los materiales plásticos. Los detalles de la estructura del material pueden verse en la radiografía. Sin embargo, tiene limitaciones técnicas en el sentido de que deben emplearse tubos de 38,1 cm de diámetro o más. La inspección de válvulas se realiza con radiografía convencional basada en película. Las zonas más oscuras corresponden a un material más fino o menos denso. Los defectos típicos que se pueden detectar son:

- Pozos en materiales ferrosos. Los productos de la corrosión son menos densos y aparecen más oscuros en la radiografía.
- Huecos en materiales cementosos.
- Inclusiones o vacíos de fabricación.

Los rayos gamma emitidos por isótopos se utilizan para materiales ferrosos y cementosos. La radiografía gamma se ha utilizado para comprobar soldaduras en oleoductos y gasoductos. Un desarrollo comercial reciente es la tomografía computarizada por retrodispersión (BCT), que no requiere película en el otro lado del objeto inspeccionado. Esta tecnología se está aplicando actualmente a la inspección de alcantarillas, corrosión bajo el aislamiento, infraestructuras de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y estructuras en aplicaciones aeroespaciales.



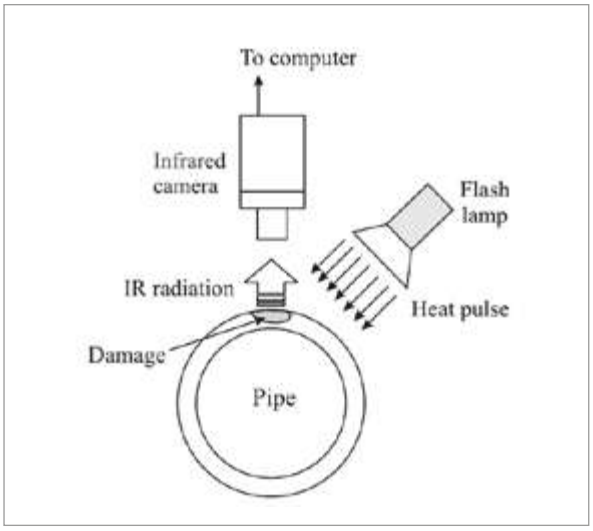
4.5.2. Métodos de termografía

Las pruebas termográficas son un método de detección de anomalías térmicas sin contacto. La radiación infrarroja tiene una mayor longitud de onda que la luz visible (>700 nm). Cualquier objeto por encima de 0 K irradia energía infrarroja y la cantidad de energía radiada es una función de la temperatura del objeto y de la emisividad, que es una medida de la eficiencia de la superficie en la transferencia de energía infrarroja. Las áreas con diferentes masas térmicas tendrán diferentes tasas de absorción y radiación de calor.

La radiación infrarroja se convierte en una imagen visible y los objetos examinados pueden distinguirse en función de su emisión de calor.

En las pruebas termográficas, normalmente se utiliza una fuente de calor externa para calentar el objeto inspeccionado, como se ilustra en la Figura adjunta. A continuación, las características de enfriamiento del objeto se monitorizan con una cámara de infrarrojos y estas características se interpretan para discernir las propiedades del objeto. Se han desarrollado diversos métodos de pruebas termográficas activas, que utilizan una fuente de

calor para obtener el contraste térmico deseado, para diferentes aplicaciones. Estos métodos incluyen la termografía de pulsos, la termografía de calentamiento escalonado, la termografía lock-in y la vibro-termografía.

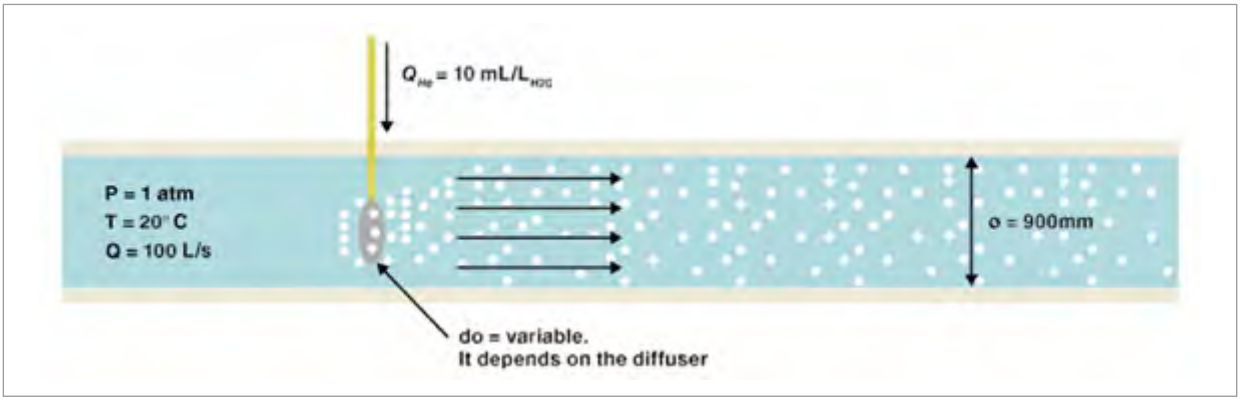


4.5.3. Método del trazador de gas

Este método de detección de fugas se aplica mejor cuando hay una fuga conocida que no puede ser localizada. Plantea una alternativa más precisa y eficaz que los métodos acústicos convencionales, y detecta fugas que pasan desapercibidas con estos últimos. Funciona bajo las premisas de que el Helio es más ligero que el aire, por lo que tiende a ascender de forma natural hasta la superficie, y de que la concentración de Helio en la atmósfera tiene un valor constante. El principio de la tecnología de trazadores de gas se ilustra en la Figura adjunta.

Con esta tecnología, se inyecta gas helio (normalmente mezclado con nitrógeno) en las tuberías de agua, sin necesidad de aislar una zona ni despresurizar el sistema. Una vez que el gas se inyecta en la red de agua, se mezcla con el agua que fluye y se desplaza por toda la red de tuberías hasta la(s) zona(s) deseada(s) para el estudio. Cuando el agua infundida con helio sale de la tubería, el helio se separa del agua. Dado que el helio es cinco veces más ligero que el aire, el helio flota hasta la superficie de la tierra, donde puede detectarse y medirse con equipos de control especializados. Los niveles elevados de helio detectados por encima de una tubería con fugas indican que hay una fuga cerca. Como gas noble, el helio es absolutamente inofensivo, no añade sabor ni olor al agua. No puede reaccionar con el agua, con nada de lo que hay en el agua, con los materiales de las tuberías ni con ninguna otra sustancia.

El método del gas trazador es adecuado para cualquier material de tubería y cualquier diámetro. Una ventaja que tiene sobre otros métodos de detección de fugas es su capacidad para encontrar y localizar fugas en tuberías no metálicas y de gran diámetro. En las tuberías de presión no metálicas (PVC, PE u hormigón), el ruido no se desplaza fácilmente y es difícil de detectar con tecnologías de detección de fugas acústicas externas. El método del rastreador de gas es eficaz en las tuberías de gran diámetro, donde hay muy pocos puntos de escucha o muy distantes y donde las presiones bajas/intermitentes, las altas presiones o la geometría cambiante de las tuberías dificultan otros métodos.



El sensor o "sniffer" debe caminar por encima de la tubería, por lo que es necesario que la ubicación de la tubería esté bien marcada y sea fácilmente transitable. Además, si la superficie del suelo es impermeable, puede ser necesario perforar agujeros en el hormigón o el asfalto para permitir que el gas salga a la superficie.

El gas se inyecta a través de un tapón estándar de 20 mm. o de una boca de incendios instalada en una tubería principal de agua, una tubería o un accesorio aguas arriba de la zona que se va a inspeccionar en busca de fugas. Dado que la manipulación de gases requiere habilidades y equipos especializados, esta tecnología no suele ser proporcionada por el personal interno de la empresa de agua, sino por proveedores de servicios especializados que contratan a las empresas de agua para llevar a cabo el estudio de detección de fugas.

SUEZ ha desarrollado este sistema de detección de fugas mediante gas trazador sin interrupción de la prestación del servicio de agua bajo la denominación iDROLOC (Figura 4.3).

El campo de aplicación de la búsqueda de fugas con gases trazadores es extensible a toda tipología de material, condiciones de instalación (por ejemplo, en vacío o en carga), materiales, presión, etc. Por ello, que es ideal para localización de fugas en tuberías de cualquier diámetro, pero especialmente, en tuberías de grandes diámetros o con pocos accesos a la tubería.

Los elementos de los que consta son:

- **Sistema de inyección para:**
  - Difundir el gas de forma homogénea en la tubería, sin pérdida de agua.
  - Medir la presión en tubería para ajustar la de inyección.
  - Controlar de la cantidad de Helio inyectado.
- **Herramientas para la detección:**
  - Sistema de perforación.
  - Ventosa automática para la aspiración del gas saliente del terreno.
  - Equipo de generación de vacío.
  - Dispositivo para la medida en tiempo real de la concentración de Helio.

Las principales ventajas de este sistema son:

- Posibilita la localización de fugas en grandes conducciones, donde los métodos acústicos convencionales no son operativos.

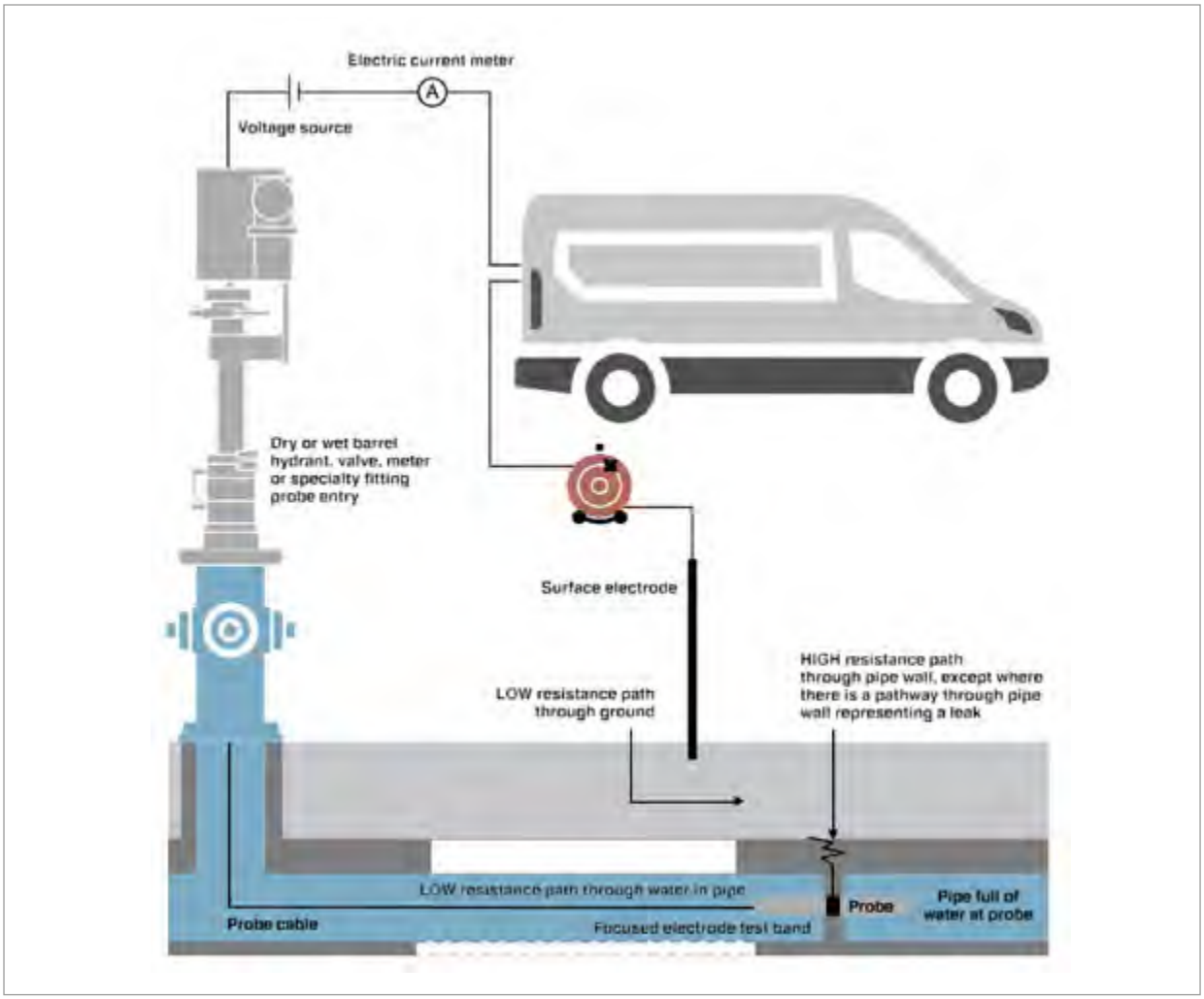


Figura 4.3. Fuente: SUEZ.

- No se ve afectado por los sonidos o vibraciones que puedan interferir en los sistemas de búsqueda de fugas.
- Es la mejor forma de encontrar fugas en tuberías de plástico o con bajas presiones en la red, sin necesidad de puntos de acceso a la misma.
- Es fácil de manejar; solo se necesita de un único operario para su utilización.
- Las fugas se localizan con precisión, lo que ahorra tiempo y recursos en reparaciones.
- Detección efectiva durante varios días tras la inyección, y se pueden encontrar fugas incluso en tuberías que no transporten agua.
- No afecta a la salud pública ni a la calidad del agua.
- Equipo de inspección totalmente portátil.
- Puede ser utilizado en tuberías en servicio, sin hacer ninguna modificación previa, como cierre de válvulas, modificación de bombeos, etc.
- Permite la prueba de estanqueidad para zonas sectorizadas y para pruebas de carga de tuberías.

4.5.4. Conductividad de bajo voltaje

La prueba de conductividad de bajo voltaje es una técnica que utiliza la corriente eléctrica para identificar fugas en tubos no metálicos. Se trata de un método de inspección anclado en el que se introduce una sonda en una tubería de distribución de



agua a presión a través de una boca de incendios (columna húmeda o seca) o de otro punto de acceso preparado específicamente para lanzar el dispositivo.

La prueba se lleva a cabo aplicando un potencial eléctrico (normalmente en el rango de 9-11 V con una frecuencia de 0,5-1,5 kHz) entre un electrodo en la tubería y un electrodo en la superficie. El electrodo exterior puede ser cualquier cosa que permita la conexión eléctrica a la tierra, como una varilla de puesta a tierra, un anclaje de cable, un poste de señalización. En la Figura adjunta se muestra un circuito eléctrico simplificado para este procedimiento.

A medida que el electrodo se mueve dentro del tubo, la ubicación y el tamaño de las fugas se encuentran por la cantidad de corriente eléctrica que se mide. En los casos en los que se produce una fuga de agua del tubo eléctricamente aislado, también se produce una fuga de corriente eléctrica. La alta resistencia eléctrica de la pared del tubo no metálico sólo permite que fluya una corriente eléctrica muy pequeña entre los dos electrodos, a menos que haya un agujero o un vacío en la pared del tubo, como una grieta, una junta o una conexión defectuosa. Cuanto mayor sea el flujo de corriente eléctrica a través de la abertura de la tubería, mayor será el tamaño del defecto.

Dado que las pruebas de conductividad de bajo voltaje se basan en la diferencia de las propiedades de alta resistividad eléctrica de las paredes del tubo (es decir, no conductoras) frente a la baja resistividad eléctrica de la tierra que la rodea, este método de prueba funciona bien en tubos con materiales no conductores, como los tubos de plástico (PVC o PE), los tubos revestidos curados in situ (CIPP) o los tubos de plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP). Los métodos acústicos aplicados externamente suelen ser menos eficaces en estos tipos de tubos. Por otra parte, los materiales de los tubos metálicos (es decir, hierro dúctil, hierro fundido y acero), que son excelentes conductores de la corriente eléctrica, no son adecuados para las pruebas de conductividad de baja tensión. El uso en materiales de tubos de hormigón (CA, PCCP y RCP) es menos problemático: se han demostrado resultados precisos en tubos de hormigón.

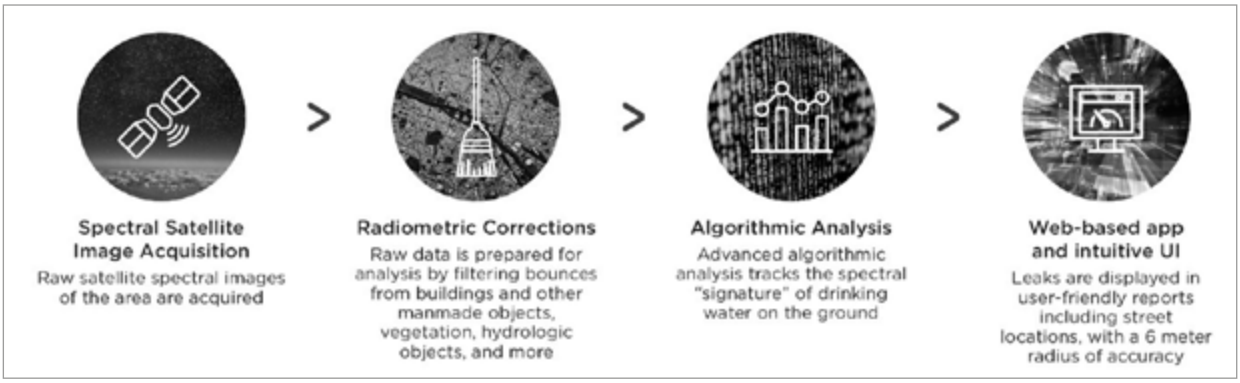
4.5.5. Detección de fugas por satélite

Esta técnica utiliza satélites en órbita terrestre para detectar fugas de agua potable en los sistemas de agua urbanos. La detección de fugas por satélite se basa en un algoritmo que detecta las fugas subterráneas mediante el análisis de imágenes micro-espectrales de satélite. El algoritmo se basa en el hecho de que las diferentes sustancias de la naturaleza tienen firmas espectrales únicas. El algoritmo procesa cada píxel de la imagen de radar y localiza la "firma" espectral del agua dulce en él. Esta firma es la relación entre una longitud de onda electromagnética y su interacción con el agua.

Las imágenes de satélite de microondas se reciben como entrada, tras lo cual se aplica una manipulación matemática para proporcionar un análisis de las coordenadas de la fuga. Además, el análisis estima el tamaño de la fuga y tiene la capacidad de detectar fugas de agua potable entre 1 y 3 metros bajo tierra. A esta profundidad, el agua potable (tratada) no suele existir sin una razón, por lo que después de filtrar lagos, piscinas, activos de drenaje, activos de alcantarillado y otras interferencias, esta información proporciona una evaluación de fugas de agua. Todo el entorno de las tuberías de agua de una ciudad puede ser evaluado a la vez, con la capacidad de identificar fugas en un radio de acción de hasta 100 m.

Un desglose de alto nivel del proceso de captura, análisis y visualización de datos para la tecnología de detección de fugas por satélite se enumera aquí y se muestra gráficamente en la Figura adjunta.

1. Un sensor de microondas adquiere imágenes.
2. Un algoritmo prepara los datos brutos para su análisis.



3. Se analiza una imagen de microondas corregida y se identifican las fugas de agua dulce. El tamaño de las fugas se estima comparando los resultados del algoritmo con la infraestructura local.
4. Los datos normalizados se presentan gráficamente con los resultados en una aplicación basada en la web. Los equipos sobre el terreno reciben “hojas de fugas” que les permiten confirmar y reparar las fugas.

Tabla 4.1. Tecnologías de inspección disponibles para las tuberías de presión

Método	Estudios de corrosividad del suelo	Acústico	Campo remoto electromagnético	Ultrasonido	Dispersión del flujo magnético	Banda ancha electromagnética	Otros	Enfoque típico recomendado
Descripción	Diversos métodos electromagnéticos, eléctricos y de laboratorio caracterizan la corrosividad de los suelos, detectan y miden la actividad de la corrosión y evalúan la eficacia de protección contra la corrosión/ protección catódica.	Velocidad acústica: se calcula la rigidez de la pared del tubo de la velocidad de transmisión del sonido. Monitoreo acústico: alerta y señala la ubicación de las roturas de cables.	Los cambios en las señales electromagnéticas indican cables rotos, picaduras de corrosión y cambios en el espesor de las paredes y anomalías de fatiga.	La reflexión de las ondas sonoras se utiliza para medir el grosor de varios tipos de materiales. La herramienta debe tener un contacto directo o un acoplamiento líquido con el material que se está midiendo.	Los cambios en los campos magnéticos se utilizan para detectar puntos de corrosión y otros defectos. La herramienta debe estar en constante, a corta distancia de la pared de la tubería.	Los cambios en las señales electromagnéticas indican picaduras de corrosión y cambios en espesor. El escáner se mantiene cerca de la tubería, pero funciona a través de los revestimientos, recubrimientos y escamas.	Muestreo de tubos para diversas pruebas físicas. Entrada tripulada para la visual y sondeo (pruebas de delaminación). Exámenes petrográficos (microscópicos) de hormigones y morteros.	ENFOQUE GENERAL (todo tipo de tuberías): 1. Análisis estadístico de los datos disponibles. 2. Priorización del riesgo (probabilidad y consecuencia del fallo) 3. Revisión de registros (reparaciones de fuga/ roturas, planos, especificaciones, informes, información del suelo). 4. Reconocimiento del emplazamiento (accesibilidad, condiciones de tráfico, otros servicios públicos). 5. Planificación de la inspección (paradas, desvíos, permisos, alternativas). 6. Detección de fugas y/o inspección de evaluación de la condición del terreno.

Tabla 4.1. *(Continuación)*

Método	Estudios de corrosividad del suelo	Acústico	Campo remoto electromagnético	Ultrasonido	Dispersión del flujo magnético	Banda ancha electromagnética	Otros	Enfoque típico recomendado
Fibrocemento (AWWA C402)	Evaluar el potencial de deterioro del fibrocemento (pH y sulfatos).	La velocidad acústica puede detectar un gran deterioro.	n/a	n/a	n/a	n/a	Pruebas de las muestras: • Tinción con fenolftaleína. • SEM/EDS. • Petrografía.	1. Pruebas de muestras de oportunidad de reparaciones y acometidas. 2. Mapeo con SIG de los datos de los suelos, las roturas y los datos de evaluación del estado de los mismos. 3. La evaluación de la condición específica de tuberías críticas.
Tubo de presión de hormigón pretensado con camisa de chapa (AWWA C301 y C304)	Evaluar el riesgo de la fatiga del metal y del hormigón. Detectar la corrosión activa.	Monitorización de acústica para la detección de roturas de cables. La velocidad acústica puede utilizarse para priorizar otras evaluaciones.	Se utiliza para detectar cables rotos.	n/a	n/a	Evaluaciones puntuales externas e internas.	Sondeo interno para detectar la delaminación. Visual interno (entrada tripulada o CCTV). Evaluación directa externa. Análisis petrográfico de mortero/hormigón.	1. Análisis de riesgo basado en el tipo de tubería, fabricante, tipo de cable, año de fabricación, corrosividad. 2. Entrada/sondeo tripulado (si es factible). 3. Escaneo electromagnético. 4. Monitorización acústica.
Tubo de presión de hormigón armado (AWWA C300, C302 y C303)	Evaluar el riesgo de fatiga de metal y del hormigón. Detectar la corrosión activa.	n/a	Método emergente para detectar las barras rotas y la corrosión de las camisas.	n/a	n/a	Evaluaciones de puntos externas. Método emergente para el escaneo interno.	Sondeo interno para detectar la delaminación. Visual interno (entrada tripulada o CCTV). Evaluación directa externa. Análisis petrográfico de mortero/hormigón.	1. Estudio sobre la corrosión. 2. Evaluación directa externa donde el riesgo de corrosión es mayor. 3. Examen de entrada tripulada. 4. Escaneo electromagnético.

Tabla 4.1. *(Continuación)*

Método	Estudios de corrosividad del suelo	Acústico	Campo remoto electromagnético	Ultrasonido	Dispersión del flujo magnético	Banda ancha electromagnética	Otros	Enfoque típico recomendado
Función dúctil Función gris (AWWA C150 y C153)	Evaluar la corrosividad del hierro. Monitorizar la actividad de la corrosión.	La velocidad acústica puede detectar un gran deterioro.	Escaneo interno detallado de las tuberías y evaluación externa de los puntos. Trabajos con mortero de cemento y tuberculación.	Se utiliza para evaluaciones externas de puntos.	Escaneo interno de tuberías no revestidas de Cemento mortero Evaluaciones externas de puntos.	Evaluaciones de puntos externos. Método emergente para el escaneo interno.	Análisis petrográfico de mortero.	1. Estudio sobre la corrosión. 2. Campo electromagnético remoto.
Acero (AWWA C200)	Evaluar el potencial de fatiga del metal y del hormigón. Monitorizar la actividad de la corrosión.	La velocidad acústica puede detectar un gran deterioro.	Se utiliza para el escaneo interno detallado de las tuberías. Funciona con mortero de cemento y tuberculación (incrustaciones).	Se utiliza para evaluaciones externas de puntos.	Escaneo interno y externo de tuberías revestidas y no revestidas de Cemento mortero	Evaluaciones de puntos externos. Método emergente para el escaneo interno.	Análisis petrográfico de mortero.	1. Estudio sobre la corrosión. 2. Potencial de la tubería al suelo; evaluación de la protección catódica. 3. Campo remoto electromagnético o Dispersión del flujo magnético.
Cobre	Evaluar el potencial de fatiga de los materiales.	n/a	Se utiliza para el escaneo interno detallado de las tuberías.	n/a	n/a	Potencial para el escaneo detallado de las tuberías.	Los exámenes forenses de las tuberías rotas. Monitoización de ruido electroquímico.	Evaluar los métodos y normas de construcción: 1. Evaluar la corrosividad del suelo. 2. Los exámenes forenses de los fallos.
Tubos plásticos (HDPE – AWWA C906) (PVC – AWWA C906)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	Los exámenes forenses de las tuberías rotas, utilizando pruebas de laboratorio y mecánicas.	1. Revisión de los planos, especificaciones y registros de inspección. 2. Examen forense si se trata de un fallo precoz o frecuente.

AC: fibrocemento; CCTV: circuito cerrado televisión; CML: revestimiento cemento mortero; HDPE: PEAD; n/a: no aplicable; PVC: cloruro polivinilo; SEM/EDS: Microscopio Electrónico de Escaneo con espectroscopía de energía dispersiva.

5 Tecnologías de inspección para tuberías de hormigón y metálicas

5.1. Inspección de tuberías de hormigón

5.1.1. Tecnología electromagnética

La tecnología electromagnética (EM) tiene una larga historia en la evaluación de tuberías que se remonta a varias décadas. La tecnología EM puede ser ampliamente categorizada como electromagnetismo en el dominio del tiempo y electromagnetismo en el dominio de la frecuencia. Ambas variaciones de la tecnología EM se utilizan para la evaluación de tuberías hoy en día y se ofrecen como electromagnetismo de banda ancha (BEM), un derivado de la corriente parásitas pulsada (PEC) y la inspección de campo remoto (RFT), también conocida como corrientes parásitas de campo remoto (RFEC) o técnica electromagnética de campo remoto.

La tecnología EM puede utilizarse para evaluar la condición de la pared del tubo midiendo el grosor relativo de la pared del tubo e identificando las áreas de pérdida de la pared y de corrosión. Los datos proporcionados por la tecnología EM pueden utilizarse para estimar la vida útil restante y ayudar a fundamentar las decisiones de planificación de capital para supervisar, reparar o reemplazar las tuberías existentes. Varias herramientas disponibles en el mercado han utilizado con éxito la tecnología EM; no obstante, existen ciertas limitaciones que deben considerarse antes de su aplicación.

La aplicabilidad de la tecnología EM a las tuberías de agua puede resumirse de la siguiente manera.

- Tipos de materiales aplicables:
  - Tubo hormigón armado con camisa de chapa (BWP/Bonna).
  - Tubo hormigón pretensado con camisa de chapa (PCCP).
- Los rangos típicos de diámetro de los tubos: 80 mm y más.
- Rangos típicos de revestimiento y recubrimiento: 12,5 a 25 mm máximo.
- Parámetro de salida típico: espesor de la pared (con respecto a una lectura “nominal” del tubo).

Las herramientas actuales varían en su resolución de inspección, normalmente equilibrando las compensaciones entre la mejora de la calidad de los datos y la velocidad de exploración. Los proveedores de todo el mundo ofrecen una serie de herramientas para diferentes tamaños de tuberías y aplicaciones, incluyendo tuberías de aguas residuales.



Figura 5.1. Herramienta EM de nado libre. Fuente: Xylem Assessment Services.



Figura 5.2. Herramienta de alta resolución y gran diámetro. Fuente: Xylem Assessment Services.

La tecnología EM para detección de rotura de espiras de las tuberías de PCCP se desarrolló y patentó a mediados de los años 90. La primera herramienta comercial fue construida posteriormente para inspeccionar las PCCP sobre el terreno. Desde entonces se han desarrollado múltiples variaciones de la tecnología EM y sus componentes electrónicos asociados en varias plataformas tripuladas y no tripuladas.

Las inspecciones EM determinan una firma EM para cada tubo para identificar anomalías producidas por zonas de espiras rotas. Se evalúan varias características asociadas a una anomalía (longitud, magnitud, cambio de fase, etc.) para obtener una estimación del número de espiras rotas. Este método de inspección puede cuantificar el daño del bobinado y es el método más aceptado para determinar el estado inicial de un tubo. Para las PCCP, existe un mecanismo diferente que puede utilizarse para determinar el estado estructural del tubo. Las corrientes parásitas generadas en la espira pueden fluir por la espira, generando un campo solenoidal (Figura 5.3). Si una rotura de una espira interrumpe la corriente afectará al campo magnético. La herramienta de evaluación electromagnética genera corrientes en la espira y detecta cuando el campo eléctrico se altera por roturas de la espira.

Para crear una corriente eléctrica en la espira, la herramienta de evaluación del estado genera un campo electromagnético dentro de la PCCP. Se introduce una corriente eléctrica alterna de baja frecuencia (normalmente de menos de 100 Hz) en la espira (conocida como bobina excitadora) posicionada cerca de la superficie interior del tubo. El campo electromagnético generado por esta bobina se extiende por el núcleo de hormigón, la camisa de chapa de acero y finalmente por la espira.

A medida que la bobina viaja a lo largo del tubo, el campo se mueve también, lo que crea corrientes en las espiras cercanas. Siempre que la espira sea continua y no presente roturas, la corriente fluirá de manera uniforme por la espira; sin embargo,

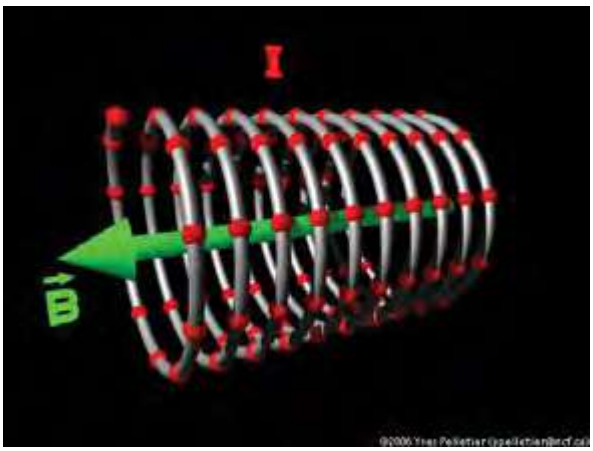


Figura 5.3. Corrientes eléctricas inducidas por un campo magnético variable en el tiempo. Fuente: Xylem Assessment Services.

cuando hay una espira rota, se forma una discontinuidad en la corriente. Cuando el campo pasa por una sección de espira rota, se generan corrientes que forman líneas de campo magnético opuestas.

Los detectores se colocan en el lado opuesto del tubo desde la bobina excitadora para registrar las variaciones del campo magnético que se crean cuando las espiras rotas interrumpen el flujo de la corriente. Analizar e interpretar la respuesta del campo eléctrico permite calcular el número de espiras rotas y la ubicación aproximada de las espiras rotas a lo largo del tubo.

a) Utilización de Plataformas de inspección EM

La utilización de esta plataforma es el medio para poder insertar la tecnología en el tubo y extraer los datos del mismo. Las tecnologías deben seleccionarse en base al material del tubo que se está inspeccionando. La utilización de la plataforma se selecciona en base al diámetro del tubo y la disponibilidad de acceso. Los tipos de plataforma que se utilizan pueden ser: tripuladas, robóticas con cable umbilical y robóticas sin cable.

La inspección EM de PCCP se realizó por primera vez en un carro de inspección tripulado. Esta plataforma tiene la ventaja de ser muy fiable y con un coste de inspección normalmente menor. No obstante, el carro de inspección tripulado requiere que el tubo se vacíe completamente y se proporcione un espacio confinado de soporte para la entrada del personal. Las inspecciones EM tripuladas normalmente requieren una hora para configurar el equipo en el tubo. Los índices de inspección varían, pero suelen situarse entre 800 m y 3,2 km por hora, dependiendo de la cantidad de obstáculos, cambios de diámetro y secciones de tubo encontradas con camisa de chapa de calibre grueso. La Figura 5.4 muestra a un técnico utilizando un carro tripulado de inspección EM.

Las plataformas robóticas también pueden desplegar tecnología EM. Con una plataforma robótica, se puede realizar la inspección EM despresurizando una tubería en puntos elevados en lugar de drenar la totalidad de la tubería. Se rastrea la plataforma robótica con cable que puede transportar otros sensores, además de los propios de la inspección EM. La plataforma robótica con cable puede inspeccionar hasta 2.743 metros en cualquier dirección desde un único punto de entrada, lo que requiere una o dos horas para configurar el equipo y avanzar a un ritmo de aproximadamente entre 0,8 y 1,6 kilómetros por hora. Los índices de inspección dependen principalmente del aumento de la fuerza de resistencia en el cable que se desarrolla a medida que el robot atraviesa curvas y a medida que alcanza mayores distancias. La figura 5.5 muestra una plataforma robótica con cable antes de su despliegue en una tubería PCCP.



Figura 5.4. Técnico empujando un carro de inspección electromagnética a lo largo de una PCCP. Fuente: Xylem Assessment Services.

Se ha desarrollado una plataforma robótica sin cable que permite que se realicen inspecciones EM en tuberías que están totalmente presurizadas y en servicio. Esta plataforma usa el flujo del agua para propulsarse y puede atravesar obstáculos, incluidos algunos tipos de válvulas de mariposa. Las inspecciones con plataformas robóticas sin cable suelen requerir unas cuantas horas para configurarse e insertarse antes de avanzar a aproximadamente el 95 % de la velocidad del flujo por la tubería. La figura 5.1.1_5 muestra una plataforma robótica sin cable que se hace descender a una tubería PCCP despresurizada.





Figura 5.5. Plataforma robótica con cable y sin cable equipada con tecnología de inspección electromagnética. Fuente: Xylem Assessment Services.

b) Requisitos de acceso de inspección electromagnética para la inspección interna

Los requisitos de acceso para llevar a cabo una inspección electromagnética interna dependen de la plataforma utilizada. Las plataformas tripuladas requieren una entrada tripulada, de modo que las tuberías deben aislarse de los sistemas de distribución y transporte, deben vaciarse y asegurarse para el acceso tripulado. La inspección electromagnética tripulada suele llevarse a cabo solo en tubos a partir de 900 mm. En caso de plataformas robóticas con cable, el diámetro mínimo de acceso en un punto elevado despresurizado es actualmente de 450 mm. Las plataformas robóticas con cable pueden atravesar cambios de diámetro de poca importancia y un número limitado de curvas, pero no pueden atravesar válvulas de mariposa. Los requisitos de acceso para inspecciones con plataformas robóticas sin cable dependen de si la inserción y extracción de la herramienta debe realizarse en condiciones presurizadas. Si la tubería debe estar completamente presurizada en todo momento, son necesarios tubos de inserción y extracción especializados con numerosos requisitos, así como una revisión detallada de los planos para determinar si son necesarias modificaciones del acceso. Si la herramienta de inspección robótica sin cable se puede insertar y extraer aislándola y despresurizándola temporalmente en un punto elevado, la herramienta puede insertarse a través de un acceso de 200 mm o mayor para tubos de hasta 900 mm de diámetro y un acceso de 300 mm o mayor para tubos de más de 900 mm de diámetro. La herramienta de inspección robótica puede pasar por numerosos tipos de válvulas de mariposa y la mayoría de los obstáculos en una tubería de transporte principal. Las limitaciones de acceso y de geometría de los tubos para todas las plataformas siguen cambiando a medida que evolucionan las plataformas, con lo que las limitaciones descritas anteriormente deben confirmarse antes de elegir un método.

c) Las limitaciones de inspección electromagnética

Las inspecciones detectan anomalías EM, o diferencias, del campo inducido esperado de un tubo

de PCCP. Las anomalías que consisten en espiras rotas son especialmente importantes. Sin embargo, otra interferencia puede enmascarar o distorsionar la señal electromagnética, lo que afecta a la capacidad de detectar y cuantificar las espiras rotas. Esta sección resume los factores que pueden afectar a la exactitud de la detección y cuantificación de las espiras rotas. Deberán obtenerse más detalles del proveedor de la inspección antes de realizar dicha inspección.

d) Requisitos de acceso de inspección electromagnética para la inspección externa

Las herramientas de inspección externas se pueden usar para confirmar la ubicación y cantidad de espiras rotas en tubos pretensados que han sido excavados. Para facilitar esta inspección, es necesario excavar para exponer al menos la parte superior del tubo a inspeccionar, con al menos la parte superior de una cuarta parte del tubo libre del recubrimiento del suelo. Además, la sección completa del tubo de junta a junta debe estar lo suficientemente limpia como para permitir que la herramienta recorra el tubo con una perturbación mínima. Como el acoplamiento EM con esta herramienta no necesita pasar a través de la camisa de chapa de acero, la herramienta de inspección EM externa utiliza una frecuencia mucho mayor. Lo ideal es que la excavación para una inspección EM externa se extienda más allá de ambas juntas del tubo inspeccionado para permitir que la herramienta pueda escanear completamente ambas secciones de junta e identificar cualquier daño cerca de las juntas. La Figura 5.6 muestra un tubo excavado para inspección externa.

e) La exactitud y exhaustividad de la información proporcionada por el gestor

Los planos que indican cómo está construida cada clase de tubo (grosor de la camisa de chapa, diámetro y espaciado de la espira, presencia o ausencia de flejes metálicos, presencia de bocas de descarga u otros accesorios, etc.) se utilizan para identificar y cuantificar las zonas donde hay roturas. Las discrepancias entre los planos y los datos pueden afectar a la exactitud del análisis.





Figura 5.6. Ejemplo de tubería excavada para inspección electromagnética externa. Fuente: Xylem Assessment Services.

e.1) La existencia de materiales ferromagnéticos (acero) cerca del tubo

La presencia de acero extra cerca del tubo puede provocar una distorsión de la señal que podría enmascarar espiras rotas o provocar anomalías que podrían interpretarse erróneamente como espiras rotas.

Proximidad de redes eléctricas: En algunos casos, las redes eléctricas en las proximidades pueden provocar distorsiones en la señal debido a los campos de corrientes electromagnéticas vagabundas. Esto puede limitar la efectividad del análisis si la distorsión es demasiado grave. Esta interferencia es rara, pero se añade a este manual para hacerlo más completo.

e.2) Tubería de camisa de chapa embebida sin flejes metálicos

Si bien la señal EM puede ser muy sensible a una única rotura de espira en este tipo de tubos, se tiende a notificar un exceso de la cantidad de espiras rotas. El calibrado de la señal EM para cuantificar el número de espiras rotas es especialmente importante en este tipo de tubo, pero incluso con calibrado, se notifica un exceso de espiras rotas. Debido a estos problemas inherentes a este tipo de tubo, se recomienda que se realicen pruebas y/o calibrados de verificación.

Las espiras rotas cerca de una junta: la señal EM no puede detectar espiras rotas cerca de juntas. La distancia exacta desde una junta en la que la señal EM no consigue detectar espiras rotas es variable, pero se ha demostrado que puede llegar hasta los 450 mm.

e.3) Las espiras rotas no contiguas

Cuando las espiras rotas están separadas por espiras que no están rotas, estas últimas pueden estar ocultas debido a las señales de rotura y pueden aparecer como rotas dependiendo de la distancia desde las espiras pretensadas rotas hasta los que no lo están. Las espiras rotas no contiguas pueden producir una anomalía que es mayor que el daño real de la espira pretensada asociada.

La verificación de los resultados de la inspección EM para las PCCP de tipo LCP puede realizarse externamente utilizando una prueba de continuidad, aprovechando el hecho de que una espira rota carece de continuidad eléctrica. La prueba de continuidad requiere que se desconche una franja de mortero, de aproximadamente 15,2 cm de extensión, para exponer los espiras, normalmente en la corona de la tubería. Para retirar los escombros de la superficie o la corrosión de las espiras se utiliza un cepillo a fin de mejorar el contacto con las espiras de prueba. La prueba de continuidad mide la tensión diferencial, también conocida como potencial, mediante un multímetro digital de alta impedancia que se pasa varias veces sobre las espiras adyacentes. La medición de la tensión diferencial entre espiras adyacentes se basa en el concepto de que las superficies eléctricamente continuas son equipotenciales (es decir, que la diferencia entre espiras adyacentes sin rotura es cercana a cero). No obstante, en el caso de una espira que físicamente esté rota y separada (que sea discontinua eléctricamente), existirá una tensión diferencial entre las espiras adyacentes porque las superficies no son equipotenciales. El potencial se puede medir porque se ve afectado por múltiples y paralelos pasos de corrientes bajo limitaciones electrolíticas incluido el paso por la rotura, el paso entre giros adyacentes a través del hormigón, y el paso a través del hormigón y el suelo circundante. Dado que la espira debe ser el paso eléctrico primario, la prueba de continuidad eléctrica no es aplicable a tuberías con flejes metálicos.

El RFT tiene casi la misma sensibilidad de detección tanto en la superficie interna como en la externa de un tubo ferromagnético. El RFT puede usarse internamente en un tubo para detectar defectos internos y externos y se presta muy bien a la detección y dimensionamiento tanto del adelgazamiento general de la pared como de las picaduras localizadas en tubos de fundición gris, fundición dúctil y acero. El RFT no requiere un contacto íntimo con la pared del tubo, lo que lo hace adecuado para tubos con revestimiento de mortero o con incrustaciones internas.

El RFT detectará y determinará el tamaño de la grafitización y puede detectar inclusiones y fracturas de la infraestructura ferrosa que puedan ocurrir dentro de la pared del metal bajo inspección.

Algunas herramientas de RFT pueden utilizarse para inspeccionar tuberías desde el exterior a través de revestimientos externos, aislamiento y mortero de cemento. El revestimiento externo tiene idealmente menos de 75 mm de espesor y puede ser cubierto por un revestimiento metálico no magnético (como el acero inoxidable o el aluminio).

Las sondas básicas de RFT tienen una bobina excitadora y una bobina detectora. Ambas bobinas están enrolladas coaxialmente y están separadas por una distancia superior al doble del diámetro del tubo. Esta distancia axial es característica del RFT. Si el excitador y el detector se colocaran cerca uno del otro, el detector sólo sería sensible al acoplamiento de energía directa del excitador en su proximidad.

La bobina excitadora se acciona con una corriente sinusoidal de frecuencia relativamente baja para producir un campo EM. Este campo cambiante induce fuertes corrientes parásitas circunferenciales que se extienden tanto axialmente como radialmente en la pared del tubo. Estas corrientes parásitas, a su vez, producen su propio campo EM que es recogido por el conjunto de bobinas receptoras. Al monitorizar la consistencia del voltaje inducido en las bobinas receptoras, uno puede monitorizar los cambios en la pared del tubo. La fuerza del campo magnético a esta distancia de la bobina excitadora es bastante débil, pero es sensible a los cambios en la pared de la tubería desde el diámetro interior al exterior. La resolución de la herramienta depende del número de detectores utilizados. Se pueden utilizar hasta ocho detectores en una tubería de 150 mm.

Las herramientas EM se introducen en un extremo abierto de un tubo o “cuerpo de lanzamiento” y pueden ser empujadas por el flujo del producto, el agua, la mano o la presión del aire hasta la distancia objetivo. Se retiran en el extremo más alejado a través de un “cuerpo receptor” o pueden ser retirados con un simple torno manual o eléctrico. En el caso de redes de 150 y 200 mm, las herramientas pueden ser lanzadas desde las bocas de incendio.

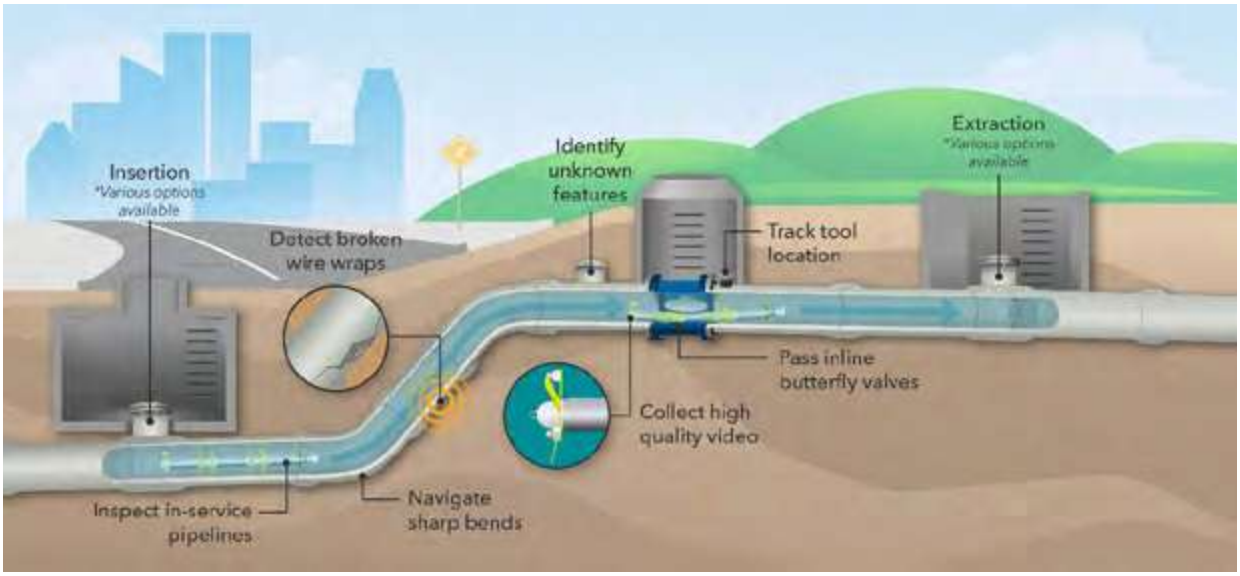


Figura 5.7. Inspección inline tuberías PCCP. Fuente: Xylem Assessment Services.

Las descripciones de cada fila de este cuadro son las siguientes.

- Herramienta Descripción:
  - *Tipo de herramienta:* el nombre de la descripción genérica de la herramienta.
  - *Intimidad de la pared del tubo:* descripción de la distancia típica entre la herramienta y la pared del tubo.
- Aplicabilidad:
  - *Material:* los materiales que la herramienta puede evaluar.
  - *Diámetro:* el rango de diámetros que la herramienta puede evaluar.
  - *Revestimiento/Recubrimiento:* el grosor máximo y los materiales compatibles de los revestimientos a través de los cuales la herramienta puede evaluar.
- Acceso y preparación:
  - *Se requiere un corte:* "*sí*" indica que es necesario poner la tubería fuera de servicio para realizar la inspección; "*no*" indica que la tubería puede permanecer en servicio durante la inspección.
  - *Drenaje requerido:* «sí» indica que al menos una parte del diámetro del tubo necesita permanecer seco para una inspección.
  - *Tamaño del acceso*: diámetro libre mínimo requerido para que la herramienta se inserte en el tubo.
  - *Método de propulsión:* el medio por el cual la herramienta se mueve a través del tubo.
  - *Otros:* elementos adicionales de preparación del tubo requeridos o limitaciones de acceso.
- Alcance y productividad:
  - *Rango:* la distancia que típicamente puede ser inspeccionada por la herramienta desde el punto de inserción.
  - *Criterio de alcance:* cualquier característica de la tubería que pueda afectar al alcance.
  - *Productividad diaria típica*: la distancia total de inspección típica que puede ser inspeccionada por día una vez que la herramienta está en el tubo. El tiempo necesario para preparar la inserción de la herramienta en el tubo puede variar significativamente en función de las condiciones del campo y, por tanto, se ha excluido.
  - *Personal*: el número mínimo típico de personal recomendado en el sitio para realizar la inspección, incluyendo el personal del propietario y el personal del proveedor de la herramienta.
- Datos de salida:
  - *Tipo de defecto:* una descripción de los tipos de defectos que pueden ser observados.
  - *Tamaño del defecto:* una descripción del tamaño mínimo de los defectos que pueden observarse.
  - *Ubicación del defecto:* una descripción de la ubicación del defecto o defectos que la herramienta puede detectar a lo largo de la tubería en sentido longitudinal, circunferencial o a través del espesor de la pared.
  - *Datos proporcionados:* describe el formato y el contenido de los datos proporcionados.
- Ventajas y desventajas:
  - *Limitaciones:* describe las limitaciones adicionales de la herramienta.
  - *Ventajas:* describe ventajas adicionales de la herramienta.
  - *Desventajas:* describe desventajas adicionales de la herramienta.

Tabla 5.1. Las herramientas disponibles que utilizan la tecnología electromagnética.

	Despliegue de nado libre		Despliegue anclado		Despliegue manual	
	Flotante de forma neutral, nado libre	Alta resolución, nado libre	Robot autopropulsado	Anclado en línea Herramienta de inspección	Escáner de mano	Carro con tripulación
Integridad con la pared del tubo	Detectores en los pétalos estabilizadores.	Conjunto de detectores rígidos o flexibles cerca de la pared interior del tubo, los detectores no están en contacto con la pared del tubo. Todo contacto con el tubo es a través de componentes de goma blanda para evitar daños a los revestimientos internos de cemento.	Conjunto rígido mantiene los sensores cerca de la pared del tubo.	Conjunto de detectores rígidos o flexibles cerca de la pared interior del tubo, los detectores no están en contacto con la pared del tubo. Todo contacto con el tubo es a través de componentes de goma blanda para evitar daños a los revestimientos internos de cemento.	Conjunto rígido mantiene los sensores cerca de la pared del tubo.	Conjunto rígido mantiene los sensores cerca de la pared del tubo.
Material	FG, FD, acero, HAC	FG, FD, acero, HAC	FG, FD, acero, HAC	FG, FD, acero, HAC	FG, FD, acero, hierro forjado, remaches	FG, FD, acero, hierro forjado, remaches
Diámetro tubo	16 - 48 in. 400 - 1.200 mm	3 - 36 in. 75 - 900 mm	24 - 48 in. 600 - 1.200 mm	3 - 48 in. 75 - 1.200 mm	No hay limitaciones para las aplicaciones externas. La entrada física es necesaria para las aplicaciones internas.	La entrada física es necesaria para las aplicaciones internas
Revestimiento y recubrimiento	Espesor máximo del revestimiento de 12,5 mm	El grosor máximo recomendado del revestimiento oscila entre 12,5 y 25 mm. El revestimiento más grueso impactará en los resultados	Espesor máximo del revestimiento de 12,5 mm	El grosor máximo recomendado del revestimiento oscila entre 12,5 y 25 mm. Un revestimiento más grueso impactará en los resultados	Sin limitaciones	Sin limitaciones
Corte suministro	No	Durante inserción	Durante inserción y durante entrada tripulada	Sí	Sí	Sí
Desagüe requerido	No	Sí	No es necesario para la oruga	Varios	Sí	Sí
Acceso	Brida 300 mm	A través de los lanzadores de pigs o de los laterales de un tamaño determinado	Brida 400 mm	Típicamente de tamaño normal con tubos de mayor tamaño accesibles a través de bocas de inspección	Punto de entrada del tamaño de un hombre	Depende del diámetro del tubo. Se requiere un punto de entrada del tamaño de un hombre para el carro tripulado

Tabla 5.1. *(Continuación)*

	Despliegue de nado libre		Despliegue anclado		Despliegue manual	
	Flotante de forma neutral, nado libre	Alta resolución, nado libre	Robot autopropulsado	Anclado en línea Herramienta de inspección	Escáner de mano	Carro con tripulación
Método de propulsión	Presión interna del agua	Presión interna del agua	Un carro robótico o un carro tripulado	El lanzamiento de la herramienta de salida es típicamente logrado con la presión del aire, recuperación por medio de la	Manual	Cañas, cabestrante, manual
Otros	Requiere aprox. 0,30 m/s flujo; 13,8 Bar	Húmedo o seco, las herramientas están selladas a una presión de 30 bar a 69 bar	Para las herramientas autopropulsadas, 6,9 bar máx. sin flujos. Para carros de propulsión manual, confinados Espacio listo para la ventilación, el acceso y la vigilancia del personal	La velocidad es controlada por la velocidad del cabrestante	Tubería limpia y desaguada La preparación de los espacios confinados: ventilación, acceso y vigilancia del personal	Tubería limpia y desaguada
Rango	Hasta 20 horas viajando al 80% de la velocidad de flujo	Hasta un rango de 24 km	2,4 km de cuerda. Hasta 5 km por inserción o distancia caminable por día (1,6-4,8 km)	Alcance limitado por la longitud del cable (típicamente en el rango de 1,6-4,8 km)	Depende del diámetro de la tubería	Depende del diámetro de la tubería
Criterios de curvatura (D = diámetro del tubo)	≥ Las válvulas de mariposa de 600 mm. Sin problemas. Las curvas de 90º sin problemas. La distancia de viaje depende del flujo	Codos hasta 90º conforme a la AWWA C110 (2012) y AWWA C153 (2011) estándares con radio de curvatura inferiores a 1 diámetro de tubo - típicamente 0.6-0.7D	Curvas de 1D y 90º de diámetro ≥ 600 mm	Codos hasta 90º conforme a la AWWA C110 (2012) y AWWA C153 (2011) estándares con radio de curvatura inferiores a 1 diámetro de tubo - típicamente 0.6-0.7D	Cualquier tamaño	150 mm y más grande; tubo de > 400 mm, curvas de 90º, sin problemas. Cuando está atado, las curvas (número, grados, ubicación para acceder punto) son el principal impulsor de la variación del rango
Productividad diaria típica	Hasta 20 horas viajando al 80% de la velocidad de flujo	7,5-8 km/d	1,6-4,8 km/d	0,8 km	De 3 a cientos de metros por día	Cientos de metros por día
Personal	Varía según las condiciones del campo	Una tripulación de 2 hombres para hasta 12 h, una tripulación de 4 hombres para carreras más largas	Varía según las condiciones del campo	Varía según las condiciones del campo	Operación mínima de 2 personas	Operación mínima de 2 personas
Tipo de defecto	Pérdida de pared localizada y corrosión. Agrupaciones de picaduras	Pérdida de pared localizada, pérdida de pared general, grafitización	Pérdida de pared localizada y corrosión. Agrupaciones de picaduras	Pérdida de pared localizada, pérdida de pared general, grafitización	Pérdida de pared localizada, pérdida de pared general, grafitización, fracturas laterales y circunferenciales	Pérdida de pared localizada, pérdida de pared general, grafitización, fracturas laterales y circunferenciales

Tabla 5.1. *(Continuación)*

	Despliegue de nado libre		Despliegue anclado		Despliegue manual	
	Flotante de forma neutral, nado libre	Alta resolución, nado libre	Robot autopropulsado	Anclado en línea Herramienta de inspección	Escáner de mano	Carro con tripulación
Tamaño del defecto	75 mm x 75 mm x 30% pérdida de pared	Resolución mínima x 30% pérdida de pared	75 mm x 75 mm x 30% pérdida de pared	Resolución mínima x 30% pérdida de pared	5-10% de pérdida de pared o lixiviación de hierro por debajo de la huella del sensor, detección de discontinuidad mínima asociada a fracturas, delaminación de la pared	5-10% de pérdida de pared o lixiviación de hierro por debajo de la huella del sensor, detección de discontinuidad mínima asociada a fracturas, delaminación de la pared
Datos recogidos	Espesor relativo de la pared. Identificación de la pérdida de pared localizada por volumen, área y porcentaje de pérdida de pared	Cuantificación del grosor de la pared, localización de las características de la tubería, cuantificación de las curvas	Espesor relativo de la pared. Identificación de la pérdida de pared localizada por volumen, área y porcentaje de pérdida de pared	Cuantificación del grosor de la pared, localización de las características de la tubería, cuantificación de las curvas	Detección de cambios en la señal BEM, intensidad o condición resultante de la pérdia de la pared grafitización, fracturas o delaminación	Detección de cambios en la señal BEM, intensidad o condición resultante de la pérdia de la pared grafitización, fracturas o delaminación
Limitaciones	La detección de defectos cerca de las articulaciones/ características es limitada. El grosor de la pared de más de 12 mm reduce la detección	Reducción de la sensibilidad en los accesorios (válvulas, bridas, etc.)	La detección de defectos cerca de las articulaciones/ características es limitada. El grosor de la pared de más de 12 mm reduce la detección	Reducción de la sensibilidad en los accesorios (válvulas, bridas, etc.). Alcance limitado por las curvas	Incapacidad de detectar picaduras aisladas, determinación de la corrosión externa frente a la interna	Incapacidad de detectar picaduras aisladas, determinación de la corrosión externa frente a la interna
Ventajas	Mínima interrupción del servicio. Normalmente no se requiere una limpieza previa. Puede pasar las válvulas en línea. No se requiere deshidratación	No se requiere deshidratación; explorará largos tramos en un solo despliegue; produce datos procesables de alta resolución necesarios para la prevención de fallos	Se puede realizar una inspección visual. Máximo control sobre la herramienta. También se puede realizar un perfilado con sonar y láser. El carro tripulado se puede desmontar rápidamente en la tubería para pasar las válvulas, las tes o las curvas cerradas en su ubicación	No se requiere deshidratación; explorará largos tramos en un solo despliegue; produce datos procesables de alta resolución necesarios para la prevención de fallos.	Escanear a través de revestimientos o recubrimientos gruesos, la capacidad de evaluar la condición en el momento de escaneo, facilidad de operación, prosicionamiento preciso de la rotura, visualización de datos en tiempo real	Escanear a través de revestimientos o recubrimientos gruesos, capacidad de escanear todos los diámetros de tuberías y navegar en curvas de 90 grados, facilidad de operación, precisión posicionamiento defectuoso, visualización de datos en tiempo real
Inconvenientes	Se requiere control de flujo (~0,3 m/s). La turbulencia puede afectar a la calidad de los datos. Menor resolución	Se necesita un control de flujo y una limpieza menor. Curva de aprendizaje empinada: los procedimientos de inspección en línea y los requisitos de acceso son nuevos para la mayoría de los operadores de servicios municipales	Es necesario el cierre y la despresurización en la inserción. Distancia de viaje afectada por los escombros, el barro, las pendientes y las curvas. El personal entra en el espacio confinado autorizado	Es necesario el cierre y la despresurización en la inserción. Distancia de viaje afectada por los escombros, el barro, las pendientes y las curvas. El personal entra en el espacio confinado autorizado	Velocidad de adquisición de datos. El cierre de la tubería y el desagüe es esencial cuando se requieren inspecciones internas	La velocidad de adquisición de datos, el cierre de tuberías y los requisitos de desagüe

Al seleccionar una tecnología para evaluar la pared de la tubería, se debe considerar la resolución de los datos necesarios para la aplicación. Las herramientas de EM proporcionan diferentes resoluciones que darán como resultado diferentes niveles de confianza para la toma de decisiones. Las consideraciones de resolución dependerán del riesgo de fallo de la tubería, que es un factor de la consecuencia y la probabilidad de fallo de la tubería. Las tuberías de mayor riesgo pueden justificar la necesidad de datos de mayor resolución, mientras que las tuberías de menor riesgo pueden ser evaluados suficientemente utilizando herramientas de menor resolución.

La tecnología EM generalmente proporciona una medición relativa del espesor de la pared de la tubería-línea. Sin embargo, los dispositivos BEM (EM de banda ancha) son mejores para detectar fracturas que los sistemas RFT (EM campo remoto de corrientes parásitas). La resolución se ve afectada por una serie de factores. El material y el grosor del tubo pueden cambiar la sensibilidad de la respuesta EM al grosor de la pared. El espaciado o el tamaño del sensor también puede cambiar la resolución.

La tecnología EM proporciona un método probado para medir con precisión el grosor de la pared de las tuberías metálicas. Las herramientas EM recogen datos que pueden informar sobre las decisiones de reparación y sustitución a corto plazo, así como sobre las decisiones de planificación de capital a largo plazo.

La tecnología está disponible en varias plataformas que pueden acomodar una amplia variedad de situaciones operacionales, proporcionando datos sobre el estado de la pared de la tubería en toda su longitud y circunferencia. El método funciona con mortero y otros revestimientos y recubrimientos comunes y con escamas. Sin embargo, puede ser necesaria cierta eliminación de incrustaciones (mediante pigging) a fin de facilitar el paso de la herramienta.

Las desventajas incluyen la necesidad de preparar el sitio para proporcionar acceso a la tubería para la inserción de la herramienta o las excavaciones para el acceso externo. Algunas herramientas requieren cambios temporales en las operaciones o el corte completo de la tubería.

Todos los métodos tienen limitaciones, y es importante comprenderlas al elegir la herramienta y al evaluar los resultados de la inspección. Generalmente, estas herramientas miden el grosor relativo de la pared evaluando los cambios que se observan en el campo EM al interactuar con la pared de la tubería. La calidad de los datos puede verse afectada por el movimiento errático de la herramienta, la excesiva velocidad de la herramienta o las interferencias de otros campos EM como las líneas eléctricas de alta tensión. Es importante una calibración adecuada al material específico del tubo y al espesor de la pared del mismo. La distorsión de la señal también puede ocurrir cuando otros materiales ferromagnéticos se encuentran muy cerca de la tubería. Las juntas (campana) o uniones (soldadas, con barra de bloqueo, remachadas, etc.) producirán una gran respuesta en los datos y pueden enmascarar la presencia de anomalías de pérdida de pared en la pared del tubo cerca de la unión o unión.

Las tuberías de hormigón pretensado con camisa de chapa (PCCP) han sido un problema en algunos casos porque pueden fallar sin previo aviso y de un modo catastrófico. En consecuencia, se ha prestado una gran atención a la evaluación de las tuberías de PCCP, y se han desarrollado muchas herramientas y técnicas específicas para este tipo de tuberías. Algunas de estas herramientas son, además, aplicables a otros tipos de materiales (en particular, a las tuberías con camisa de chapa con refuerzo de barra de acero como es el llamado Bonna).

Evaluar el estado de un tubo de hormigón pretensado con camisa de chapa (PCCP) es una tarea difícil que se realiza mejor utilizando una combinación de tecnología de pruebas no destructivas, inspección visual interna y sondeo (en la tubería embebida con camisa (ECP)), la ciencia de la ingeniería y el juicio experimental. El objetivo principal de una inspección es proporcionar una compren-

sión de la condición del componente estructural que proporciona la resistencia del tubo, el cable de pretensado. Una inspección electromagnética proporciona un método no destructivo de evaluación de la condición base del cable de pretensado. Las inspecciones electromagnéticas determinan una señal magnética para cada tubo para identificar las anomalías que se han producido por las zonas de las espiras rotas. Se evalúan varios accesorios asociados con una anomalía electromagnética para proporcionar una estimación del número de espiras rotas. Este método de inspección es capaz de cuantificar la cantidad de daño de las espiras y es el mejor método para determinar la condición de base de un tubo.

Las tuberías de hormigón armado con camisa de chapa (RCCP) pueden ser inspeccionadas utilizando tecnología electromagnética que determina una señal magnética para cada tubo para identificar anomalías que se producen por zonas de barras circunferenciales rotas, y otras variaciones de las características del tubo. Las barras circunferenciales rotas son visibles, medibles y pueden producirse por la corrosión a largo plazo, las condiciones de carga o los daños de un tercero.

a) Contexto de la inspección electromagnética

Durante años, ha sido posible explotar el concepto de corrientes parásitas o de Foucault para medir las propiedades estructurales de los metales. La aplicación de un campo magnético variable en el tiempo a las estructuras metálicas puede crear corrientes eléctricas internas como electrones libres que son impulsados por el campo a lo largo de irregularidades en el propio metal. Se han desarrollado muchas aplicaciones de este fenómeno para detectar secciones dañadas en tuberías de acero y hierro.

Las inspecciones electromagnéticas se utilizan para generar una corriente eléctrica en las barras de refuerzo y la camisa del tubo. Un generador de señales produce una corriente eléctrica alterna de baja frecuencia en una bobina de cable, conocida como bobina excitadora, situada en el centro o cerca de la superficie del tubo. El campo magnético generado por esta bobina se extiende a través del revestimiento y dentro de la camisa y las barras de refuerzo. A medida que la bobina se desplaza a lo largo del tubo, el campo también se mueve creando un campo magnético localizado que genera corrientes de Foucault en las barras de refuerzo y la camisa.

Cuando las barras de refuerzo circunferenciales están intactas, la corriente fluirá de manera uniforme; sin embargo, si existe un defecto, se forma una distorsión en la corriente. A medida que el campo magnético pasa sobre la sección de las barras de refuerzo rotas, se generan corrientes que forman líneas de campo magnético opuestas. Estas interrupciones en el campo magnético uniforme son registradas por la herramienta de inspección para su posterior análisis. El análisis y la interpretación de la respuesta del campo magnético permiten estimar el número de espiras de barras rotas, así como su ubicación aproximada a lo largo del tubo.

b) Consideraciones sobre el análisis

Las inspecciones electromagnéticas detectan anomalías electromagnéticas, o diferencias, en el campo inducido esperado de un PCCP o HAC. Las anomalías que son consistentes con espiras o barras rotas son importantes; sin embargo, el campo inducido de interés es pequeño y otras fuentes de interferencia pueden enmascarar o distorsionar el tamaño y la forma de la señal electromagnética. La precisión de la detección y cuantificación de la rotura de las espiras/barras depende de una serie de factores, entre los que se incluyen los siguientes:

- Exactitud e integridad de la información suministrada por el usuario
- El tipo y la configuración del tubo que se está inspeccionando
- Disponibilidad de información de calibración pertinente
- El tipo, la complejidad, la ubicación y el número de zonas afectadas en una determinada tubería

- Las condiciones de inspección observadas en la tubería durante el período de recogida de datos

c) Tipo y configuración del tubo que se está inspeccionando

La sensibilidad a las espiras o barras rotas se ve afectada por el tipo de tubo que se inspecciona:

Tubo embebido con camisa con flejes metálicos (PCCP-ECP-SS)

Los flejes metálicos están diseñados específicamente para asegurar que se mantenga la continuidad eléctrica en los cables de pretensado, incluso en presencia de roturas de las espiras como mecanismo de protección catódica. En el HPT, es difícil detectar una (1) sola espira rota. Las pruebas han demostrado cambios sutiles en la señal de una sola espira roto en el medio del tubo; sin embargo, normalmente se requieren cinco (5) o más espiras rotas consecutivas antes de que pueda ser detectado de manera fiable ya que el fleje metálico restablece una parte de la continuidad eléctrica en las espiras rotas y sus cables circundantes. El tamaño de la señal electromagnética crece en proporción al número de espiras rotas para la HPT, lo que aumenta la capacidad de cuantificar regiones de cinco (5) espiras rotas y superiores. Se ha observado que los límites de detección de las espiras rotas en el extremo de la campana o el enchufe varían de 10 a 20 espiras rotas, y la separación mínima necesaria para distinguir entre dos regiones con espiras rotas puede variar de 10 a 30 cables continuos sin romper. Además, las curvas de calibración para HPT con especificaciones comparables tienden a ser similares; por tanto, si se selecciona una curva de calibración de otro sitio para un tubo con fleje metálico, el impacto en la exactitud de los resultados del análisis es potencialmente mínimo.

Tubo de hormigón armado con camisa (HAC-RCCP)

El HAC-RCCP (AWWA C-300) está compuesto por una camisa de acero y una o más jaulas de refuerzo (mallazo) hechas de acero templado y son más gruesas que un cable típico de pretensado en un tubo de hormigón pretensado con camisa. La mínima detección de rotura de espiras de barras con el sistema de inspección electromagnética depende de varios factores, entre ellos el grosor de la camisa de acero y el número de jaulas de refuerzo. Algunas pruebas han demostrado que se puede identificar tan sólo una (1) espira de barra rota en el centro de la tubería.

Tubos con doble espira

El sistema de inspección electromagnética puede detectar las espiras / barras rotas en tubos con más de una espira/ barras pretensadas, pero es difícil distinguir si los cables / barras rotas están en la espira interior o en la espira exterior. Se recomienda realizar pruebas adicionales para comprender mejor si existen variaciones de la señal y si es posible la identificación fuera de un ajuste de calibración. Las pruebas de calibración han mostrado sutiles cambios en la señal de una sola espira / barra rota en el medio del tubo; sin embargo, normalmente se requieren cinco (5) o más espiras / barras rotas consecutivas antes de que se pueda medir de forma fiable.

Accesorios de Tubos

La tecnología electromagnética puede detectar las regiones con fatiga en algunos accesorios de tubos; sin embargo, debido al impacto del accesorio en la señal electromagnética, los resultados se presentan con menos certeza para las zonas del tubo cerca de racores, bocas de inspección, válvulas de descarga u otros accesorios.

Tubos cortos

La identificación de las espiras/ barras rotas en los tubos de menor longitud es un reto. Como el efecto de los cambios en la señal de datos cerca del extremo de un tramo del tubo (campana o enchufe) es constante independientemente de la longitud del tubo (véase Efectos de las juntas), su impacto global en la señal electromagnética es mayor a medida que la longitud del tubo disminu-

ye. En el caso de tubos cortos, la señal electromagnética a lo largo del recorrido del tubo sigue siendo analizable cuando no se ve afectada por el efecto de la junta; sin embargo, cuando la mayor parte de la señal electromagnética de un tubo corresponde a los efectos de los extremos, se hace cada vez más difícil identificar las zonas con espiras o barras rotas. Además, los tubos cortos suelen constituir una pequeña parte del inventario de tubos inspeccionados y en ellas el número de bases de referencia (señales de referencia) disponibles para la comparación es limitado.

d) Detalles de las estimaciones de las espiras/ barras rotas

Posición de rotura

La señal de una zona con rotura de espira/ barra varía a lo largo de la longitud de un tubo determinado. Las espiras/ barras rotas en el medio de un tubo son más fáciles de detectar y medir que las espiras/ barras rotas cerca de la unión. El aumento de la presencia de metal en la junta provoca una respuesta de señal distinta que puede afectar a la detección y precisión de cantidades bajas o moderadas de espiras o barras rotas en un radio de aproximadamente 18 pulgadas o 0,5 metros de la junta. Además, las espiras/ barras rotas son más difíciles de detectar y cuantificar en el extremo de la campana del tubo que en el extremo del enchufe del tubo, ya que una parte de la sección de la campana se superpondrá al extremo del enchufe. El número mínimo de espiras/ barra rotos necesario para que la señal sea detectable y cuantificable depende del tipo de tubo (tubo embebido con camisa HPT (ECP), tubo de hormigón armado con camisa HAC (RCCP), tubo revestido con camisa (LCP), o tubo sin camisa (NCP)), la configuración de la junta, la proximidad del centro de la zona de rotura a la junta, y si se trata del extremo de la campana o del extremo del enchufe. Como resultado, el número estimado de espiras/barras rotas cerca del centro de un tubo se proporcionará con mayor confianza que las espiras/barras rotas cerca de las uniones, especialmente cerca del extremo de la campana.

Efectos de las uniones

Los efectos finales se refieren a los cambios en la señal de datos cerca del extremo de un tubo (campana o enchufe, si es aplicable) que se deben a una variedad de métodos de instalación de la propia junta del tubo. Los efectos finales no se refieren a la alteración de la junta. Los enchufes biselados, las juntas tensadas, las juntas en inglete, las correas de sujeción, las piezas de cierre, los accesorios de acero, etc., afectarán de alguna manera a la señal de datos al final de un tubo. La investigación en esta área específica ha proporcionado métodos para que los analistas determinen si la señal se debe a un efecto del extremo, o a una verdadera afectación del tramo final. Las diferencias son sutiles y el análisis de los registros de los clientes puede proporcionar la información adicional necesaria para concluir si una señal de datos en particular representa efectos o problemas de extremos. En el caso de que existan tanto efectos como de perturbaciones en el extremo, la identificación y cuantificación de las espiras o barras rotas es más difícil.

Espiras rotas no contiguas (HAC-PCCP)

Esto ocurre cuando las espiras rotas se dispersan entre las espiras que no están rotas. Las espiras rotas no contiguas son a menudo el resultado de la fragilización por hidrógeno en contraposición a la corrosión, que da lugar a una zona continua de espiras rotas, ya que la corrosión suele comenzar en un punto y crece con el tiempo. Durante la inspección, se proyecta un amplio campo magnético sobre el cable de pretensado (de varias pulgadas o centímetros de ancho); por tanto, es difícil analizar las espiras individuales de cable de pretensado. Cuando las espiras rotas están separadas por espiras no rotas, las espiras de cable que no están rotas pueden quedar enmascaradas por las señales de perturbación y pueden parecer rotas dependiendo de la distancia entre las espiras de cable de pretensado rotas y las no rotas. La separación mínima necesaria para distinguir entre dos (2) zonas con espiras rotas depende de las propiedades del tubo y del número total de espiras rotas. Las espiras ro-

tas no contiguas pueden dar lugar a una señal de perturbación mayor que el daño real asociado al cable pretensado. El número estimado de espiras rotas supone que la zona de fatiga está compuesta por espiras rotas consecutivas. Esta suposición es la única que puede hacerse sin información adicional, que podría obtenerse de la verificación sobre el terreno. Es posible que algunas o todas las zonas de rotura de un tubo con fatiga contengan espiras rotas intermitentes o dispersas en lugar de espiras rotas consecutivas. En este caso, el número estimado de espiras rotas puede estar sobreestimado.

Variaciones de la señal base

La señal de datos electromagnéticos es sensible no sólo a las diferencias físicas en las propiedades del tubo (diámetro y espaciado de los cables/barras, grosor de la camisa, etc.), sino que también es sensible a cualquier diferencia magnética en los componentes de acero del tubo. Los fabricantes de tubos pueden utilizar diferentes proveedores de materiales para los diversos componentes de los tubos en una tubería. Aunque dos (2) tubos se fabriquen físicamente de la misma manera, si el acero para la camisa y el cable / barra de pretensado provienen de diferentes proveedores, es probable que tengan propiedades magnéticas ligeramente diferentes, lo que dará lugar a variaciones en las señales de fondo. Al igual que la huella dactilar, cada tubo de una instalación, no importa cuán parecidas se suponga que sean, mostrará una señal de base ligeramente diferente. Dado que la perturbación se cuantifica midiendo la señal del tubo con fatiga en relación con una señal de base, cualquier variación en las señales de base puede afectar a la precisión de la medición de la perturbación y, en última instancia, a las estimaciones del número de cables o barras rotas.

Número de zonas con rotura

Los resultados se predicen con mayor exactitud para los tubos que contienen una sola zona de interrupción que para los tubos que contienen varias zonas de interrupción. A medida que aumenta el número de regiones de perturbación por tubo, o a medida que estas zonas se acercan, la complejidad de la interpretación aumenta. Las zonas de perturbación pueden interactuar entre sí desde un punto de vista electromagnético para crear señales de complejidad variable. Las zonas de perturbación también pueden abarcar una zona más amplia, en cuyo caso la zona de perturbación se proporcionará como rango posicional y el número estimado de cables o barras rotas puede proporcionarse en función de su complejidad.

Otros factores

A menudo hay superposiciones entre las cuestiones clave enumeradas anteriormente y puede haber o no otros factores relacionados con estas cuestiones que disminuyen el nivel de confianza en los resultados presentados en el informe. Las grandes variaciones en los procesos de fabricación pueden no afectar al rendimiento estructural del tubo, pero pueden afectar significativamente a las propiedades electromagnéticas. La lista de factores incluye los que son conocidos, desconocidos, controlables e incontrolables. Algunos pueden confirmarse durante la excavación o la inspección y otros pueden eliminarse con el estudio de los registros de construcción, aunque los errores en estos registros son comunes. En todos los casos, se hace todo lo posible por considerar los diversos factores durante el análisis; sin embargo, cabe señalar que los resultados proporcionan una estimación de las espiras /barras rotas en una sección de tubo basada en toda la información disponible y suponiendo que los cambios de señal se deben a la discontinuidad en la espira /barra pretensada.

5.1.2. Tecnología electromagnética para identificar espesor y corrosión de las camisas

La camisa es, en las distintas tipologías de tuberías de hormigón ya indicadas, el elemento que garantiza la estanqueidad de cada tubo aportando, además, capacidad estructural a éste. El análisis y confirmación del buen estado de las camisas se presenta, por tanto, vital para la evaluación de tuberías de este tipo. Especialmente en aquellos ca-

sos en los que la degradación y rotura de las espiras sea elevada y que, por ello, la camisa quede más expuesta a solicitaciones mecánicas y posibles focos de corrosión.

La aplicación de la tecnología EM a las camisas permite conocer el estado estructural de la misma, evaluándose su espesor, uniformidad y variación de propiedades. La metodología para medir las propiedades estructurales mencionadas es la aplicación de corrientes parásitas, o de Foucault, cuyo principio está basado en la aplicación de un campo electromagnético variable en tiempo, que genera una corriente eléctrica interna en el metal. En el caso de la tecnología EM para tuberías, el campo electromagnético es generado por una bobina conocida como bobina excitadora, por la que circula una corriente eléctrica alterna de baja frecuencia. El desplazamiento de esta bobina en la cercanía y a lo largo de la pared metálica genera en esta la citada corriente eléctrica parásita, que será uniforme cuando la pared del tubo lo sea, pero que presentará variaciones y distorsiones ante defectos en la pared. La medición de estas alteraciones permite estimar la forma, el tamaño, la profundidad y la ubicación aproximada del defecto a lo largo de la camisa.

El desarrollo de la tecnología EM para la evaluación del estado de las camisas tiene su reflejo en la aplicación de esta misma tecnología a las paredes de las tuberías metálicas (desarrollada en el punto 5.2.1 de este documento) para las que adquiere, si cabe, mayor importancia dado el carácter estructural elemental que tienen para ese tipo de canalizaciones. Las descripciones, definiciones y conclusiones alcanzados en el punto 5.2.1, son igualmente aplicables a la tecnología EM para camisas en tuberías de hormigón, siendo la tecnología y procedimientos, idénticos en ambos casos.

5.2. Inspección de tuberías metálicas

La tecnología EM puede ser aplicada a las tuberías metálicas, pudiendo resumirse su aplicación a las siguientes tipologías:

- Tubos de fundición gris (CIP).
- Tubos de fundición dúctil (DIP).
- Tubos de acero.

Evaluar el estado de una tubería metálica es una tarea difícil que se realiza mejor utilizando una combinación de tecnología de pruebas no destructivas, inspección visual interna, ciencia de la ingeniería y juicio experimental. Las causas de los fallos pueden considerarse en dos categorías: **corrosión y fallos mecánicos**. Aunque estas causas son distintas, están relacionadas en el sentido de que los fallos mecánicos pueden ser el resultado de la corrosión, de manera que la tubería ya no es capaz de resistir las fuerzas internas y externas aplicadas.

Las fugas son una categoría adicional que puede o no clasificarse como fallo estructural dependiendo de su localización y gravedad. La corrosión de la pared de la tubería puede provocar una perforación y una fuga. Las fugas también pueden producirse en las juntas y contribuir a fallos mecánicos en el soporte del lecho de la tubería que se erosiona. Las fugas pueden considerarse un indicador de la penetración de la pared por picaduras.

A continuación se describen algunos de los tipos de ataque por corrosión más característicos que se pueden encontrar en una inspección.

a) Grafitización

Para las tuberías de fundición, la grafitización es una forma importante de corrosión. La grafitización se produce cuando las condiciones del suelo, incluyendo el pH, las sales disueltas y el contenido orgánico, son favorables al crecimiento bacteriano anaeróbico. En el caso de la fundición gris, el metal entra en solución dejando un producto de corrosión que consiste en una masa de escamas de grafito residual intercaladas con óxidos de hierro. Con el tiempo, la pared se convierte en un compuesto de hierro fundido gris y una matriz de grafito, con el producto de la corrosión ocupando el espacio que antes ocupaba el hierro gris. Es difícil identificar la grafitización durante la inspec-

ción visual porque no hay una pérdida aparente del espesor de la pared. El material grafitizado tiene cierta resistencia, aunque posiblemente muy reducida, lo que explica que algunas tuberías de fundición gris ampliamente grafitizadas hayan seguido funcionando.

A menudo, el fallo de las tuberías de fundición gris se debe a un esfuerzo mecánico o a un choque hidráulico (obras de carretera, daños de transporte o movimiento del suelo) que actúa sobre la estructura debilitada. Esto se clasifica entonces como un fallo mecánico y no como un fallo por corrosión. La corrosión general puede producirse en la fundición dúctil en forma de grafitización, pero el material de corrosión que se forma es más débil y friable que el de la fundición gris. Los productos de la corrosión del grafito se presentan en forma de nódulos discretos que se desprenden fácilmente, y no se mantiene una estructura. Esto puede provocar fugas y fallos de rotura más rápidamente que en la fundición gris. La grafitización no se produce en los tubos de acero.

b) Corrosión por picaduras

En todos los tipos de tuberías metálicas, la corrosión externa en forma de picaduras aisladas, corrosión general y grafitización es la forma más común de deterioro, que puede provocar fugas o fallos. La corrosión por picaduras es una concentración de corrosión en una zona concreta. El metal se disuelve preferentemente en ese punto y no en las zonas adyacentes. La corrosión por picaduras es el mecanismo de deterioro más común en todas las tuberías metálicas. Pueden producirse internamente, aunque es más probable encontrarla externamente. La corrosión por picaduras se produce de forma bastante aleatoria, y suele dar lugar a penetraciones en las paredes y a fugas más que a fallos. Un grupo de picaduras en una zona puede debilitar la pared lo suficiente como para que la tubería falle.

c) Corrosión por influencia microbiológica

Las tuberías enterradas de fundición dúctil y gris pueden sufrir corrosión por influencia microbiológica (MIC). Hay dos formas: anaeróbica y aeróbica. La corrosión anaeróbica es lo que suele denominarse corrosión por sulfuro de hidrógeno.

Las bacterias reductoras de sulfato (SRB) son un ejemplo típico de bacterias anaerobias. El ataque se atribuye a la capacidad de las bacterias de hacer que el oxígeno presente en los sulfatos, nitratos y carbonatos esté disponible para una reacción catódica. Esto es significativo porque indica que la corrosión puede producirse incluso en ausencia de oxígeno disuelto. Se calcula que la velocidad de corrosión del hierro en condiciones anaeróbicas es casi 20 veces mayor que en condiciones normales.

d) Corrosión galvánica

La corrosión galvánica es un proceso electroquímico que se produce cuando se conectan eléctricamente metales disímiles y se instalan en un suelo uniformemente conductor, o cuando se instala una tubería metálica en un suelo que tiene un carácter no uniforme. En ambos casos, la corriente eléctrica fluye del ánodo al cátodo. Cuando el ánodo pierde electrones, el metal del ánodo se oxida y se produce la corrosión.

La corrosión galvánica puede darse cuando una tubería ferrosa se conecta a líneas de servicio de cobre. Las tuberías de servicio utilizadas en Norteamérica son casi exclusivamente de cobre, con una pequeña cantidad de tuberías de plomo y acero galvanizado en las zonas más antiguas. Cuando se conectan tuberías ferrosas y de cobre, el sistema de metal mixto puede acelerar la corrosión, ya que la tubería de hierro actúa como ánodo de una célula de corrosión galvánica y el cobre actúa como cátodo.

Las células de corrosión se desarrollan en una tubería ferrosa expuesta a diferentes electrolitos. Esta situación puede darse en una tubería larga que atraviesa diferentes tipos de suelos, es decir, una parte de la línea puede estar colocada en un terreno arenoso y otra en uno arcilloso. Pueden producirse importantes corrientes naturales en la tubería, lo que da lugar a células de

corrosión. En suelos de baja resistividad, dichas corrientes salen de la tubería, provocando la pérdida de metal en los puntos de salida por disolución anódica (corrosión). Los ánodos y los cátodos pueden estar a kilómetros de distancia. Del mismo modo, las mezclas de suelos en el relleno causarán corrosión. Los trozos de arcilla mezclados en un relleno de arena provocarán una grave corrosión en el lugar donde la arcilla entre en contacto con la tubería. El mismo fenómeno provoca la corrosión en las tuberías expuestas al suelo y al hormigón o a otros rellenos altamente alcalinos.

e) Corrosión electrolítica

La corrosión electrolítica, también llamada corrosión por corriente parásita, se produce cuando la tubería capta la corriente eléctrica parásita de una fuente de corriente continua (CC). La corrosión electrolítica es similar a la galvánica, excepto que una fuente externa en lugar de una reacción química impulsa la célula. Las tuberías ferrosas enterradas en el suelo pueden ofrecer un mejor camino para conducir las corrientes de retorno a tierra de los sistemas de transporte electrificados, las instalaciones eléctricas y los sistemas de protección catódica. El punto de corrosión se sitúa normalmente en el punto donde la corriente positiva sale de la tubería y entra en la tierra.

Las tuberías de campana y enchufe unidas con una junta de goma no se consideran eléctricamente continuas. Algunas tuberías de fundición gris tenían un sistema de unión que implicaba el contacto de metal con metal, lo que teóricamente podría proporcionar una vía eléctrica continua. También se ha recurrido cada vez más a la adaptación mediante la colocación oportuna de ánodos en las tuberías cuando están expuestas.

Las tuberías de acero con juntas soldadas ofrecen una vía eléctrica continua, pero normalmente están protegidas por un sistema de corriente impresa o de ánodos de sacrificio.

Tanto las tuberías de fundición dúctil como las de fundición inyectada pueden verse sometidas a condiciones de corrosión como consecuencia de daños en la cascarilla de óxido de recocido formada durante la fabricación. La acción parece consistir en que la cascarilla de óxido térmico, más noble desde el punto de vista electroquímico, forma una célula galvánica con cualquier zona dañada de hierro desnudo que se convierte en el ánodo. Debido a la relación relativamente grande entre el área catódica y la anódica, esto puede proporcionar las condiciones para un rápido ataque de corrosión localizada. La corrosión en hendiduras se produce cuando la superficie está dañada por escamas de laminación, arañazos u óxido. Esto es más frecuente en las tuberías de fundición.

f) Tuberculación (Incrustaciones)

La corrosión interna del hierro puede dar lugar a la formación de óxido poroso suelto, es decir, hidróxido de hierro $Fe(OH)_3$, que puede transformarse en una forma cristalizada denominada tubérculos en la superficie interna no revestida de una tubería de hierro. Dependiendo del pH y de otros iones presentes, una variedad de precipitados puede mezclarse con el óxido de hierro formando un “revestimiento” interno de tubérculos. Este “revestimiento” puede ralentizar la corrosión cortando el metal del suministro de agua y aire. Se ha observado que a menudo se producen picaduras por debajo de la tuberculación. La eliminación de la tuberculación hará que las picaduras continúen a un ritmo acelerado hasta que se forme un nuevo revestimiento. Las empresas de aguas normalmente revisten la tubería con mortero de cemento después de la limpieza, lo que protege la superficie interna. La tuberculación crea problemas de flujo y de calidad del agua. También crea una barrera para muchas herramientas de inspección interna. La perturbación del “revestimiento” de la tuberculación sin un revestimiento posterior puede dar lugar a problemas de calidad del agua y a una mayor aceleración de la corrosión interna. Por esta razón, generalmente se evita limpiar o perturbar seriamente la tuberculación mediante una investigación interna.

5.2.1. Inspección electromagnética

El objetivo principal de una inspección es proporcionar una comprensión del estado del componente estructural que proporciona la resistencia de la tubería; la uniformidad de la tubería metálica, incluyendo la variación del espesor de la pared y la variación de las propiedades. Una inspección proporciona un método no destructivo para evaluar el estado básico de la pared de la tubería. Las inspecciones determinan una firma magnética en 3D para cada tubo con el fin de identificar las anomalías producidas por las zonas de variación del grosor de la pared y la variación de las propiedades. La variación del grosor de la pared es visible y medible, y suele estar causada por la corrosión a largo plazo o por daños en la tubería durante la carga, mientras que la variación de las propiedades no es visible y puede deberse a algunos factores, como la concentración de tensión localizada que modifica la permeabilidad, o la falta de uniformidad del proceso de calentamiento y recocido de la fabricación. Se evalúan varias características asociadas a una anomalía (longitud, magnitud, cambio de fase, etc.) para proporcionar una estimación del tamaño y el volumen de la variación del grosor de la pared, o la gravedad de la variación de las propiedades. La tecnología más moderna es capaz de cuantificar el nivel de ambos daños y es el mejor método para determinar el estado de referencia de una tubería metálica. Desde hace muchos años, es posible explotar el concepto de corrientes parásitas o de Foucault para medir las propiedades estructurales de los metales. La aplicación de un campo magnético variable en el tiempo a estructuras metálicas puede crear corrientes eléctricas internas, ya que los electrones libres son impulsados por el campo a lo largo de las discontinuidades del propio metal. Se han desarrollado muchas aplicaciones de este fenómeno para detectar secciones dañadas en tuberías de acero y hierro.

En la Figura 5.7, se genera una corriente eléctrica en la pared de la tubería mediante electromagnetismo. Un generador de señales emite una corriente eléctrica alterna de baja frecuencia en una bobina de alambre (conocida como bobina excitadora) colocada en el centro del tubo. El campo magnético generado por esta bobina se extiende a través del revestimiento y en la pared metálica de la tubería. A medida que la bobina se desplaza por la longitud de la tubería, el campo también se mueve, creando un campo magnético localizado que genera corrientes parásitas en la pared del tubo. Cuando la pared de la tubería es uniforme, la corriente fluye uniformemente a través de la pared. Sin embargo, cuando existe un defecto, se produce una distorsión de la corriente. Como el campo magnético pasa por la sección de pérdida de la pared, se generan corrientes que forman líneas de campo magnético opuestas. Estas interrupciones en el campo magnético uniforme son registradas por la herramienta de inspección para su posterior análisis. El análisis e interpretación de la respuesta del campo magnético permite estimar la forma, el tamaño, la profundidad y la ubicación aproximada del defecto a lo largo del tubo.

La Figura 5.8 muestra un ejemplo de los datos recogidos por los detectores en un tubo típico metálico. Los datos mostrados son un ejemplo de un sistema de 6 detectores. Cada línea horizontal de los datos es la salida de un detector. La distancia se representa en el eje X, mientras que el cambio en el campo electromagnético se representa en el eje de las abscisas. Los datos mostrados en el

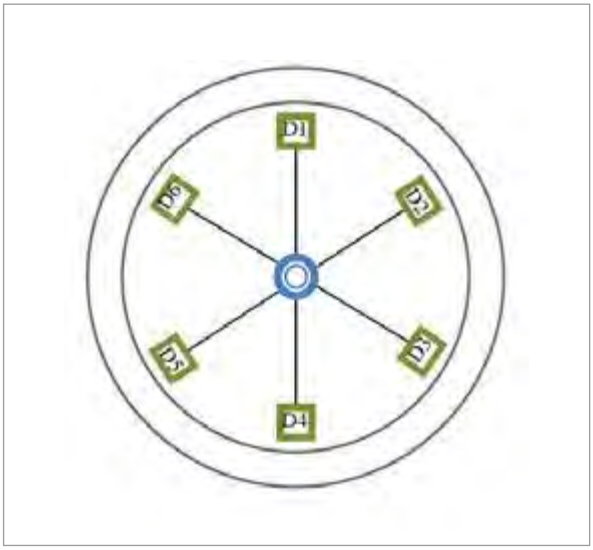


Figura 5.7. Instalación Detector.

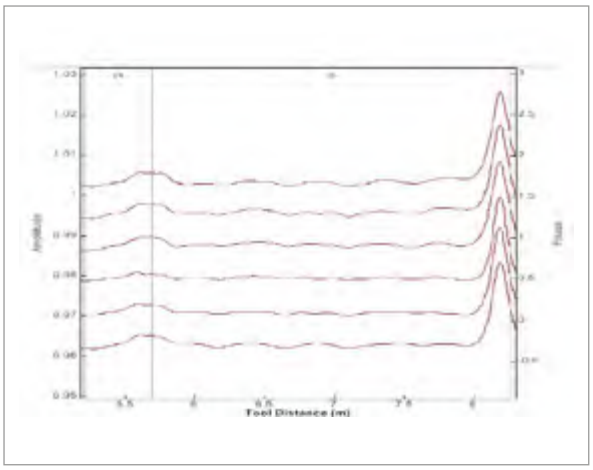


Figura 5.8. Señal de respuesta.

gráfico son un ejemplo de las respuestas del sensor de una tubería nominal. Las juntas producen una respuesta visible en todos los sensores y en todo el cañón de una tubería sin cambios en el grosor de la pared.

La Figura 5.9 muestra los datos recogidos en tres secciones de tubería. Las juntas están marcadas con líneas azules verticales. Las secciones de tubos 1 y 3 no muestran daños medibles en el cuerpo del tubo. En tubo 2, unos pocos detectores del fondo muestran respuesta a un cambio en el campo magnético, lo que indica una variación del grosor de la pared.

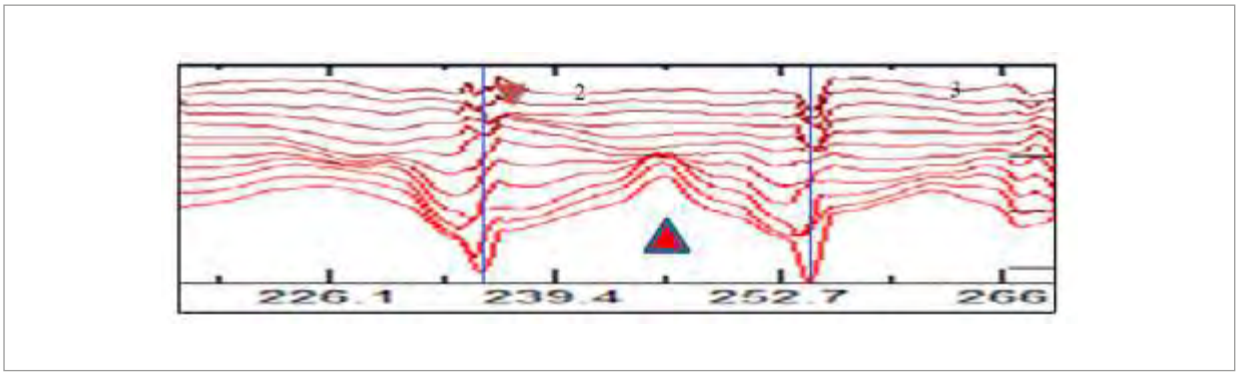


Figura 5.9. Ejemplo Respuesta Detector. Fuente: Xylem Assessment Services.

Un ejemplo para una tubería metálica de 1.200 mm. del tipo de un carro de inspección con 48 detectores para recoger los datos EM, se muestra en la Figura 5.10.



Figura 5.10. Herramienta inspección EM. Fuente: Xylem Assessment Services.

Con respecto a las capacidades de la herramienta de 48 detectores para detectar, localizar, identificar y dimensionar anomalías, componentes y características de la tubería cuando se opera dentro de las limitaciones identificadas, cabe considerar que el tamaño mínimo de la anomalía detectable está determinado por la colocación de la bobina del detector; en este caso, la matriz 48D en una tubería de 1.200 mm. tiene una distancia de centro a centro de las bobinas de 80 mm. Como resultado, generalmente cualquier anomalía más pequeña que esto podría pasarse por alto en una sola pasada. Las prestaciones más relevantes de estas plataformas son:

- **Pérdida de metal:** Las causas específicas de estas anomalías no pueden ser identificadas, sin embargo, la forma y la ubicación de las anomalías pueden sugerir fuentes (es decir, las anomalías largas y

estrechas pueden indicar fisuras de soldadura). Típicamente el 50% del volumen de pérdida de pared en un área definida por 125 mm. longitudinales por 1/48 de la circunferencia de la tubería.

- **Picaduras:** Las pequeñas picaduras individuales no pueden detectarse con estas herramientas a menos que la pérdida de metal cumpla o supere los umbrales descritos anteriormente.
- **Fisuras:** Las fisuras y la pérdida de pared generalmente no pueden identificarse por separado sólo con los datos EM y requieren una correlación con los datos visuales.
- **Accesorios:** Las características y los accesorios pueden ser detectados y medidos con precisión por la herramienta EM, y se correlacionan con los resultados de la inspección visual.

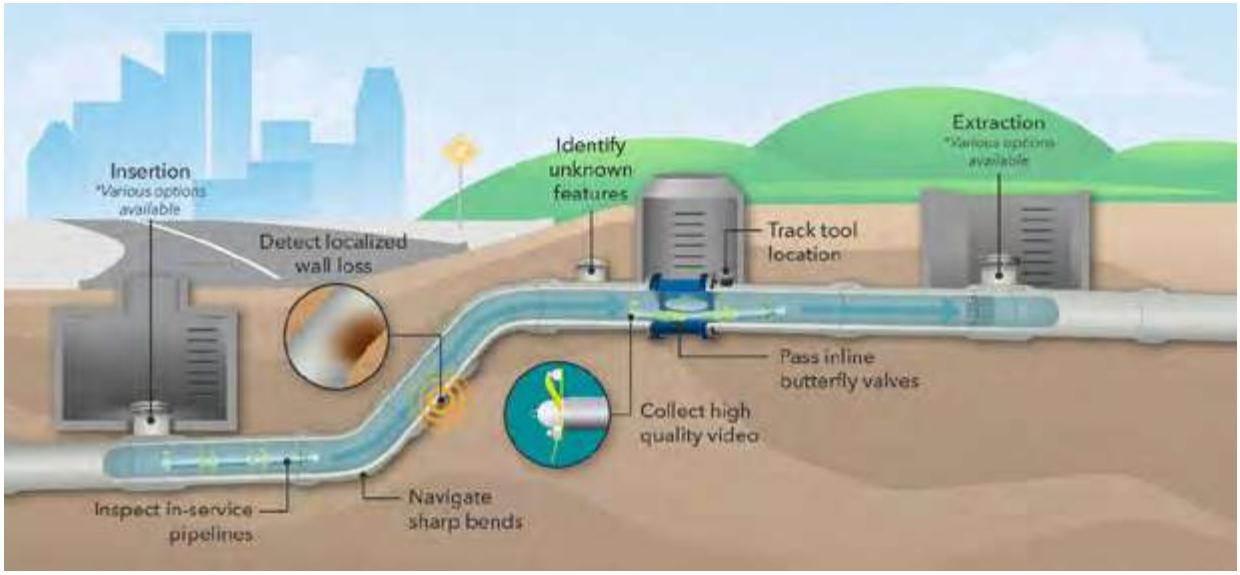


Figura 5.11. Inspección inline tuberías metálicas. Fuente: Xylem Assessment Services.

5.2.2. Inspección ultrasónica

La tecnología ultrasónica para poder ser usada en tuberías en servicio ha evolucionado espectacularmente en los últimos años. Se tratan de herramientas de evaluación de la condición de tuberías de largas distancias y de libre nado que miden directamente el grosor de las paredes de las tuberías metálicas de agua mediante tecnología ultrasónica de alta resolución. A la vez puede evaluar el estado del revestimiento y la ovalidad del tubo. Este tipo de plataformas navegan a través de la mayoría de las válvulas, curvas cerradas y tés, y se insertan a través de los accesorios existentes, lo que la convierte en una herramienta flexible y fácil de desplegar.

Este tipo de herramientas (como la que aparece en la Figura 5.12) se componen de varios cuerpos, entre ellos el módulo de sensores, el módulo de adquisición y almacenamiento de datos a bordo y los módulos de batería para alimentar la electrónica a bordo y los dispositivos de seguimiento de la herramienta durante una inspección. El módulo sensor está equipado con un conjunto de transductores ultrasónicos que registran mediciones discretas del espesor de la pared alrededor de toda la circunferencia y la longitud de la tubería a medida que la herramienta se desplaza por la tubería.

Los pulsos ultrasónicos viajan a través de la pared de la tubería e interactúan con ella a medida que la herramienta se desplaza a lo largo de la tubería,



Figura 5.12. Herramienta inspección Ultrasónica PIP. Fuente: Xylem Assessment Services.

como se muestra en la Figura 5.13. El tiempo de recepción de la señal ultrasónica reflejada se modifica cuando existe una variación en el espesor de la pared. La reflexión de las ondas ultrasónicas es medida por el módulo sensor y registrada en el módulo de almacenamiento de la herramienta.

Después de la inspección, los datos registrados se procesan en una forma visualizada a partir de la cual se pueden analizar las áreas de pérdida de pared de la tubería y las profundidades. La Figura 5.14 presenta una visualización típica de una tubería de acero soldada en espiral con y sin un defecto en la pared. El defecto es una indicación de adelgazamiento de la pared de la tubería identificada por las variaciones de separación entre dos reflexiones ultrasónicas de la pared interna y externa de la tubería.

La calidad y la cantidad de datos que proporcionan permiten tomar decisiones con mayor confianza para las decisiones de reparación o reemplazo a corto plazo y la gestión de activos a largo plazo.

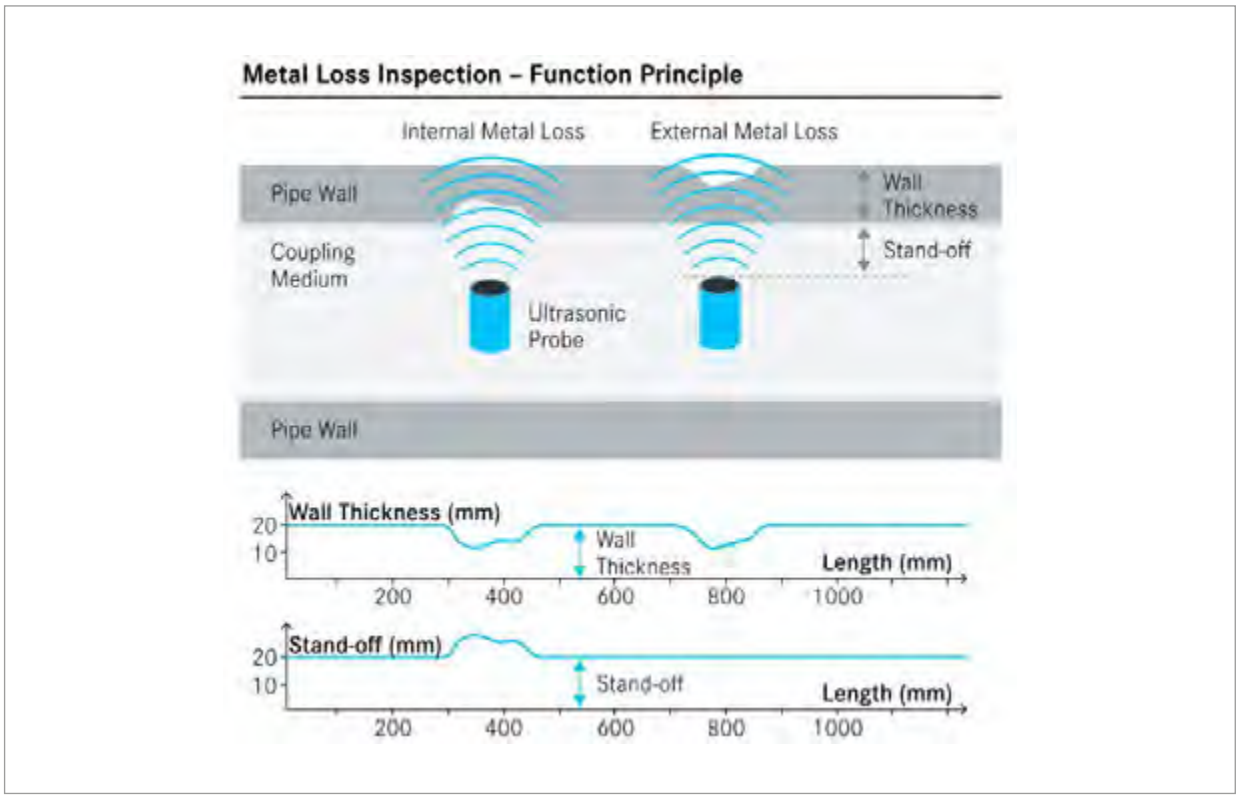


Figura 5.13. Principio de medición ultrasónica del espesor de la pared. Fuente: Xylem Assessment Services.

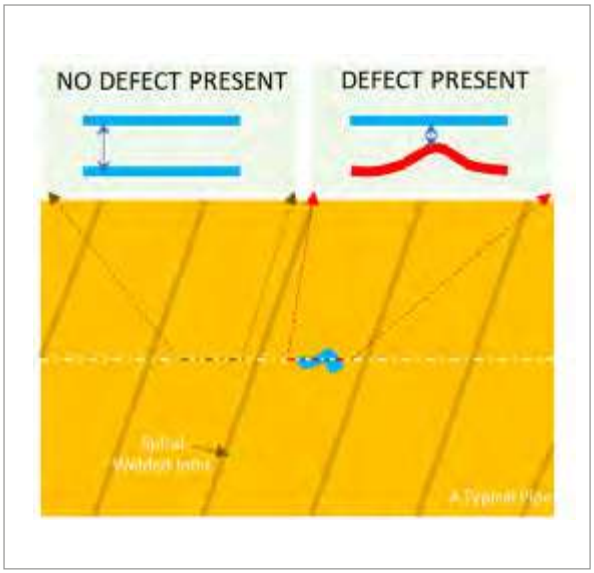


Figura 5.14. Una visualización típica de un defecto de pared. Fuente: Xylem Assessment Services.

Ventajas de las plataformas ultrasónicas

- Medición de alta resolución del espesor de la pared.
- Distingue los defectos internos y externos.
- Proporciona mediciones de la ovalidad y del estado del revestimiento, e identifica las características del tubo.
- Inspección mediante una herramienta de libre desplazamiento con una interrupción limitada de las operaciones.

Prestaciones

- Detección y cuantificación de defectos o Resolución: el defecto mínimo notificado es de 50 mm. Y 20% de pérdida del espesor de pared.
- Identificar los defectos internos frente a los externos.
- Identificar las características del tubo; salidas, válvulas, juntas.
- Localización a partir de la junta aguas arriba y posición del reloj de forma circunferencial.
- Mediciones de ovalidad.

Limitaciones de la cobertura

La cobertura de datos dependerá de la cantidad de limitaciones encontradas en la tubería de interés. Esto se debe a la física del módulo del sensor que requiere que el conjunto permanezca alineado con la pared de la tubería, tanto axial como longitudinalmente, para recopilar datos precisos. La desalineación hace que se recojan datos de baja calidad y reduce o impide la detección en algunas zonas de la tubería. La desalineación puede ser causada por turbulencias, curvas, pendientes pronunciadas, bolsas de aire, tuberculación (incrustaciones) y residuos en el tubo.

- **Bolsas de gas:** la señal ultrasónica no puede penetrar; no se recogen datos del espesor de la pared en estos lugares. Se proporcionará la identificación y la ubicación.
- **Revestimiento no adherido:** la señal ultrasónica no puede penetrar; no se recogen datos del grosor de la pared en estos lugares. Se facilitará la identificación y la localización.

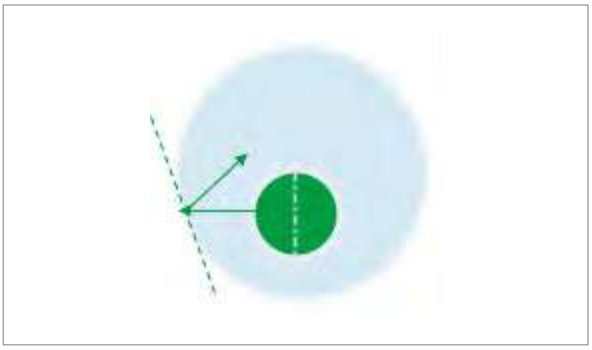


Figura 5.15. Desalineación axial. Fuente: Xylem Assessment Services.

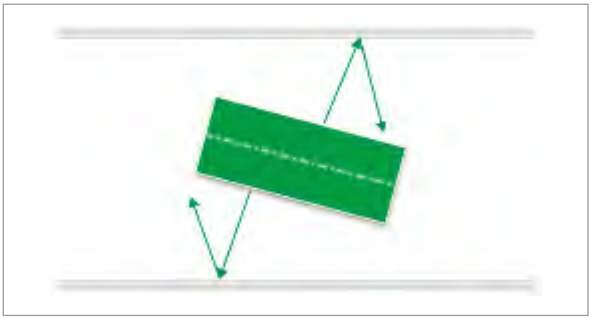


Figura 5.16. Desalineación angular. Fuente: Xylem Assessment Services.

- **Flujos turbulentos:** reducen o impiden la recogida de datos.
- **Ovalidad extrema:** reduce o impide la recogida de datos.
- **Inclinaciones y curvas pronunciadas:** reducen o impiden la recogida de datos.
- **Tuberculación y acumulación:** reducen o impiden la recogida de datos.

Localización

Una parte importante del proceso de análisis de datos es la correlación de los datos con la tubería física en la que se recogieron. Debido a que la herramienta es de nado libre y no tiene un odómetro, los datos se recopilan en el dominio del tiempo y las distancias se derivan a través de la correlación de accesorios identificables en los datos con ubicaciones conocidas en la tubería. Algunos ejemplos de accesorios que pueden identificarse en los datos ultrasónicos y utilizarse como puntos de correlación son las válvulas en línea, las curvas o las salidas, así como los puntos de rastreo. Entre estas ubicaciones conocidas, las distancias se derivan asumiendo que la herramienta se desplaza a velocidad constante y que la distancia entre las ubicaciones es correcta.

La precisión de la localización y cuantificación de las pérdidas en la pared depende de varios factores, entre ellos:

- Exactitud y exhaustividad de la información suministrada por la empresa de aguas.
- El tipo y la configuración de la tubería que se inspecciona.
- Disponibilidad de información de calibración relevante.
- Tipo, complejidad, ubicación y número de anomalías de pérdida de pared en una tubería determinada.
- Condiciones de inspección observadas en la tubería durante el período de recogida de datos.

6 Estrategias de gestión con las roturas

Las PCCP y HA son tuberías que requieren una estrategia para su mantenimiento y gestión. Cuanto más diligente sea la estrategia, el gestor asumirá menos riesgos. Los gestores suelen aplicar varias estrategias para proteger su tubería y gestionar el riesgo de roturas.

6.1. Protección, inspección y supervisión

El gestor desea proteger la tubería de sobrecarga, evitar daños causados por terceros contratistas, mantener registros exactos de la ubicación de la tubería y minimizar sobrepresiones, etc. Sin embargo, la protección de la tubería deberá incluir, además, protegerla contra la corrosión externa tanto causada por la agresividad del suelo como por las corrientes vagabundas.

En el apartado 3.2.2 Riesgos de corrosión externa y corrientes vagabundas en tuberías enterradas se indican las principales bases de actuación.

Por otra parte, a partir del apartado 9 se indican los métodos más adecuados para actuar frente a la corrosión en el caso de tuberías existentes.

6.2. Decisiones estratégicas de apoyo

Tras inspeccionar un tubo de PCCP en una zona de espiras rotas, el gestor debe decidir qué hacer con el tubo. Es una decisión difícil de tomar sin una orientación técnica que determine cuántas roturas de espiras afectan al rendimiento del tubo. Para ayudar a tomar esta decisión, esta sección describe varias opciones que suelen aplicar los gestores.

a) **Estimación de límite de rotura de espiras.** En este caso, el gestor puede basarse en varios métodos para determinar las roturas máximas permitidas. En estos métodos, es habitual que el personal interno o un consultor externo prepare una estimación en base a la experiencia previa con tubos de PCCP. Esta decisión deberá basarse en la presión interna del tubo y el número de sobrepresiones que experimente el tubo. Cuando el tubo alcance este límite, deberá repararse el tubo.

b) **Análisis del margen de rotura mediante curvas de riesgo.** Este método evalúa el

efecto de las espiras pretensadas rotas en el rendimiento del tubo y su margen de rotura usando un modelo calibrado y verificado. El margen de rotura puede evaluarse mediante curvas de riesgo correspondientes a los estados límite relacionados con la capacidad de funcionamiento, daños y resistencia a la rotura del tubo con espiras pretensadas rotas. El análisis del riesgo de roturas ofrece para cada tubo con rotura una relación entre el número de espiras rotas y la presión interna que provoca que se excedan determinados estados límite.

c) **Estimación del límite de capacidad de funcionamiento.** En esta metodología, se calcula el límite de capacidad de funcionamiento para que no haya roturas y cantidades relativamente bajas de espiras rotas utilizando las ecuaciones de diseño presentadas en C304, "Diseño de tuberías de presión de hormigón pretensado" (2014) en una herramienta de análisis de riesgos basada en hojas de cálculo. El riesgo se presenta en forma de curvas que muestran cómo la capacidad de presión de la tubería disminuye a medida que aumenta el número de espiras rotas. El modelo estima el efecto de las roturas de los cables como pérdida de resistencia del pretensado a lo largo del tubo. Tras determinar hasta qué punto el tubo se encuentra "en mal estado", el gestor debe desarrollar una estrategia para reparar el tubo de PCCP en el futuro. Habitualmente se han utilizado tres opciones.

- *Operar con una tubería degradada y volver a inspeccionarla en unos pocos años*. Esta opción significa que el gestor no cree que las espiras rotas hayan debilitado el tubo lo suficiente como para justificar la reparación del tubo. Esta filosofía es común y es justificable siempre que el gestor se comprometa a volver a inspeccionarla en unos pocos años. De este modo, puede supervisarse la degradación del tubo y el tubo se puede reparar antes de que rompa. Para determinar un programa de inspecciones adecuado, el gestor deberá tener en cuenta la corrosividad de los elementos, el potencial de que se produzcan corrientes vagabundas y fragilización por hidrógeno, las condiciones de funcionamiento y el historial de la tubería. En este tiempo, el gestor deberá considerar, además, si para la tubería principal o las tuberías individuales deben programarse o presupuestarse reparaciones o sustituciones a largo plazo.
- *Instalar un sistema que supervise el estado de la tubería de modo que pueda repararse cuando la degradación de la tubería sea grave*. Este método implica instalar un sistema de fibra óptica para supervisión acústica. Este sistema, combinado con una inspección inicial indicará al gestor el estado de la tubería en tiempo real. Este método permite al gestor supervisar de manera exacta la degradación de la tubería. Cuando la degradación sea lo suficientemente grave o el ritmo de roturas de espiras de la tubería crezca rápidamente, el gestor puede repararla o sustituirla.
- *Reparar o sustituir la(s) sección(es) de la tubería con espiras rotas*. Este método implica reparar o sustituir la tubería que tenga un número inaceptable de espiras rotas para devolverle su resistencia original. El proyecto puede afectar a una sola sección de tubería o a varias secciones de tubería contiguas o no contiguas, dependiendo del presupuesto del gestor, la tolerancia al riesgo y la flexibilidad operativa.

6.3. Rehabilitación y sustitución

Los gestores aplican dos estrategias para rehabilitar y sustituir los tubos de PCCP. La primera es rehabilitar o sustituir secciones concretas de tu-

bos con roturas, y la otra es rehabilitar o sustituir la totalidad de la tubería de PCCP. Estas estrategias se explican a continuación.

- **Rehabilitación o sustitución de segmentos individuales con roturas:** En esta estrategia, el gestor da prioridad a las secciones de la tubería con roturas y se centra en los segmentos de tubos de PCCP que tienen un riesgo inaceptablemente elevado de producir roturas. El gestor planifica y lleva a cabo la rehabilitación o sustitución en función del riesgo asociado a la rotura. Este método solo trata las secciones de la tubería con roturas. Este método minimiza los gastos de capital y reduce el número y duración de las interrupciones del servicio. Las medidas pueden implicar sustituir la tubería, recubrir la tubería con polímero reforzado con fibra de carbono, recubrir la tubería con acero o usar un sistema híbrido patentado.
- **Rehabilitación o sustitución de toda una tubería:** Los gestores que aplican esta estrategia más conservadora creen que es más rentable rehabilitar o reparar una tubería completa que ocuparse de secciones individuales dañadas. Estos gestores por lo general tienen una gran cantidad de secciones de tubería con espiras rotas, relativamente cerca unas de otras, con lo que rehabilitar o sustituir un mayor alcance de la tubería es más rentable que hacer reparaciones en la misma zona cada pocos años. Esto es especialmente cierto cuando el gestor espera que otras secciones de tubería mostraran roturas con el tiempo. El objetivo de esta estrategia es reducir el riesgo de roturas de los tubos de PCCP y el coste de varias reparaciones individuales. Esta estrategia devuelve el resto de la vida útil de un segmento completo de la tubería de PCCP a una nueva vida útil, en función de la vida útil del reemplazo. Además, mientras se llevan a cabo estas modificaciones, el gestor puede, además, modernizar otros aspectos de la línea (como válvulas, caudalímetros, arquetas y otras estructuras accesorias). Este modo de proceder requiere un capital mucho mayor, paradas más prolongadas y un programa de reparaciones de varios años.

6.4. Metodología detallada de FEA (análisis de elementos finitos)

El Estándar de Diseño C304 de AWWA es una herramienta integral utilizada para el diseño de HPT (PCCP); sin embargo, no es directamente aplicable para la evaluación de HPT con espiras de alambre pretensado rotas. FEA es un método preciso para modelar geometría compleja bajo diferentes condiciones de carga. Los recientes avances en FEA y el aumento de la velocidad de cálculo permiten el análisis de problemas no lineales complejos, lo que es necesario para proporcionar modelos precisos de HPT con espiras de alambre pretensado rotas.

El modelo de FEA determina la consecuencia estructural de las espiras de alambre pretensado rotas, basándose en los estándares de diseño AWWA C301 y AWWA C304, utilizando especificaciones de diseño de tuberías, parámetros de diseño y la condición actual asumida de las espiras de alambre pretensado. En el análisis, el modelo de un tubo se somete a la presión interna, a los pesos del tubo y del fluido, y a las cargas externas mientras se varía el número de espiras rotas. Se formula una curva de rendimiento, que muestra los efectos de las espiras rotas, y se utiliza para determinar el número de espiras rotas necesarias para que la tubería exceda los límites teóricos.

Los aumentos significativos de la presión interna y de las cargas externas de tierra y vivas causan mayores tensiones de tracción y flexión en la pared del tubo, lo que puede provocar la rotura de las espiras y aumentar la tensión en las espiras restantes y adyacentes. A medida que aumenta la tensión, las espiras de alambre adicionales podrían volverse discontinuas y permitir que el núcleo de hormigón y la camisa de acero se expandan. Esto conduce a una redistribución de la carga y el estrés en la tubería. Para tener en cuenta este cambio durante el FEA, el alambre pretensado, el núcleo de hormigón y la camisa de acero se mo-

delan como un elemento compuesto para simular las interacciones de materiales en una tubería real. A medida que la tensión en el alambre pretensado aumenta y el núcleo de hormigón y la camisa de acero se expanden, la respuesta del elemento compuesto se vuelve cada vez más no lineal, lo que añade más complejidad al modelo.

El modelo FEA predice los límites de rendimiento de un tubo de HPT utilizando las resistencias a la tracción del alambre pretensado, la camisa de acero y el núcleo de hormigón, así como un algoritmo de plasticidad que simula el aplastamiento del hormigón en las regiones de compresión. El comportamiento del hormigón es particularmente complejo de modelar ya que, en el campo, puede ocurrir tanto el agrietamiento como el aplastamiento una vez que se supera la resistencia final del hormigón. El agrietamiento y el aplastamiento se determinan a lo largo de una superficie de rotura, apareciendo las grietas cuando los esfuerzos principales en la superficie están en tensión y el aplastamiento cuando los esfuerzos principales están en compresión. El núcleo de hormigón de un HPT se modela como parte del elemento compuesto tridimensional, con ajustes adicionales para predecir el fallo de los materiales frágiles. El análisis del HPT con espiras de alambre pretensado rotas añade aún más complejidad al modelo. Las espiras de alambre rotas cambian la distribución de la carga y el estrés en el tubo. Una vez que el hormigón en tensión comienza a agrietarse, su capacidad de carga comienza a disminuir con una tensión adicional. Si la tensión es lo suficientemente alta, la capacidad de carga se reduce a cero. Esto significa que las cargas deben ser transferidas a través de los otros componentes del tubo.

a) Curvas de rendimiento

El número de espiras de alambre pretensado rotas que el diseño específico de la tubería tolerará en condiciones de presión de operación y sobrepresión puede determinarse utilizando una curva de rendimiento de FEA. En la Figura 6.1 se muestra un ejemplo de una curva de rendimiento para PCCP. Xylem Assessment Services utiliza cuatro (4) Límites, Micro fisura (azul), Fisura visible (verde), Elástico (amarillo) y Resistencia (rojo), para clasificar la condición de un PCCP en dificultades. Nótese que, aunque tienen descripciones y valores similares, estos límites son diferentes de los Límites y Criterios de Limitación utilizados en el análisis AWWA C304.

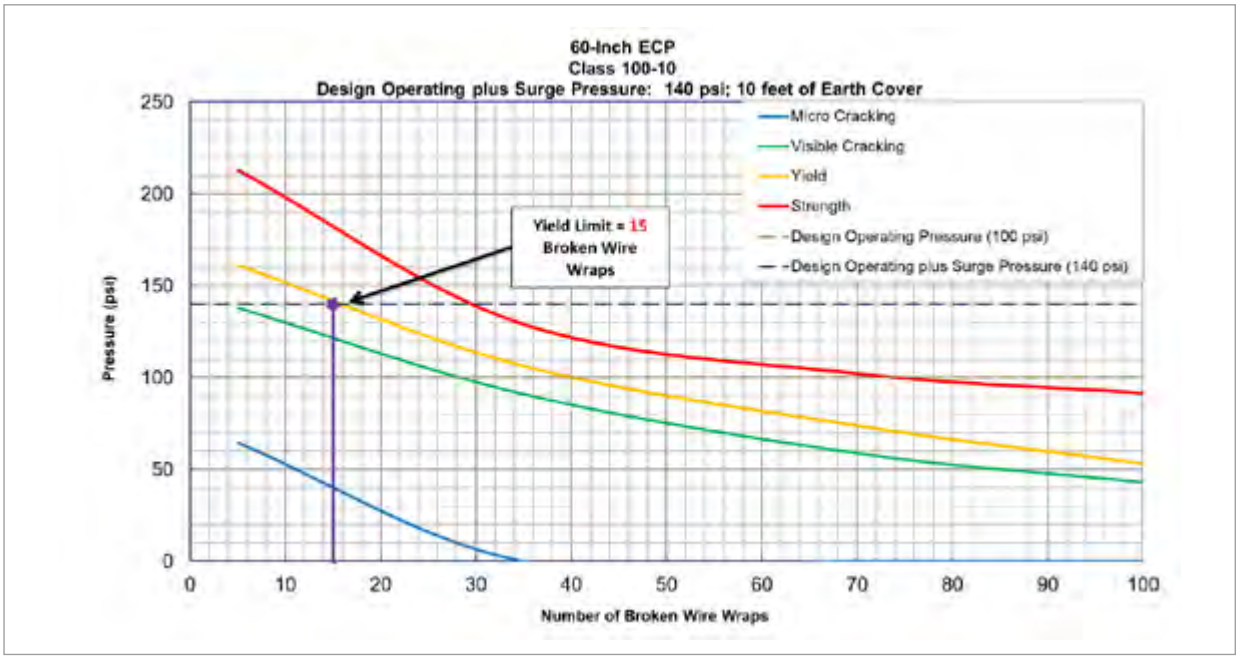


Figura 6.1. Curva de rendimiento para la Clase 100-10 ECP. Fuente: XYLEM ASSESSMENT SERVICES.

En la Tabla 6.1 se definen los límites propuestos por expertos del sector para describir la condición prevista de un PCCP con una cantidad conocida de espiras de alambre rotas. El número real de espiras de alambre rotas que se requiere para alcanzar estas condiciones varía debido al diseño del tubo y a la cobertura de tierra.

Tabla 6.1. Condición prevista de un tubo con espiras de alambre rotas.

Límites	Descripción
Microfisura	Microfisuración del revestimiento de mortero o del núcleo de hormigón (definida por la deformación asociada a una grieta mayor o igual a 0,0254 mm de ancho)
Fisura Visible	Agrietamiento visible del revestimiento de mortero o del núcleo de hormigón (definido por la tensión asociada a una grieta mayor o igual a 0,0508 mm de ancho)
Elástico	La espira de acero pretensado o la camisa alcanzan su límite de elasticidad
Resistencia	La espira de acero pretensado o la camisa alcanzan su límite de resistencia

Cuando el revestimiento de mortero en el exterior del tubo se agrieta, los iones de cloruro presentes en el agua pueden filtrarse a través de las grietas, exponiendo las espiras de alambre pretensado a un ambiente corrosivo. La corrosión puede reducir el área de la sección transversal del alambre pretensado, disminuyendo su capacidad de carga y causando que las espiras de alambre se rompan al aumentar la tensión. Las roturas individuales de las espiras de alambre también aumentan la cantidad de tensión que se ejerce sobre las espiras de alambre adyacentes. Este aumento de la tensión, así como un entorno corrosivo persistente, hará que las espiras adyacentes se rompan. Aunque puede pasar un largo período entre las roturas iniciales y las subsiguientes, eventualmente las espiras de alambre comenzarán a fallar a un ritmo más rápido a medida que se ejerza más tensión sobre las espiras de alambre restantes.

Antes de alcanzar el límite elástico, el alambre pretensado y la camisa de acero se alargan y deforman de forma elástica, lo que significa que después de retirar la carga, los componentes vuelven a su forma original. Una vez que se alcanza el Límite elástico en la camisa de acero, éste sufre una deformación plástica, donde experimenta grandes cantidades de tensión (alargamiento) en respuesta a un aumento relativamente pequeño de la tensión aplicada. El Límite de Resistencia para la camisa de acero es el punto en el que el acero comienza a alargarse mientras experimenta menores tensiones. Esta condición también se conoce como estrangulamiento e inmediatamente precede a la rotura de la camisa de acero. El alargamiento experimentado por las espiras de alambre pretensado debido a la carga más allá del Límite Elástico eventualmente causa que una espira individual se rompa. El alambre pretensado tiene un comportamiento relativamente frágil en comparación con la camisa de acero, lo que significa que las espiras de alambre sufren menos deformación plástica antes de romperse. Esta situación a menudo ocurre simultáneamente en las espiras de alambre adyacentes, especialmente cuando se rompen más espiras de alambre pretensado, y la tensión en las espiras restantes aumenta en respuesta. Además, a medida que se producen más roturas de espiras de cables, el núcleo de hormigón y la camisa de acero pueden expandirse en respuesta a la presión interna. A medida que el núcleo se expande, el hormigón se pone en tensión, lo que puede causar grietas estructurales en el núcleo si la tensión es lo suficientemente alta.

Los valores utilizados para representar el rendimiento de los componentes de acero en el campo se basan en el rendimiento y las resistencias finales que figuran en la hoja de especificaciones del diseño de la tubería o en los valores estándar de la norma de diseño pertinente, si el diseño de la tubería no está disponible. El límite de elasticidad del alambre pretensado es típicamente el 85 por ciento de su resistencia final, mientras que el límite de elasticidad de la camisa de acero se indica en la hoja de especificaciones de diseño de la tu-

bería o se toma de la norma de diseño vigente en el momento de la producción. El límite elástico se alcanzará cuando la camisa de acero o el alambre pretensado de acero alcancen el límite de elasticidad. La resistencia final del alambre pretensado viene dictada por el calibre (diámetro) y la clase del alambre, mientras que la resistencia final de la camisa de acero viene determinada por el grado del acero. El límite de resistencia se supera cuando uno de los componentes del HPT alcanza su resistencia final, lo que, en teoría, causará la rotura del tubo.

Mediante la evaluación del estado estructural previsto de un tubo utilizando FEA y analizando todas las variables críticas, se puede realizar una evaluación del riesgo de todos los tubos en dificultades para evaluar si una tubería debe ser rehabilitada y cuándo.

7 Sistemas de reparación, rehabilitación y reemplazo

7.1. Introducción y resumen de sistemas

Cada vez hay un mayor número de tecnologías sin zanja disponibles para la renovación de tuberías de presión que puede proporcionar alternativas a las técnicas de sustitución tradicionales. Tecnologías sin excavación se dividen convencionalmente en tres categorías: la reparación, la rehabilitación y la sustitución, y pueden utilizarse para extender la vida operativa, restaurar la capacidad hidráulica, mejorar la calidad del agua, proteger contra la corrosión, recuperar la estanqueidad y eliminar así pérdidas de agua y entradas de agua, o restaurar la integridad estructural del sistema de tuberías. Otros de los beneficios principales de las tecnologías sin zanja suelen incluir una afección mínima en el terreno (menor excavación requerida), los impactos medioambientales menos graves (por ejemplo, reducción de la huella de carbono y de la contaminación acústica), la reducción de los costes sociales, y la reducción de la restauración de las reposiciones.

Varios estudios técnicos definen reparación de tuberías, rehabilitación y técnicas de reemplazo de la siguiente manera:

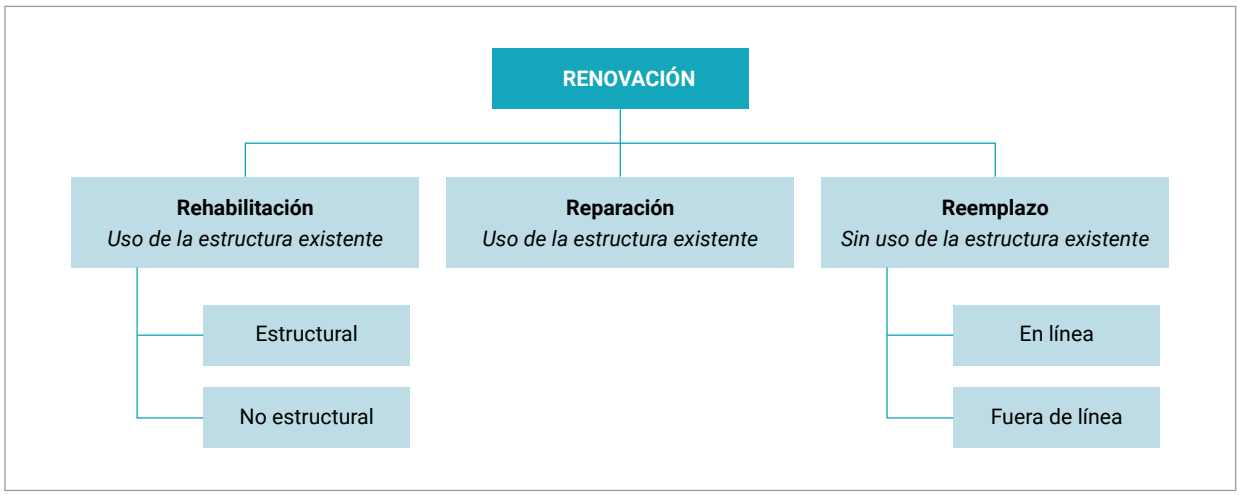


Figura 7.1. Clasificación de sistemas de renovación para tuberías de Agua y Saneamiento. Fuente: Pipeline Infrastructure.

- **Reparación:** en esta categoría se incluyen las técnicas que se pueden utilizar cuando la tubería existente tiene defectos localizados y se puede recuperar fácilmente una condición estructuralmente sólida y una estanqueidad, y se aplican en general cuando la tubería tiene capacidad de flujo aceptable y una buena calidad de agua.
- **Rehabilitación:** en esta categoría las técnicas a menudo se utilizan para extender la vida operativa de un tubo y restaurar gran parte o la totalidad de su capacidad hidráulica, mejorar la calidad del agua, recuperar la estanqueidad y/o restaurar la funcionalidad estructural.
- **Reemplazo:** las técnicas que caen bajo esta categoría se utilizan cuando la tubería existente tiene deterioros graves tipo deformación importante o derrumbamiento, o cuando se necesita una mayor capacidad de flujo.

Métodos de reparación

Tecnologías de reparación se utilizan normalmente para segmentos cortos de tubería o reparaciones puntuales, con el fin de abordar los defectos localizados. La reparación puede ser a corto o a largo plazo y se limitan normalmente a las tuberías con defectos localizados, ya que suele ser más rentable el recurrir a sistemas de rehabilitación continua en tuberías que tienen numerosos defectos generalizados en toda su longitud. Tubos con corrosión o daños estructurales localizados o juntas con fugas, son problemas ideales para las técnicas de reparación localizadas. Estas tecnologías incluyen el uso de polímeros reforzados con fibra de vidrio o carbono y de juntas mecánicas internas.

En particular, la tecnología de polímeros reforzados con fibra de carbono, que pueden aplicarse interna o externamente, por las altas propiedades de los materiales empleados y la adherencia estructural que conlleva el sistema, representan una solución a largo plazo que permite evitar una mayor corrosión y restablecer la estanqueidad y la capacidad estructural de las tuberías. Una vez que los materiales han curado a su resistencia prevista, el tubo reparado puede ser puesto en servicio.

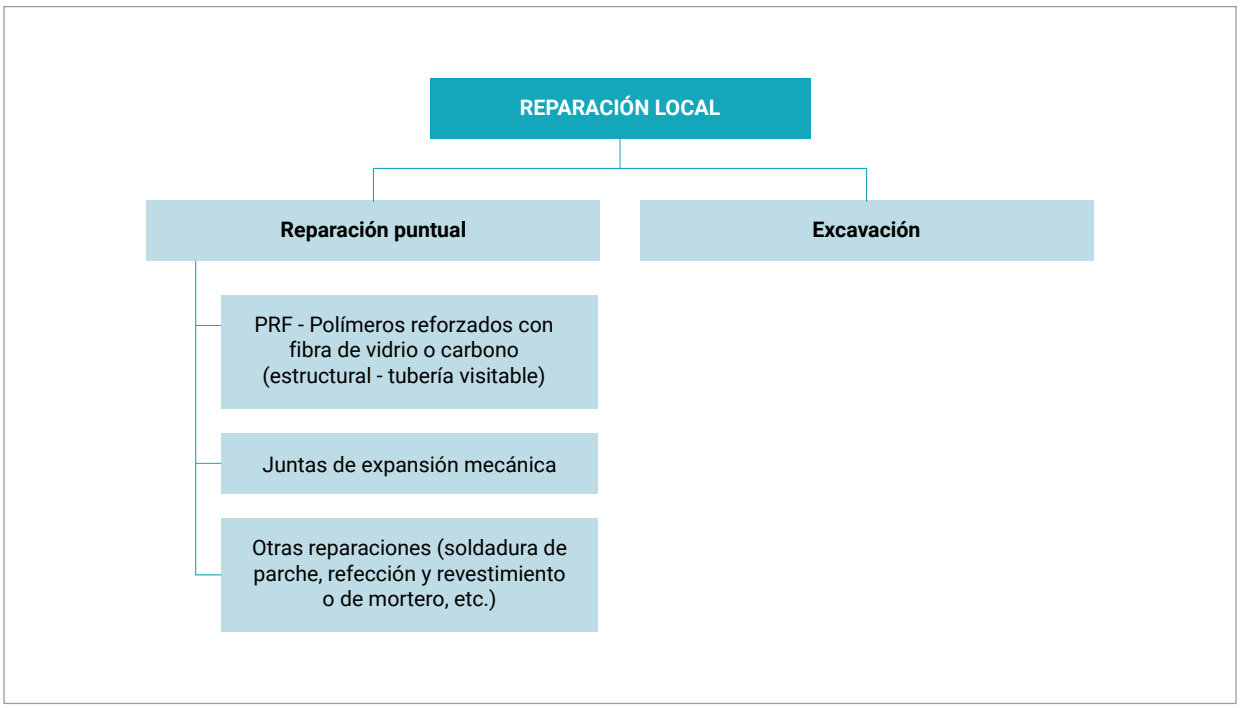


Figura 7.2. Sistemas de reparación puntual para tuberías de Agua (Red en Alta). Fuente: Pipeline Infrastructure.



Figura 7.3. Juntas EPDM de expansión mecánica. Fuente: Pipeline Infrastructure.

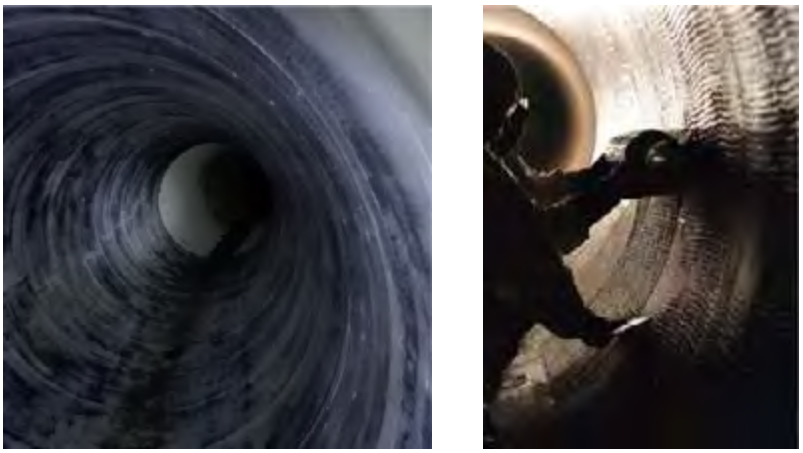


Figura 7.4. Aplicación de Polímero reforzado con carbono CFRP para reparación estructural. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

Métodos de rehabilitación

Las tecnologías de rehabilitación en cuanto a aplicaciones en tuberías presión se clasifican habitualmente en cuatro categorías según las prescripciones del AWWA M28, basado en tres principales distinciones en términos de función estructural (no estructural, semi-estructural y totalmente estructural):

- **Clase I:** revestimientos no estructurales; actúan sólo como barreras frente a la corrosión.
- **Clase II:** entubados ajustados semi-estructurales que tapan agujeros y juntas abiertas en la tubería existente, pero requieren adhesión a la tubería existente para evitar colapsarse.
- **Clase III:** entubados semi-estructurales que también tapan agujeros y juntas, pero que tienen el espesor suficiente para ser autoportantes y resistir al pandeo por cargas hidrostáticas externas o por presiones negativas de vacío.
- **Clase IV:** entubados totalmente estructurales que actúan como una tubería independiente, con tubería existente sirviendo solo de encofrado perdido.

Clase IV (AWWA M28)		Clase III (M28)	Clase II (M28)	Clase I (M28)
Clase A (EN11295)		Clase B	Clase C	Clase D
				
No ajustado o simple	Ajustado	Auto-portante (rigidez anular inerente)	Depende de la adhesión	Depende de la adhesión
Totalmente estructural		Semi-estructural		No estructural
Independiente		Interactivo		

Figura 7.5. Representaciones esquemáticas de clases estructurales de entibados de tuberías de presión.

Una solución interactiva se apoya en la tubería existente para cualquier soporte estructural y puede ser no estructural (Clase I) o semi-estructural (Clase II y Clase III), mientras que una solución independiente es capaz de soportar presiones internas y las cargas externas en ausencia de la tubería existente y se clasifica como totalmente estructural (Clase IV).

Las tecnologías de rehabilitación de tuberías de presión incluyen sistemas de revestimiento por proyección (por ejemplo, cemento, epoxi, polimérico), entubado ajustado con tubo curado en obra también llamado encamisado CIPP (Cured In Place Pipe) o "manga", entubados simple o ajustado, polímeros reforzados con fibra de carbono y entubado con manguera flexible estructural.

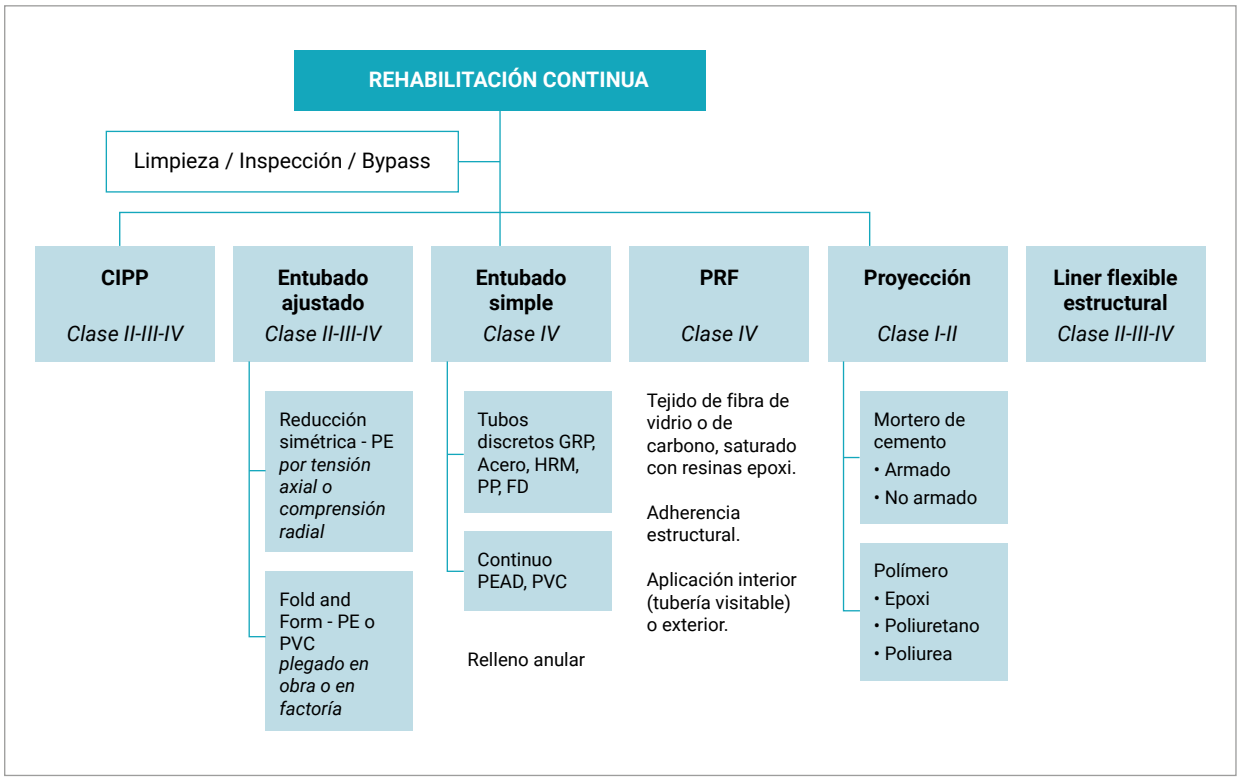


Figura 7.6. Sistemas de rehabilitación para tuberías de Agua y Saneamiento.

Los revestimientos de mortero de cemento, una rehabilitación de Clase I es el sistema de proyección más común y se puede aplicar a una variedad de diámetros (a partir de 100 mm) en longitudes de hasta 450 m por aplicación, dependiendo del diámetro (más común 100 a 150 m). Pueden ser instalados por el método de centrífuga (el mortero se aplica por aire comprimido a través de un cabezal de pulverización) o el método de proyección (un brazo giratorio proyecta el mortero sobre la pared del tubo). Además de la protección pasiva que se obtienen por crear una barrera de protección, este sistema añade la protección activa del metal (acero, fundición) por crear un entorno alcalino.



Figura 7.7. Proyección de cemento.

Los revestimientos epoxi se utilizan normalmente para rehabilitaciones no estructurales (Clase I) de tuberías en el rango de diámetros de 100 a 900 mm, típicamente en longitudes de hasta 200 metros. El proceso consiste en la limpieza de la tubería para eliminar la corrosión existente y acumulación de tuberculación y luego la proyección de un revestimiento fino sobre la pared del tubo interno utilizando un cabezal de pulverización giratorio controlado por ordenador.

Los revestimientos de poliurea o poliuretano se instalan utilizando un equipo controlado por ordenador, al igual que los revestimientos epoxi, pero adquieren sus propiedades físicas en cuestión de minutos en lugar de horas de ser aplicado. Los revestimientos pueden ser instalados en tuberías que van desde 100 a 1.200 mm de diámetro en longitudes de hasta 200 m.



La tecnología de **entubado continúo ajustado curado en obra, o encamisado CIPP,** se lleva utilizando desde más de 40 años en tuberías de gravedad de alcantarillado siendo este sistema el más aplicado en la rehabilitación de estas redes. Viene a ser disponible también para la rehabilitación de tuberías de presión desde hace unos años. El proceso comprende el desvio de las aguas, la preparación de la tubería (limpieza, fresado), la gestión previa de las acometidas (deben ser tapadas en caso de red de abastecimiento para evitar la migración de resina durante la instalación de la manga). A continuación, el encamisado es instalado por inversión o tracción, en longitudes de hasta 200 m, presurizado con agua o con aire, y se cura con agua caliente o vapor, o con Ultravioleta.

El entubado final puede ser clasificado como un Clase II o III semi-estructural o IV totalmente estructural, dependiendo de la construcción de la manga. En grandes diámetros con presiones importantes las mangas tienen limitaciones técnicas que les impide ser clasificadas como clase IV. Adicionalmente no existe hoy en día un cálculo de dimensionamiento normalizado, independiente y completo, o un sistema de certificación de sistema CIPP en presión, por lo cual los gestores del ciclo integral del agua dependen de las afirmaciones y cálculos que proporcionen los proveedores para asegurar la capacidad estructural a largo plazo de la rehabilitación (caso de rehabilitación clase IV).

La tecnología de **entubado con *liner* flexible estructural** se lleva aplicando desde 2003 con las primeras aplicaciones en Europa. Consiste en la introducción en el interior de la canalización existente de una nueva tubería flexible constituida por tres capas de material. Las capas interior y exterior son de PEAD (Polietileno Alta Densidad) mientras la capa intermedia es una malla tejida de Kevlar, material con unas características de resistencia a la tracción excepcionales que permiten que la tubería resultante tenga gran resistencia a la presión interior. Está disponible para un rango de diámetros nominales de tubería existente comprendidos entre 150 mm y 500 mm. Es un sistema probado y dispone hoy en día de numerosas referencias para la rehabilitación de tuberías de presión sin zanja, en particular en el sector del agua potable y de la industria.

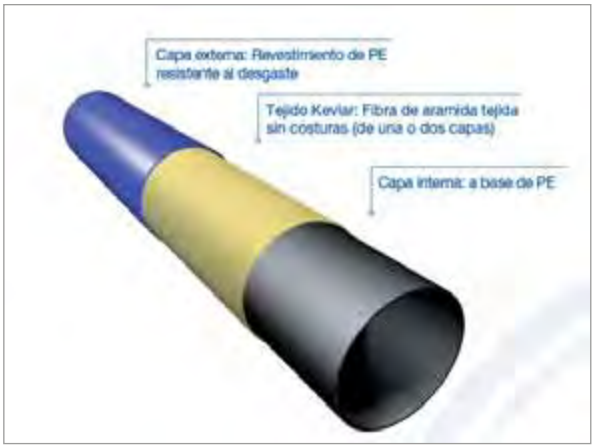




Figura 7.8. Sistema Liner estructural flexible PRIMUSLINE. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE – SINZATEC.

Destaca por la flexibilidad y el proceso de ejecución sencillo y rápido con requisitos mínimos de obra civil, además de ser una solución independiente que garantiza una resistencia integral a altas presiones internas. El comportamiento de la tubería es independiente de la tubería existente: la nueva tubería resiste de manera independiente a la presión interior mientras la antigua resiste las cargas externas del terreno y del tráfico.

La tubería puede ser instalada desde puntos de acceso muy reducidos y permite grandes longitudes de instalación.

El sistema de **entubado continuo simple** no ajustado (o *sliplining*) es siempre una rehabilitación estructural Clase IV en el que se inserta una nueva tubería de menor diámetro en el tubo existente. El sistema utiliza longitudes continuas de tubería (en general PEAD o acero soldado) que se tiran o empujado en su lugar y el relleno del espacio anular con lechada es opcional. Esta técnica se utiliza típicamente en tuberías con diámetros que van de 60 mm a 1.500 mm para longitudes de hasta 1.000 m. Entubado con tubos discretos, que es común en los diámetros más grandes y se realizan en general con tubos de acero, utiliza segmentos de tubería cortos de menor sección que se ensamblan en el punto de acceso de entrada y, a continuación, se rellena el espacio anular.



Figura 7.9. Entubado simple.

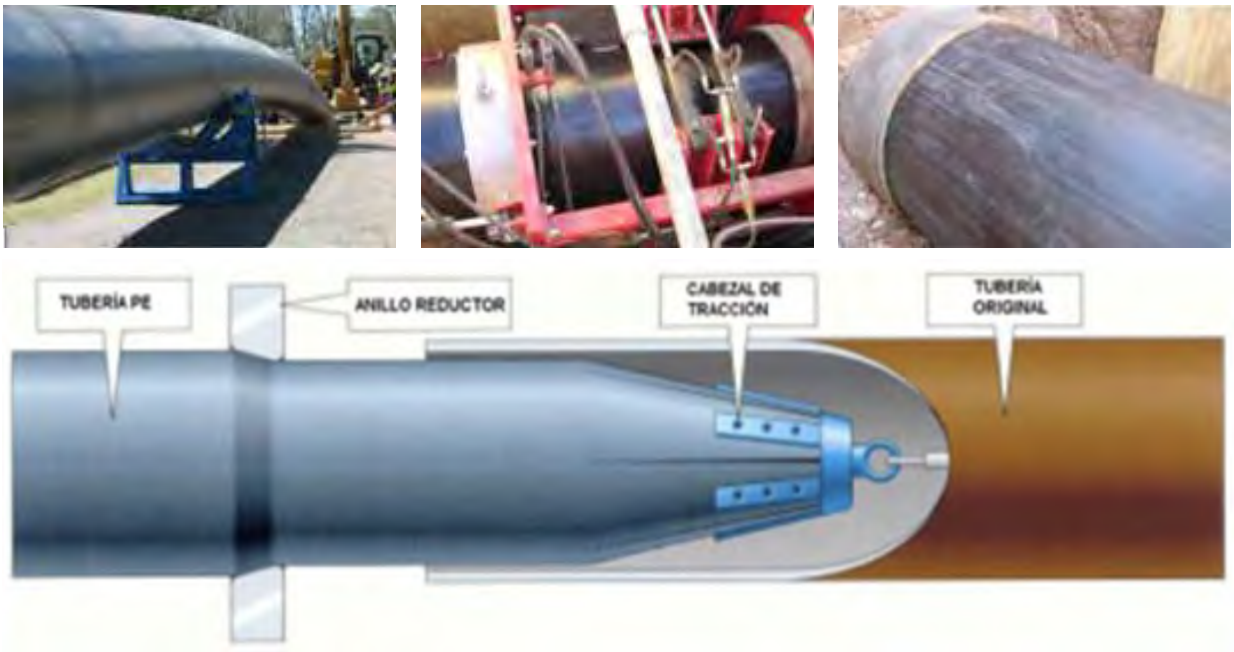


Figura 7.10. Entubado Ajustado – Reducción simétrica (SwageLining).

Los **entubados ajustados** incluyen varias técnicas de instalación como el "*fold and form*", la reducción simétrica, y el tubo de diámetro reducido. En cada caso, un tubo termoplástico con un diámetro exterior próximo al del diámetro interior del tubo anfitrión se deforma en el lugar de trabajo o en las instalaciones de fabricación para reducir temporalmente la sección transversal del entubado antes de la instalación. La instalación se convierte entonces en una operación similar a un *sliplining*, y una vez insertado, se restaura a su diámetro original generalmente aplicando presión interna, obteniendo así un entubado ajustado con la tubería existente. Esta técnica se suele utilizar en tuberías con diámetros que van de 60 a 1.500 mm para longitudes de hasta 1.000 m.

Estos dos últimos tipos de entubados requieren pozos de inserción y de extracción de grandes dimensiones, junto con una ocupación en superficie para el almacenamiento y soldadura de tubos también importante que pueden representar una dificultad en entornos altamente urbanizados. Crean una reducción de sección significativa y una modelización hidráulica es necesaria para validar estas opciones. Tienen la ventaja de consistir en la instalación de tubos normalizados y ensayados con presiones nominales garantizadas.

Además de ser un sistema de reparación localizado, los **polímeros reforzados con fibra** vienen aplicándose con mayor frecuencia como una rehabilitación estructural continua Clase IV, de momento



Figura 7.11. Aplicación de Polímero reforzado con carbono CFRP para rehabilitación estructural. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

principalmente en el mercado más desarrollado con estos materiales, Norte América. Se han realizado es estos últimos años proyectos de más de 1.000 metros de longitud.

Estos sistemas tienen las ventajas de que el espesor aplicado es mínimo sin ningún impacto en la capacidad hidráulica, de no requerir ninguna obra civil, de ser clase IV con el apoyo y la garantía de sistemas de certificación y de norma de referencia (AWWA C308) que incluye método de cálculo de dimensionamiento independiente y único, además de criterios de materiales, de método de aplicación y de control de calidad. Pero requieren tiempos de disponibilidad de la tubería importantes y, en caso de tuberías enterradas son aplicables en diámetros visitables >900mm.

Métodos de reemplazo. El reemplazo de la tubería se utiliza habitualmente cuando una tubería tiene defectos estructurales graves como ovalización y derrumbamientos. El método principal de sustitución sin zanjas es el *pipe-bursting*, que también puede ser utilizado para aumentar el diámetro de la tubería. *Pipe-bursting* utiliza equipos especializados para fracturar tuberías de material frágil o para fragmentar (*pipesplitting*) tubería de material dúctil. Los materiales de las tuberías antiguas son desplazados en el terreno, formando una cavidad lo suficientemente grande como para tirar en su lugar una nueva tubería de diámetro igual o mayor en las tuberías que van desde 100 mm a 1500 mm. Debido a que el *pipe-bursting* consiste en la instalación de una nueva tubería, soluciones estructurales de clase IV son posibles. Se requiere previamente la supresión/desvió de conexiones, que se restablecen por excavación.

Resumiendo, de forma esquemática quedaría representado en la Figura 7.12.

7.2. Polímeros reforzados con fibra

Los Polímeros Reforzados con Fibras (PRF) o Fiber Reinforced Polimers (FRP) en inglés, son una combinación de materiales de gran calidad, durabilidad, excepcional resistencia a la tracción, espesor y peso mínimos, que otorgan a los elementos sobre los que se aplican una protección anticorrosiva, total estanquidad, recuperación de la resistencia mecánica e inclusive aumento de la misma, sin alterar su geometría ni modificar su peso.



El nombre *composite* se atribuye a estos materiales por ser el resultado de la unión de 2 componentes, uno de ellos es la resina y el otro el tejido de fibra. A grandes rasgos, la resina se encarga de otorgar la adherencia estructural al sistema, de la transmisión de los esfuerzos entre los filamentos de la fibra y de encapsular y proteger la fibra, una vez la resina ha curado el material compuesto endurece y mantiene la forma que se le ha dado durante la aplicación. Por su parte la fibra se encarga principalmente de proporcionar la resistencia estructural al elemento en la dirección en la que las mismas se instalen.

Para entender cómo trabaja el refuerzo CFRP en una tubería primero hay que tener en cuenta dos aspectos fundamentales de este material, uno es que el CFRP es un material puramente elástico, es decir, el material sufre deformaciones como respuesta a los esfuerzos a los que es sometido y una vez estos esfuerzos cesan el CFRP recupera su geometría inicial. Sin embargo, si los esfuerzos a los que se somete este material sobrepasan valor del esfuerzo de rotura, el material falla de forma repentina. Su otra característica principal es su anisotropía, esto significa que las características físicas y mecánicas del material en una dirección distinta a la de las fibras es diferente y menor a aquella que pudiera tener en dirección paralela a las fibras, lo que obliga a realizar el diseño del refuerzo y posicionar las fibras del composite en las direcciones de los esfuerzos princi-

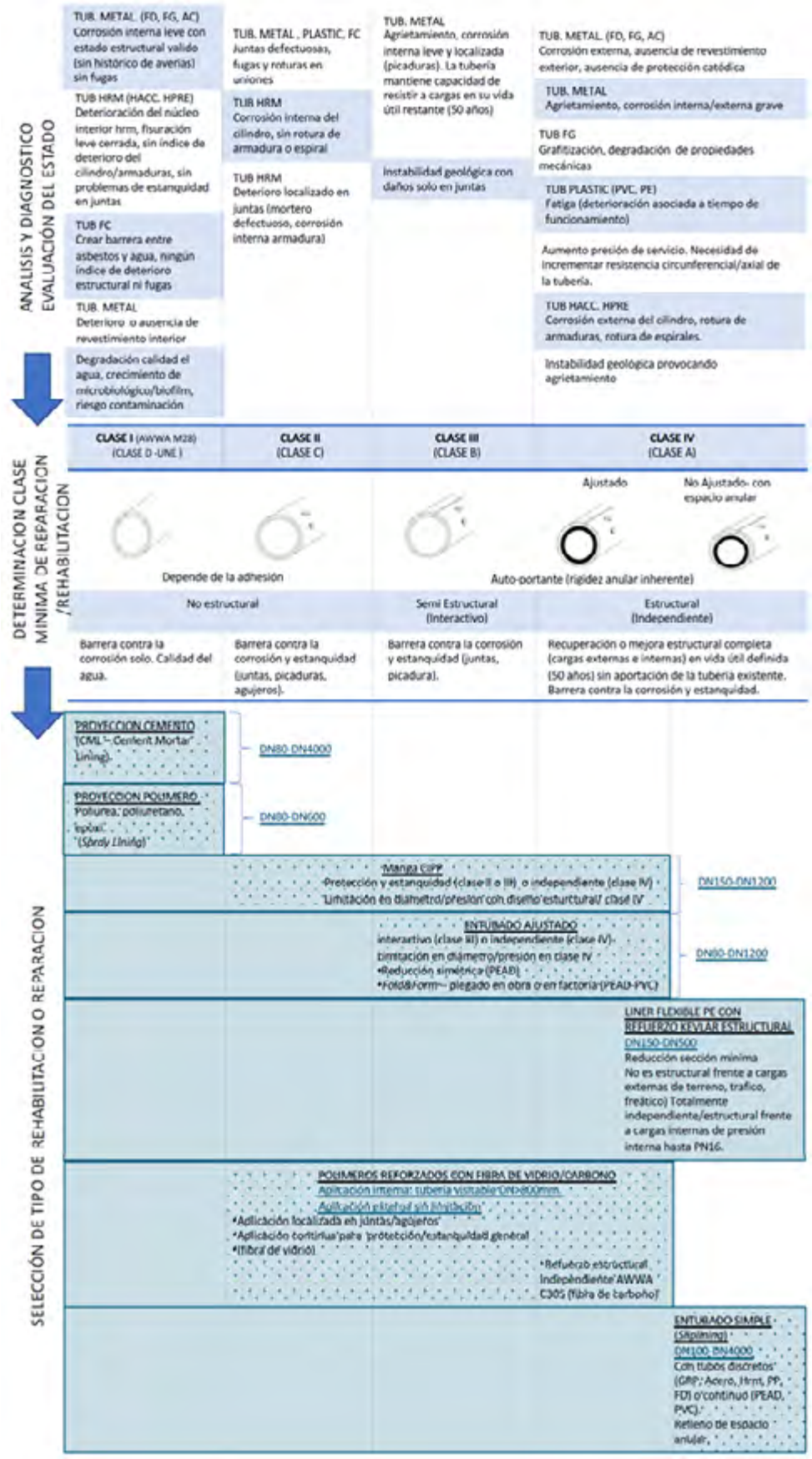


Figura 7.12. Resumen esquemático de métodos de reemplazo.

pales, estas son dirección axial o longitudinal y circunferencial.

En una tubería, los esfuerzos en la dirección circunferencial se producen principalmente como consecuencia de las presiones internas y externas a las que está sometida la conducción. Los esfuerzos en dirección longitudinal se generan por las fuerzas de empuje del fluido, el efecto Poisson de la presión interna y los derivados de los momentos flectores producto de la acción del peso del fluido + tubería + elementos externos.

La principal aplicación del refuerzo CFRP se basa en aprovechar al máximo su alto módulo de elasticidad y su resistencia a la tracción para reforzar estructuralmente las tuberías. El refuerzo de carbono puede aplicarse en el interior de la tubería o en el exterior de la misma.

Al aplicarse internamente el refuerzo CFRP ofrece las siguientes ventajas:

- *Protección anticorrosiva:* Las tuberías metálicas que sufren de corrosión interna quedan totalmente protegidas, deteniendo así el proceso de degradación y permitiendo al elemento recuperar o inclusive mejorar su capacidad mecánica inicial.
- *Estanquidad:* El revestimiento CFRP es totalmente estanco, garantizando el sellado desde el interior de la conducción y la eliminación de fugas.
- *Refuerzo estructural:* El refuerzo CFRP está en contacto directo con el efluente, por tanto, trabajará resistiendo los esfuerzos circunferenciales resultantes del efecto de la presión interna de manera directa, sin necesidad de que la tubería original deba deformarse o alcanzar su límite de fluencia.
- *Ejecución ágil y versátil*: Instalación rápida, sencilla, sin necesidad de excavar ni realizar obra civil pues se accede desde las entradas de hombre.
- *Garantía de durabilidad:* La adherencia estructural del sistema y su resistencia a la abrasión le confieren los últimos ingredientes para que la solución sea considerada como definitiva. La vida útil del revestimiento supera los 50 años.

En cuanto a la aplicación desde el exterior, se conservan la mayoría de las ventajas descritas anteriormente, con dos importantes diferencias:

Si el problema de la tubería esta originado en el interior de la misma, al aplicar el revestimiento en el exterior no se detendrá el deterioro. Sin embargo, un diseño independiente ("*Standalone Design*") del revestimiento toma en cuenta este aspecto y permite que la conducción original llegue prácticamente a desaparecer, pues es el CFRP quien se encargará de soportar todas las solicitaciones.

Es posible aplicar el revestimiento con la tubería en servicio, lo que supone una gran ventaja en los casos en los que no existe redundancia del sistema y debe realizarse una intervención localizada de emergencia.

¿Qué rango de aplicación?

Lo sistemas FRP son muy versátiles sin límites en lo que corresponden presiones elevadas, codos sifones, etc. En aplicación interior la tubería debe ser visitable con un diámetro superior a 800mm y sin límite superior, y en aplicación sobre exterior de la tubería no hay otros limites que el de tener acceso a toda la superficie exterior.

¿Qué materiales FRP son aplicables para el refuerzo de tuberías?

Existe gran variedad de resinas y tejidos de fibras que pueden combinarse para cumplir los requerimientos del diseño. Es muy importante resaltar que ambos componentes deben ser compatibles, y por ello las normativas exigen siempre que todos los materiales procedan del mismo fabricante y forman parte de un sistema de polímeros reforzados con fibras cualificado. Esto significa que deben haberse sometido a una serie de ensayos y haber obtenido resultados iguales o mejores a los requisitos mínimos que dicta la normativa. Los sistemas CFRP aplicables para el refuerzo estructural

de una tubería de gran diámetro deben así cumplir con los requisitos de la normativa AWWA C-305 sección 3, en lo que respecta a su durabilidad, propiedades mecánicas características y propiedades físicas. Esta norma que empezó a desarrollarse a finales del 2009 con una primera edición publicada en 2018 es el referente mundial reconocido por empresas gestoras del ciclo integral del agua para aplicaciones de refuerzo interior de tuberías con materiales *composite* de carbono. El propósito principal de esta normativa es el de llegar a un consenso en cuanto a la cualificación de los materiales, el diseño de los refuerzos, su método de instalación, el aseguramiento y control de la calidad y criterios de inspección para el mantenimiento de los refuerzos CFRP instalados en tuberías

Las grandes tuberías de transporte son críticas para un gestor, abastecen a cientos de miles de personas, sus roturas suponen costes económicos y sociales muy importantes y por ello es imprescindible recurrir a soluciones de refuerzo con garantía. Actualmente todos los aspectos de las reparaciones de tuberías visitables con materiales compuestos CFRP se rigen por este estándar AWWA C305, desde la precalificación de materiales y sistemas de reparación, el diseño de una reparación específica, el método de instalación, hasta los controles de calidad a aplicar.

Se resumen a continuación estos requisitos normativos aplicables.

Características físicas de materiales CFRP para refuerzo de tuberías

- **Tejido de fibra:** se aplican exclusivamente tejidos de fibra de carbono unidireccional como refuerzo estructural.

  La razón técnica es la de optimizar el diseño de la solución aportando mayor cantidad de fibra en sentido circunferencial y por consecuencia mayor resistencia a tracción, siendo este la propiedad más exigente en una tubería presión.

- **Resina:** exclusivamente resina epoxi termoendurecible, 100% de sólidos, de curado ambiental y totalmente libres de COV's (Compuestos Orgánicos Volátiles).

  La razón técnica es que las resinas epoxi proporcionan mayor adherencia y mejores propiedades mecánicas en particular su flexibilidad. Y la seguridad de los trabajadores es un factor importantísimo, y es crítico que manejen resinas no tóxicas sin necesidad de equipo de respiración autónomo dentro de un espacio confinado.

- **Espesor de cada capa entre 1 y 2 mm.**

  La razón técnica principal es la de minimizar el riesgo de defectos de construcción que mayoritariamente aparecen entre capas de compuesto instalado (fenómeno de delaminación). Con un mínimo de 1mm se busca minimizar el número de capas de compuesto y así el riesgo de defecto de construcción, y el máximo de 2 mm establecido por normativa es para limitar el riesgo de defecto en saturación de tejido demasiado espeso.

- **Todos los materiales constituyentes del sistema CFRP (resina epoxi y tejido de fibra de carbono) deben ser proveniente de un mismo proveedor.**

  La justificación técnica es la de asegurar la calidad, el seguimiento y el retorno de experiencia de un sistema *composite*. Es critico disponer de una ficha técnica del compuesto instalado, y no de cada componente por separado, para poder responsabilizarse el proveedor del *composite* de carbono final, y para disponer de las referencias de aplicación de un sistema completo. La norma establece características mecánicas mínimas del *composite* final, no de cada componente por separado (Tabla 7.1).

Características mecánicas y validación de materiales CFRP para refuerzo de tuberías

1. **El sistema CFRP debe disponer de ensayos que validen sus características mecánicas, en particular ensayos de impermeabilidad y de durabilidad.** La norma establece características mecánicas mínimas del composite final (Tabla 7.2).

Tabla 7.1. Requisitos de propiedades físicas de composite CFRP. Fuente: Estándar AWWA C305-2018.

Physical Property	Requirement	ASTM Test Method	Minimum Number of Tests
Shore D hardness of laminate	Greater than 50 for cured product	D2240	10
Glass transition temperature (T_g) of resin	Greater than maximum exposure temperature +40°F, and +175°F	D4065	20
Volatile organic compound (VOC)	In compliance with state and local regulations	D2369	2
Water absorption of fully cured resin	Less than 2 percent at room temperature	D570	5
Carbon fiber fabric thickness	Minimum of 0.04 in. (1 mm) thickness*	Nominal, listed on manufacturer data sheet	10
	Minimum of 0.08 in. (2 mm) thickness**		

* For lamina thinner than 0.04 in. (1 mm), larger number of interlaminar bonds make the laminate more susceptible to delamination.

** For lamina thicker than 0.08 in. (2 mm), saturation is more difficult.

Tabla 7.2. Requisitos de propiedades mecánicas de *composite* CFRP en dirección de la fibra. Fuente: Estándar AWWA C305-2018.

Mechanical Property	Minimum Requirement*	ASTM Test Method	Minimum Number of Tests
Tensile strength	80,000 psi	D3039	50 from 5 different lost
Tensile modulus	8 x 10^6 psi	D3039	10
Compressive strength	40,000 psi	D6641	10
Compressive modulus	8 x10^6 psi	D6641	10
Flexural strength	15,000 psi	D790	10
Flexural modulus	0,35 x 10^6 psi	D790	10
In-plane shear strength	12,000 psi	D5379	10
In-plane shear modulus	0,40 x 10^6 psi	D5379	10
Interlaminar shear strength	4,000 psi	D2344	10
Overlap shear strength	1,200 psi	D7616	10
Shear bond strength between CFRP and steel in the absence of peel-off failure mode	1,100 psi	D7616	10
Shear bond strength between CFRP and steel when CFRP is used as joint harness and when peel-off failure mode is likely	550 psi	D7616	10

CFRP: carbon fiber reinforeced polymer.

* 1 psi = 0,006895 MPa.

Tabla 7.3. Requisitos mínimos de durabilidad de composite CFRP en dirección de la fibra. Fuente: Estándar AWWA C305-2018.

Environmental Durability Test	Relevant Specifications	Test Conditions	Test Duration	Percent Retention		
				1,000 hours	3,000 hours	10,000 hours
Water resistance	ASTM D2247 ASTM E104	100 percent RH, 100 ± 2°F	1,000, 3,000, and 10,000 hours	90	85	80
Saltwater resistance	ASTM D1141 ASTM C581	Inmmersion at 73 ± 2°F	1,000, 3,000, and 10,000 hours	90	85	80
Alkali resistance	ASTM C581	Inmmersion in $Ca(CO_3)$ at pH = 9.5 and 73 ± 3°F	1,000 and 3,000, hours	90	85	N/A
Dry heat resistance	ASTM D3045	140 ± 5°F	1,000 and 3,000, hours	90	85	N/A

La durabilidad del material se establecerá mediante pruebas a largo plazo del sistema CFRP en el entorno químico y térmico de la exposición prevista o en entornos más severos. Las pruebas de durabilidad ambiental se realizarán para la resistencia a la tracción y el módulo de tracción ensayados de acuerdo con ASTM D3039 y deberán cumplir con los valores de retención porcentuales mínimos que se muestran en la Tabla 7.3.

2. **El sistema CFRP debe estar validado por retorno de experiencia.** AWWA C305 define precisamente el nivel de referencia a aportar por el proveedor del sistema CFRP:

   - Experiencia demostrada de más de 10 años con un mínimo de 100 instalaciones en aplicaciones estructurales civiles.
   - Experiencia demostrada de más de 5 años y un mínimo de 50 elementos de tubos de hormigón pretensado de diámetro mínimo 30 pulgadas (750mm) reparados y reforzados desde el interior a través de un mínimo de 5 proyectos.

   La justificación técnica aquí es la de realizar un refuerzo estructural eficiente y durable en una aplicación tan crítica como es la seguridad de una conducción de alta con presiones de servicios importantes.

¿Cómo se diseña una aplicación CFRP para el refuerzo de tuberías?

Para llevar a cabo el diseño de un revestimiento CFRP es necesario contar con una serie de datos que, en la mayoría de los casos, pueden obtenerse de forma relativamente sencilla. En primer lugar, lo más importante es conocer la razón por la que se considera necesario aplicar el revestimiento, bien sea para extender la vida útil de una tubería antigua que no presenta fallos estructurales evidentes, aumentar la fiabilidad de una tubería que representa alto riesgo en caso de rotura, rehabilitar una tubería que está deteriorada o aumentar su resistencia para que sea capaz de soportar esfuerzos mayores. Estos distintos escenarios son los que ayudarán a tomar la decisión respecto al tipo de diseño a desarrollar.

A grandes rasgos hay dos formas de diseñar un revestimiento CFRP para una tubería, la primera es considerando que la tubería original está degradada y que no contribuirá de ninguna manera en soportar los esfuerzos a los que está sometida, siendo el refuerzo CFRP quien soporte la totalidad de las solicitaciones tanto internas como externas. La segunda es considerar el aporte de resistencia de la tubería y calcular el refuerzo de forma compuesta, esto implica que es imprescindible conocer muy bien las características de la tubería y su resistencia remanente.

Una vez se determina el tipo de diseño, se procede a recopilar los datos necesarios para calcular el espesor de refuerzo CFRP. Los datos más determinantes e imprescindibles para el diseño son el diámetro interno de la tubería, la presión máxima de trabajo y altura de terreno sobre la tubería. En el caso en que se diseñe considerando el aporte de la resistencia de la tubería será imprescindible entonces conocer, además de lo anterior, el espesor de las distintas partes de la tubería, y en caso de tuberías de hormigón la resistencia del hormigón que la compone, el diámetro de las espiras de refuerzo y el espaciamiento entre ellas.

La normativa AWWA C305 propone un método de diseño por factores de carga y resistencia, en inglés LRFD (Load and Resistance Factor Design) y estados límite. La metodología se basa principalmente en la combinación de distintos escenarios críticos que podrían llegar a suceder durante la vida útil de la tubería, tomando como ecuación principal la siguiente:

$$RDC = \frac{R_{uLP}}{\lambda \varphi C R_n} + \frac{R_{uLP}}{\varphi C R_n} < 1$$

Donde:

RDC: Ratio de Demanda y Capacidad.

R_{uLP}: Solicitaciones ultimas a Largo Plazo.

R_{uCP}: Solicitaciones ultimas a Corto Plazo.

λ: Factor de tiempo, toma en cuenta la reducción de la resistencia del CFRP bajo la acción sostenida de las solicitaciones a largo plazo.

φ: Factor de resistencia, toma en cuenta la variabilidad de la resistencia del CFRP por los efectos de fallos en el alineamiento de las fibras. En otras palabras, es un factor de minoración de la resistencia del CFRP que considera que nunca se tiene el 100% de las fibras perfectamente orientadas en la dirección de los esfuerzos. Por ejemplo, en el caso de cálculo para esfuerzos de tracción, la normativa obliga a considerar que sólo el 75% de las fibras estarán contribuyendo de forma efectiva en resistir los esfuerzos.

C: Factor de ajuste del material para las condiciones de uso final. Toma en cuenta la degradación en el tiempo de las propiedades resistentes del material cuando el mismo está en contacto directo con ciertas condiciones medioambientales. Por ejemplo, para una tubería de abastecimiento de agua potable, el valor de C toma en cuenta la exposición prolongada del CFRP en contacto con agua a 73°F (22,8°C). Los valores de C se encuentran en las tablas 4 y 5 de la AWWA C305.

R_n: Resistencia nominal del CFRP. Es un valor que en la mayoría de los casos es proporcionado por el fabricante del material y se obtienen mediante ensayos de laboratorio específicos. En la tabla 2 de la normativa AWWA C305 se listan las características mecánicas mínimas en la dirección de las fibras que debe cumplir un sistema CFRP para poder ser utilizado como refuerzo.

El cálculo con la normativa AWWA C305 se puede resumir en 4 pasos principales:

Paso 1. De acuerdo con las características del diseño a realizar, se elige una cantidad de capas de material en las direcciones circunferencial y longitudinal. Esto dará un espesor de CFRP de diseño.

Paso 2. Para un estado límite específico, se obtiene la resistencia nominal a corto y largo plazo multiplicando los valores característicos que da el fabricante (o en su defecto se toma el valor correspondiente de la Tabla 2) por los coeficientes φ, λ y C correspondientes.

Paso 3. Mediante el uso de las ecuaciones de la norma para cada estado límite, calcular el valor del esfuerzo o deformación última para corto y largo plazo.

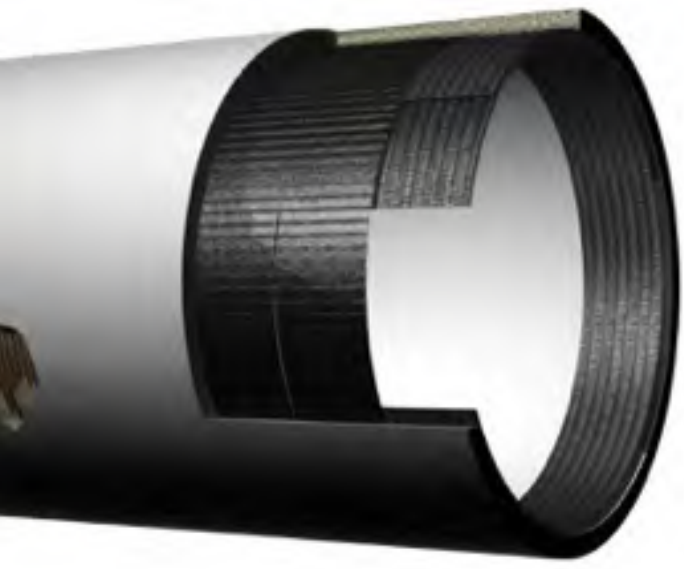
Paso 4. Con los resultados de los pasos 2 y 3, aplicar la ecuación de RDC < 1 para chequear que el espesor de CFRP de diseño propuesto en el paso 1 cumple con el estado límite en cuestión. Repetir para todos los estados límite los pasos 2, 3 y 4. En cuanto uno de los estados límite falle, se

reformula el diseño asumido en el paso 1 y se comienza de nuevo hasta cumplir con todos los estados límite.

Los estados límite a estudiar para un diseño de revestimiento CFRP **independiente** *("StandAlone Design")* deberán ser como mínimo los siguientes:

Para el diseño circunferencial:

1. *Presión de Rotura:* El objetivo es prevenir la rotura del revestimiento CFRP independiente como consecuencia de las acciones de la presión interna y el golpe de ariete.
2. *Pandeo local por acción de cargas externas:* El objetivo es prevenir el fallo del CFRP como consecuencia de las cargas externas cuando la tubería está vacía.
3. *Pandeo local por combinación de cargas internas y externas:* Su objetivo es prevenir el fallo del CFRP ante la acción de la presión interna a largo y corto plazo, peso propio de la tubería + efluente, y posibles deflexiones por efecto de cargas del terreno, nivel freático y cargas vivas.
4. *Falla por combinación de presión interna negativa + acciones externas (sólo las permanentes):* El objetivo es prevenir el fallo del revestimiento CFRP independiente consecuencia de la suma de las acciones externas permanentes y la presión de vacío.
5. *Desprendimiento del revestimiento CFRP en los extremos de la tubería consecuencia de la acción de fuerza cortante en la interfaz entre el CFRP y el substrato:* El objetivo es evitar el fallo por cortante en las terminaciones del refuerzo



Para el diseño longitudinal:

6. *Rotura del revestimiento CFRP por presión interna:* Prevenir el fallo de las capas longitudinales de CFRP ante la acción de distintas cargas combinadas, tales como: efecto del empuje, presión interna y cambios de temperatura. Se considerará que el movimiento longitudinal de la tubería está restringido.
7. *Pandeo longitudinal por compresión axial y momento flector en la sección transversal de la tubería:* Prevenir el fallo del refuerzo CFRP consecuencia de la acción combinada de las cargas descritas.
8. *Pandeo local por cambios de rigidez en el substrato debido a la presencia de zonas con cables de refuerzo rotos:* el objetivo es prevenir el fallo local (Buckling) del refuerzo CFRP consecuencia de la contracción/tracción del refuerzo creadas por la acción de la presión interna en las zonas con presencia de tensores rotos.

Para tuberías en galería o tuberías aéreas (diseño longitudinal):

9. *Fallo local debido a la acción de momento flector por el efecto viga en la tubería (cambios bruscos de rigidez en el soporte de la tubería):* El objetivo es prevenir el fallo local del revestimiento CFRP respecto a la acción de momento flector en los tramos aéreos de las tuberías en galería.

¿Cómo se aplica el refuerzo CFRP?

En caso de aplicación interna, la norma AWWA C305 define precisamente el procedimiento de

instalación de *composite* de carbono para el refuerzo de tubería, que se detalla a continuación:

Trabajos iniciales – Puesta en obra y control de condiciones

Se estudia las condiciones de la tubería existente, estableciendo planes de Seguridad y Salud, implementar procedimiento LOTO y de acceso en Espacio Confinado. Se preparan sistemas de ventilación / deshumidificación / control de temperatura con el objetivo de obtener las condiciones ambientales óptimas para la aplicación del sistema en zona de aplicación que aislamos. Igualmente se prepara en superficie zona de almacenamiento de materiales (según condiciones establecidas por proveedor del sistema CFRP), zona de preparación de resina Epoxi y de saturación de fibra de vidrio y de carbono.

El acceso al interior de la tubería debe ser seguro, recomendando el cierre de dos válvulas y el bombeo de toda agua retenida.

Trabajos de preparación de superficie

Además de sacar los sólidos y escombros, se procede a la limpieza de toda la superficie por chorro con arena de sílice (hormigón) o granallado (tubería metálica). La limpieza con agua a alta presión es también aplicable en caso de tuberías metálicas. Algunas partes singulares como la parte metálica en chapa de la tubería hormigón armado para terminaciones se realiza mediante herramienta mecánica manual tipo *Blíster Blaster*. El objetivo de esta operación es asegurar la aplicación del refuerzo CFRP sobre un substrato sano. La superficie debe estar limpia, seca y libre de cavidades y salientes al fin de asegurar la adhesión entre el sistema compuesto y el substrato existente:

- Nivel de preparación de la superficie de hormigón: superior o igual a CSP 3 según ICRI Guidelines 310.2R.
- Nivel de preparación de la superficie de acero superior o igual a SA2,5 según ISO 8501.

Durante el proceso de proyección de arena se realiza al mismo tiempo aspiración de todos los residuos.

Control de condiciones

De manera continua durante todo el proceso, desde el vaciado de la tubería se controlan las condiciones con las siguientes mediciones:

- Humedad relativa <80%.
- Punto de rocío *vs.* temperatura de superficie > 3ºC.
- Humedad de superficie del hormigón <5%.

Reparación de defectos y nivelación de superficie

Si fuese necesario, se procede a aplicar un mortero de resina epoxi de alto modulo para nivelar superficies, tapar huecos, rellenar fisuras, etc.

Aplicación de imprimación

Tras comprobar que las condiciones de aplicación son las adecuadas (humedad relativa, temperatura, punto de rocío), se inicia el proceso con la aplicación de capa de imprimación mediante formulación epoxi parte del sistema FRP y desarrollada para proporcionar una capa base/membrana que garantice altas propiedades de adhesión.

Aplicación sobre superficie interior: refuerzo CFRP según estándar AWWA C305

La norma define explícitamente que la saturación de los tejidos se debe realizar con saturador mecánico, y la aplicación manual en tubería capa por capa del tejido preimpregnado (método húmedo). La norma no se aplica a laminados precurados adheridos a la pared de la tubería, aplicación en seco o métodos de instalación por infusión, automatizados tipo infusión o robóticos.

La justificación técnica esencial es la de tener un mayor control de la aplicación, asegurar la saturación optima de las fibras (saturado mecánico), y la

Saturación de fibra con saturador mecánico



Aplicación capa longitudinal



Aplicación capa circunferencial



Figura 7.12. Proceso de aplicación de Polímero Reforzado con Fibra de Carbono según normativa aplicable. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

aplicación manual capa por capa permite un mayor control de la instalación del refuerzo: control de la dirección de las fibras, control que no existen huecos o delaminaciones entre capas.

En la fase de saturación de las fibras, las resinas epoxi de dos componentes se mezclan en la obra en una zona protegida y controlada. Se enrolla las bandas de fibra ya saturadas sobre rodillos. Los rodillos saturados de material compuesto se aplican sobre la pared de la tubería, en sentido circunferencial y longitudinal según el dimensionamiento realizado.

Los tejidos de fibra de carbono se impregnan utilizando un saturador mecánico que garantiza una impregnación homogénea del compuesto. El proceso de aplicación es siempre por método húmedo, siguiendo los requisitos de AWWA C305. Se aplica capa fina de mortero de resina ("thickened epoxi") entre cada capa de compuesto de CFRP.

El material compuesto saturado es libre de orgánicos volátiles (0% V.O.C.) eliminando así todo riesgo para los trabajadores y respectando requisitos normativos AWWA C305.

Detalle de conexión de refuerzo

La norma AWWA C305 define explícitamente el proceso de aplicación del refuerzo de CFRP en los puntos de conexión. Se presenta detalle en esquema a continuación. Los objetivos conseguidos son tanto a nivel mecánico con la trasmisión de esfuerzos entre fibras de diferente orientación, como de estanquidad en este punto crítico que queda totalmente asegurada.

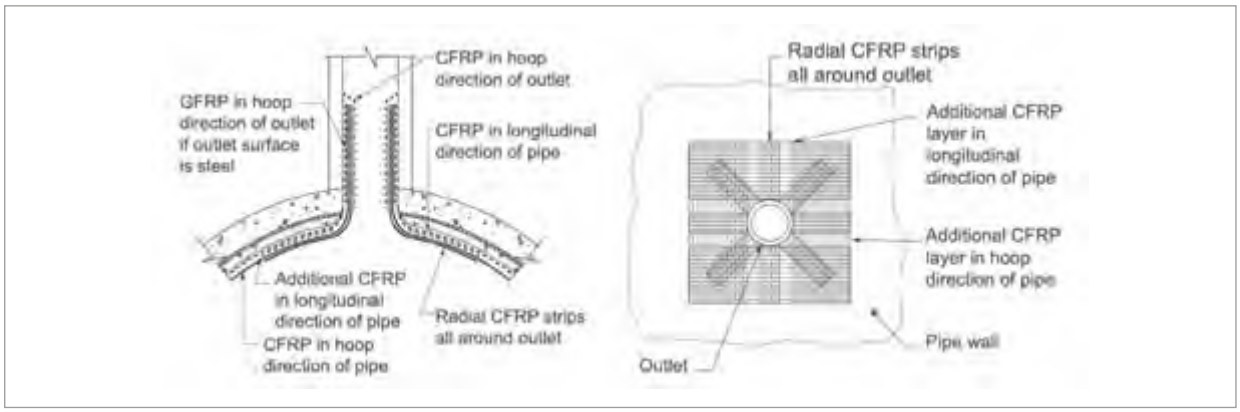


Figura 7.13. Esquema de aplicación en conexión. Fuente: Estándar AWWA C305-18.

Detalle de terminación de refuerzo

La norma AWWA C305 define explícitamente el proceso de aplicación del refuerzo de CFRP en los puntos de terminación de aplicación de refuerzo CFRP, con el objetivo de impedir la penetración de agua entre el hormigón y el composite instalado. Para ello es imprescindible realizar terminación de refuerzo sobre el cilindro de acero. Se presenta aquí detalle en esquema:

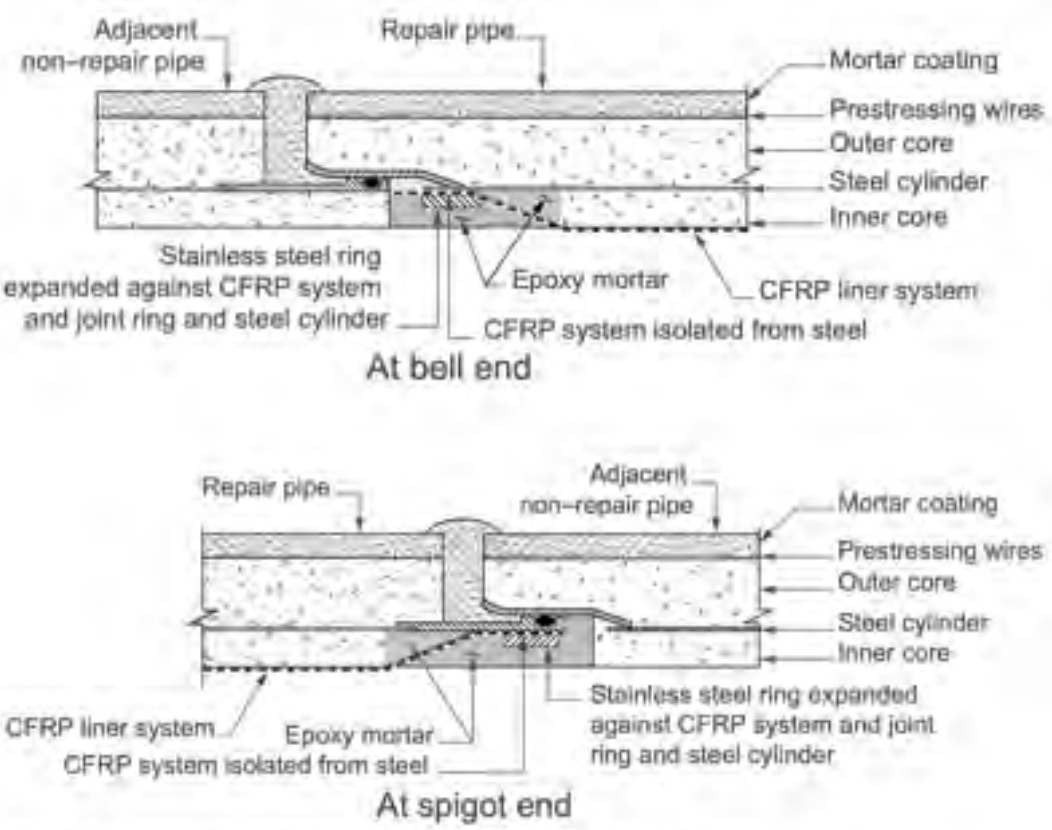


Figure 2 Schematics of termination concepts at bell and spigot rings

Figura 7.14. Esquema de aplicación en terminación. Fuente: Estándar AWWA C305-18.

Revestimiento final

Se empleará un mortero de resina epoxi como revestimiento final en toda la superficie que aporta protección final contra la corrosión, la erosión y el deterioro por contacto con agua sucia, pura o salada.

Todos los materiales son acreditados para su uso en agua potable.

Control de calidad

El objetivo es asegurar la correcta instalación sin vacío, huecos, de un material que contenga las características mecánicas declaradas y así asegurar un refuerzo estructural eficiente y durable de una infraestructura critica.

- Control visual entre cada aplicación de capa de *composite* CFRP.

- Control auditivo y visual de presencia de hueco o delaminaciones.
- Control de polimerización: ensayo de dureza SHORE para el control del endurecimiento.
- Control de adherencia mediante ensayo de arrancamiento con herramienta tipo PROCEQ DY216, directamente sobre sustrato de la tubería.
- Realización diaria de muestras y ensayo laboratorio de propiedades a tracción unidireccional.



Figura 7.15. Control de calidad a realizar en aplicaciones CFRP para refuerzo de tuberías. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

Dentro de los diferentes tipos de fibra existen tres que son las más empleadas para refuerzos de conducciones o tuberías y se clasifican en:

- **Fibra de vidrio.** Aislante eléctrico, resistencia a tracción y compresión, rigidez, resistencia a la humedad, baja resistencia a impacto.
- **Fibra de aramida.** Alta resistencia a impacto, resistencia a tracción, excelente tenacidad, rotura ± dúctil, baja adherencia general.
- **Fibra de carbono.** Alta resistencia mecánica y alta rigidez, elevada resistencia a fatiga, baja resistencia a impacto.



Figura 7.16. Comparativa cualitativa de otras propiedades de distintos tipos de fibra. Fuente: GRUPO NAVEC.

Los distintos tipos de fibra en función de su orientación y en función de la unión entre capas pueden diferenciarse en:

- Tejidos unidireccionales UD.
- Tejidos entrelazados (*'woven-fabric'*):
  - Bidireccionales 0/90 (Tafetán, sarga, satén).
- Tejidos ensamblados o multiaxiales (*'non woven-fabric'*):
  - Biaxiales 0/90º, ±45º, otras orientaciones.
  - Triaxiales +45/0/90º; -45/0/90º.
  - Cuadriaxiales ±45/0/90º.

Igualmente se pueden disponer tejidos híbridos, que son aquellos que tienen más de un tipo de fibra o material en su construcción:

- Carbono/Aramida: alta resistencia al impacto y a la tracción de la aramida combinada con la alta resistencia a la compresión y a la tracción del carbono. Coste relativamente elevado.
- Carbono/Vidrio: la elevada resistencia y rigidez del carbono combinada con la resistencia a compresión/tracción del vidrio: se reduce la densidad, y se aporta algo de flexibilidad por parte del vidrio, reduciendo a su vez el coste.
- Aramida/Vidrio: alta resistencia al impacto. La combinación de la tracción de la aramida y la compresión/tracción del vidrio: flexibilidad y menor coste.

En la rehabilitación de grandes arterias se aconseja el uso de tejidos unidireccionales y ensamblados o multiaxiales, debido a que las fibras están totalmente estiradas, sin ondulaciones.

Previamente a la instalación, debe de existir una fase de estudio y diseño. Para las tuberías metálicas se emplean las normativas ISO 24817 y ASME PCC-2. Mientras que para el diseño de las tuberías de hormigón con camisa de chapa y de hormigón pretensado se recurrirá a las normativas AWWA C305 y AWWA M9.

A continuación, la preparación de la superficie es el primer paso para el éxito de la instalación de un sistema de refuerzo estructural. Es necesaria una superficie limpia y rugosa para tener una estabilidad a largo plazo. Las actividades para realizar antes de la aplicación serán:

- Evaluación de las condiciones de la superficie, incluyendo defectos de diseño y fabricación.
- Remoción de contaminantes visibles como aceite y grasa.
- Secado en caso necesario.
- Trabajos para remediar o mejorar los defectos de diseño y fabricación.
- Preparación de la superficie mediante chorro abrasivo, herramientas motorizadas o manuales, en función del tipo de sustrato y del estado de este.

Los principales factores que afectan a la vida de una aplicación incluyen:

- Residuos (aceite, grasa o suciedad) y sales químicas (no visibles).
- Óxido en la superficie, para sustratos metálicos (falta de adhesión).
- Calamina, en sustratos metálicos (capa de óxido azul-negra catódica con respecto al acero) encontrándose suelta o rota, causando fallas prematuras; o firmemente adherida, fallas posteriores.
- Patrón de anclaje: picos difíciles de cubrir o falta de rugosidad (pérdida de adhesión).
- Crestas afiladas, bordes, protuberancias o cortes causados por la limpieza mecánica.
- Condensación en la superficie (fallas por desprendimiento).
- Recubrimientos viejos o existentes (adhesión deficiente, o incompatibles).

De forma general se podría establecer que para un sustrato metálico tipo acero carbono sería necesario obtener un grado de limpieza de SA 2 ½ con un perfil de anclaje mínimo de 50 µm según ISO

8503. Para sustratos tipo hormigón sería necesario obtener un grado CSP 3 según ICRI Guideline 310.2R.

Una vez preparada la superficie, para el proceso de instalación de los materiales compuestos en la rehabilitación de tuberías, existen tres procesos diferenciados, un proceso manual por contacto, un proceso manual con presión de vacío y un proceso automatizado de infusión y vacío.

A continuación, se describen los 3 procesos con sus ventajas e inconvenientes:

Manual vía húmeda (o por contacto)

La impregnación de las fibras se realiza a mano de forma manual por contacto mediante el uso de brochas o rodillos con la resina líquida (Figura 7.17).

Se emplea cualquier tipo de resina: poliéster, viniléster, epoxi, uretano-acrílica, etc. Puede utilizarse cualquier tipo de fibra, aunque la impregnación de la fibra de aramida a mano es complicada.

Las características mecánicas y físicas que se alcanzan son inferiores a las que se obtienen mediante otros métodos, debido principalmente al bajo porcentaje de fibra del laminado final. Los porcentajes están en torno a 30-40% fibra y 60-70% resina en peso.

Ventajas:

- Proceso relativamente sencillo, fácil de enseñar y llevar a la práctica.
- Las herramientas para la consecución del proceso son de bajo coste.
- Existen muchos proveedores, amplia gama de materiales y aplicadores.
- Contenido de fibra > al que se obtiene en un sistema de pulverización o 'sprayado'.

Desventajas:

- La mezcla de la resina, el contenido de resina en el laminado y la calidad final del laminado son totalmente dependientes de las habilidades del aplicador.
- No pueden lograrse laminados de bajo contenido de resina sin la incorporación excesiva de huecos y burbujas de aire.
- No puede garantizarse la homogeneidad del laminado, ni de sus propiedades mecánicas, en todas las zonas.

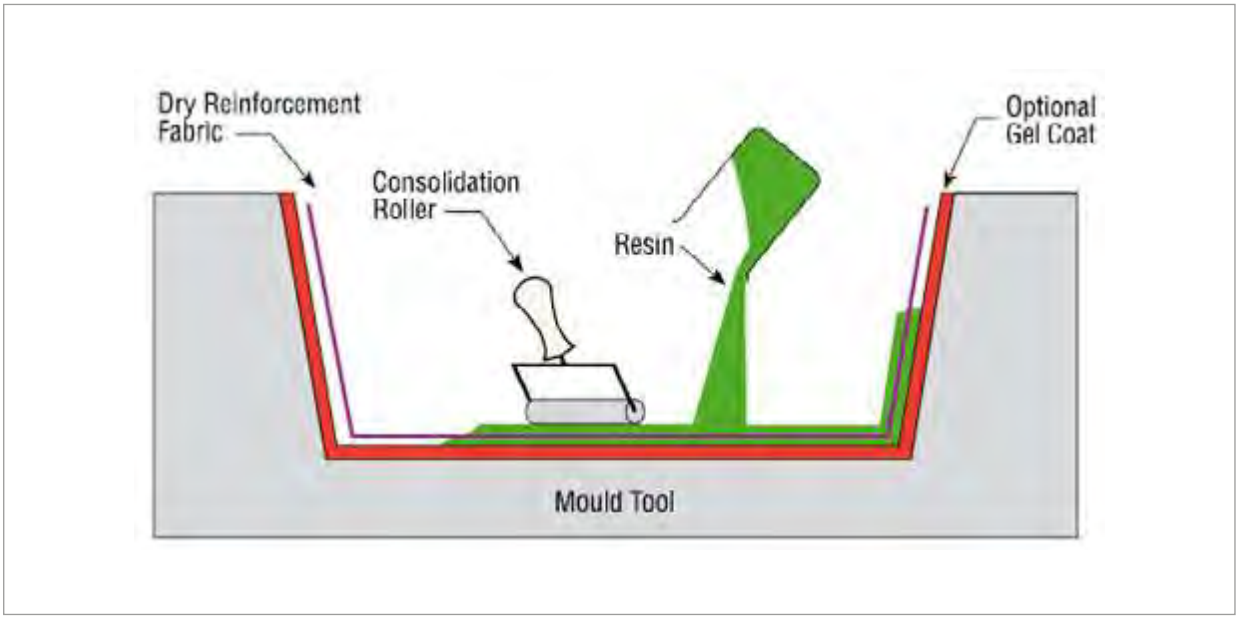


Figura 7.17. Método de impregnación manual o por contacto. Fuente: GRUPO NAVEC.

- Aparición de cierta cantidad de huecos vacíos y burbujas de aire, no apreciables a la vista, sobre todo en zonas verticales o inclinadas, donde la gravedad puede jugar un papel en contra.
- Salud y seguridad de los trabajadores, exposición continua a la inhalación de vapores.

Manual vía húmeda y vacío

Se trata del proceso por vía húmeda manual, añadiendo una presión homogénea de vacío durante su ciclo de curado (Figura 7.18).

Mejora su consolidación y la extracción de burbujas de aire del laminado, aumentando a su vez las propiedades físicas y mecánicas, además de mejorar la adherencia con el sustrato. Además, se elimina el exceso de resina.

Permite remover el aire ocluido entre capas, compactar las capas mejorando la solidez interlaminar, evitar cambios de orientación del laminado durante el curado, reducir la humedad y optimizar el contenido de resina en el material compuesto. Los porcentajes están en torno a 40-50% fibra y 50-60% resina en peso.

Ventajas:

- Laminados con contenidos de fibra más elevados y mayores propiedades mecánicas.
- Se disminuye considerablemente la cantidad de huecos vacíos o burbujas de aire.
- Misma fibra con mejor humectación debido a la presión, eliminando excesos de resina.
- Salud y seguridad: la bolsa de vacío reduce la cantidad de volátiles emitidos durante la consolidación y curado de la aplicación.

Desventajas:

- El proceso adicional de consolidación al vacío aumenta el coste tanto en mano de obra como en los materiales consumibles desechables.
- Se requiere un mayor nivel de habilidad por parte de los aplicadores, en la fase de impregnación manual y en la fase de diseño, corte, colocación y cierre del material consumible, sobre todo en geometrías complejas con ángulos.
- A pesar de reducir la cantidad de volátiles, la exposición de los aplicadores es mayor que el sistema de infusión y vacío, o preimpregnados.

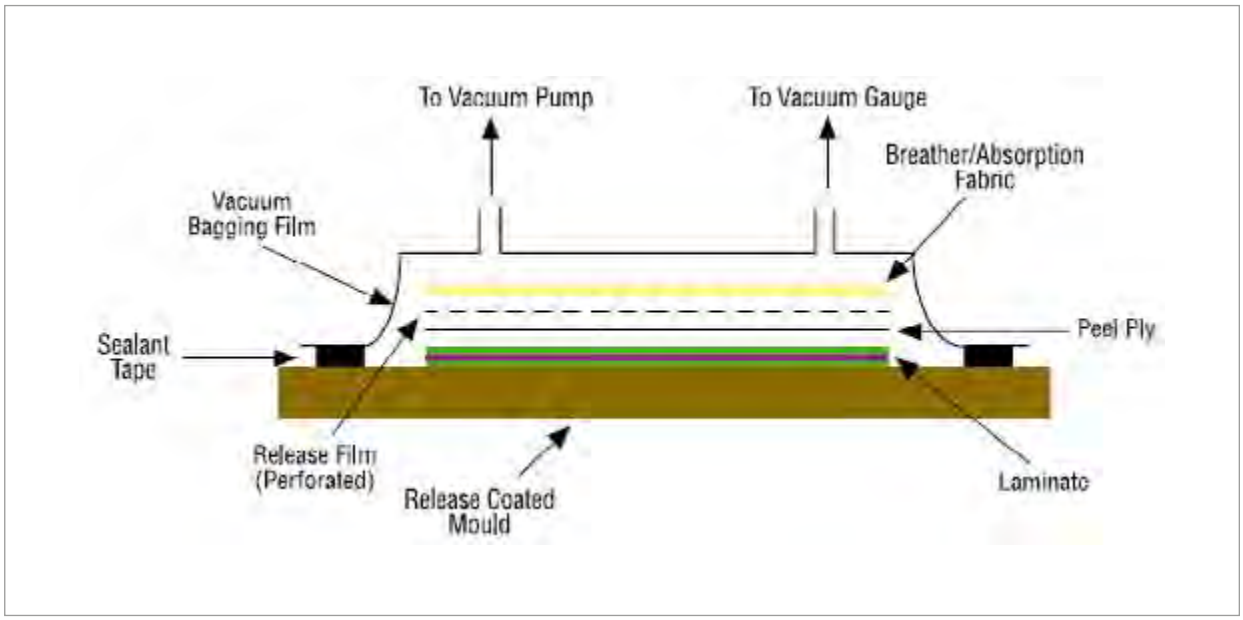


Fig. 7.18. Método manual y consolidación a presión de vacío. Fuente: GRUPO NAVEC.

Automatizado, sistema de infusión y vacío

En este caso la fibra, las telas o los tejidos de refuerzo se colocan de forma apilada en seco y de acuerdo con el diseño establecido. Puede utilizarse un espray adhesivo para la colocación de estas (Figura 7.19).

En situaciones verticales, de inclinación o en zonas superiores, puede incorporarse, por parte del fabricante, un aglutinante o adhesivo compatible también con la matriz. Sobre el apilamiento de capas del laminado, una vez colocadas, se instalan los consumibles de infusión y vacío. Los porcentajes están en torno a 50-70% fibra y 30-50% resina en peso.

Ventajas:

- Mejores prestaciones mecánicas en un procesado in-situ. Fiabilidad y homogeneidad, puede llegar a tener hasta 10 veces más resistencia que un mismo laminado a mano.
- Pueden realizarse laminados de grandes dimensiones de forma homogénea, obteniendo las mayores fracciones de volumen de fibra posibles y el mismo peso.
- Bajo contenido de resina y alta reducción de huecos vacíos o aire.
- No depende de las habilidades de los aplicadores. Se elimina el factor humano de cansancio, rapidez, falta o exceso de impregnación, etcétera.
- Homogeneidad de propiedades mecánicas a lo largo de todo el laminado. Ideal para grandes conducciones, geometrías complejas, tramos verticales o inclinados, zonas superiores, y generatriz superior de cualquier tubería, equipo o recipiente a presión.
- Ausencia de volátiles en la atmósfera. Sistema respetuoso con el medio ambiente y con los trabajadores, eliminando el contacto directo con fibra húmeda y resina, así como la inhalación de vapores procedentes de la resina.

Desventajas:

- Materiales auxiliares caros y trabajosos de instalar dependiendo del diseño.
- Proceso relativamente complejo, el personal debe estar cualificado y con experiencia contrastada.
- La viscosidad de la resina debe ser muy baja para obtener las propiedades mecánicas, debe controlarse mucho esta propiedad durante la fase de infusión.
- En caso de fallo durante el proceso, la retirada del material utilizado puede implicar costes no previstos muy elevados.

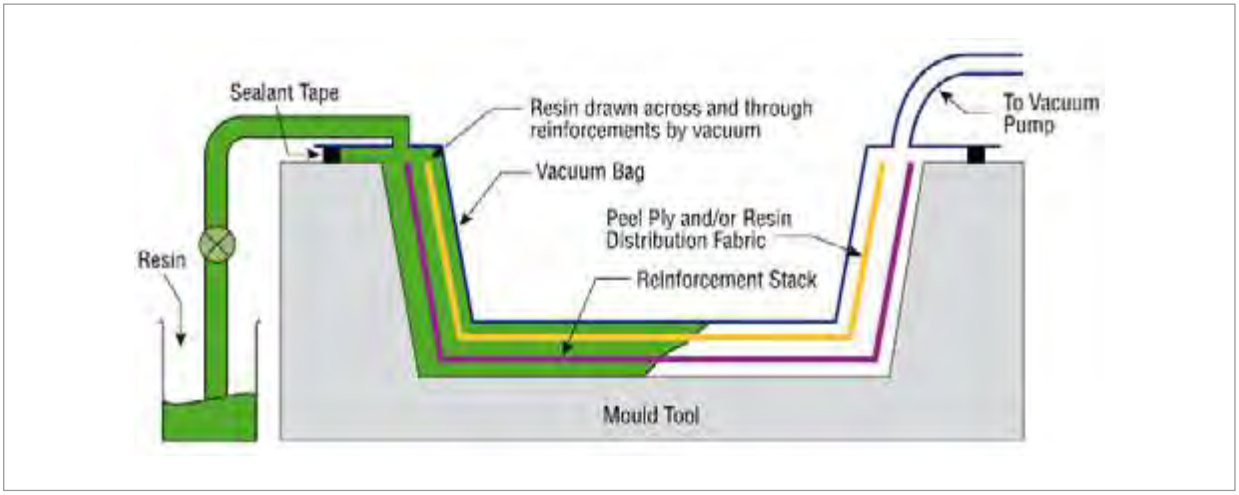


Figura 7.19. Método de infusión de resina y consolidación a presión de vacío. Fuente: GRUPO NAVEC.



Figura 7.20. Sistema de infusión y vacío en conducción DN 800 mm. Fuente: GRUPO NAVEC.

En resumen, mediante este método, se consigue fabricar una tubería con fibra de carbono in situ por vía húmeda mediante la infusión de una resina epoxi de alta resistencia y su posterior consolidación a presión de vacío mantenida hasta la finalización del ciclo de polimerización.

El conjunto resultante, homogéneo en toda la superficie, **resuelve las carencias e incertidumbres generadas por las aplicaciones manuales** derivadas del factor humano, como son la falta de impregnación o exceso de resina, oclusiones de aire, sensibilidad a la delaminación, falta de compactación entre capas de fibra, insuficiente adherencia sobre el sustrato o mala adaptación a la geometría existente. Se absorbe únicamente la cantidad de resina necesaria en función del gramaje utilizado en la fibra de carbono ensamblada, obteniendo las propiedades mecánicas óptimas extraídas en las hipótesis de cálculo teóricas.

7.3. Entubado continuo con tubería de diversos materiales

7.3.1. Entubado continuo simple / con espacio anular

- Renovación estructural con tubo nuevo y reducción de sección.
- El diámetro efectivo de la tubería se reduce. Al tratarse de una tubería nueva tiene una superficie interior lisa.
- Se requieren excavaciones para conexiones de servicio, pozos de entrada y de salida.
- Se pueden usar varios materiales de tubería (FD, PVC, PEAD y acero) como tubería nueva.

Para estos procesos de rehabilitación se encuentran disponibles tuberías de PEAD, PRFV, acero, PVC o FD, en diámetros nominales de 25 mm a 3000 mm. Dependiendo del tamaño nominal y del material de la tubería, las tuberías se entregan en el lugar de la rehabilitación como tubos, bobinas o tambores individuales. Pueden introducirse en una tubería existente de mayor diámetro mediante un cabrestante o introducirse mediante un dispositivo de empuje.

Debido al proceso, queda un espacio anular entre el diámetro interior de la tubería existente y el diámetro exterior de la nueva tubería, que se rellena según los requisitos después de la prueba de presión.

En una instalación por tracción, los nuevos tubos se introducen individualmente con un cabrestante o como un tramo de tubos soldados o ensamblados. En el caso menos común de empuje de tuberías, las tuberías individuales en el pozo de inicio se conectan a la tubería ya insertada y cada una se empuja hacia la tubería principal.

Para reducir las fuerzas de inserción minimizando la fricción, la instalación se puede realizar con espaciadores, patines o rodillos que se fijan a la nueva tubería o por flotación.

La tubería principal a rehabilitar no tiene que absorber cargas estáticas cuando las cargas externas se transfieren a la nueva tubería. Como regla general, se requiere un relleno de espacio anular para esto.

Dependiendo del tipo de tubería de acogida, la corrosión interna, las juntas con fugas, los poros localizados, las grietas longitudinales y transversales, así como las deformaciones de las juntas, se

encuentran entre los patrones de daño en los que se puede aplicar la rehabilitación mediante la inserción empuje de la tubería con espacio anular. Los obstáculos afilados y/o sobresalientes deben eliminarse antes de introducir la nueva tubería. Es esencial limpiar la tubería principal para crear la separación transversal requerida y asegurarse de que se hayan eliminado los posibles contaminantes.

En tuberías de gran diámetro visitables con juntas de enchufe, generalmente se usan patines.

Las tuberías se ensamblan y fijan dentro de la tubería principal mediante espaciadores y cuñas.

Dependiendo del material de la tubería a introducir, el espacio anular debe rellenarse en varias fases definidas. Al rellenar, se deben evitar deformaciones inadmisibles, desviaciones de la tubería debido a la flotación o pandeo local en los puntos de apoyo.

En el caso del procedimiento entubado con espacio anular, generalmente es necesario quitar los accesorios de la red.

El nuevo tubo y las piezas de conexión se elaboran en fábrica cumpliendo la normativa aplicable en función del medio a transportar. La nueva tubería se dispone en el lugar de construcción de acuerdo con las instrucciones de instalación del fabricante y las normativas aplicables.

7.3.2. Entubado contínuo ajustado/ sin espacio anular

- Clasificado como revestimiento estructural o semi-estructural según el espesor del revestimiento. La tubería insertada agrega resistencia, evita una mayor corrosión interna y mejora el valor C de Hazen-Williams.
- En caso de diseño semi-estructural o clase III, es considerado para problemas hidráulicos, de fugas en las juntas y de calidad del agua sin problemas estructurales involucrados.



En el proceso de entubado ajustado, una sección de tubería hecha de materiales termoplásticos (PE 100, PE 100-RC) con una sección transversal reducida se introduce por tracción en la tubería principal con cabrestante y luego se actúa sobre la tubería de revestimiento para que se ajuste firmemente contra la pared de la tubería principal (“close-fit”). Los tubos utilizados para el entubado se dimensionan habitualmente de acuerdo con la presión interna, las cargas externas o la presión de pandeo.

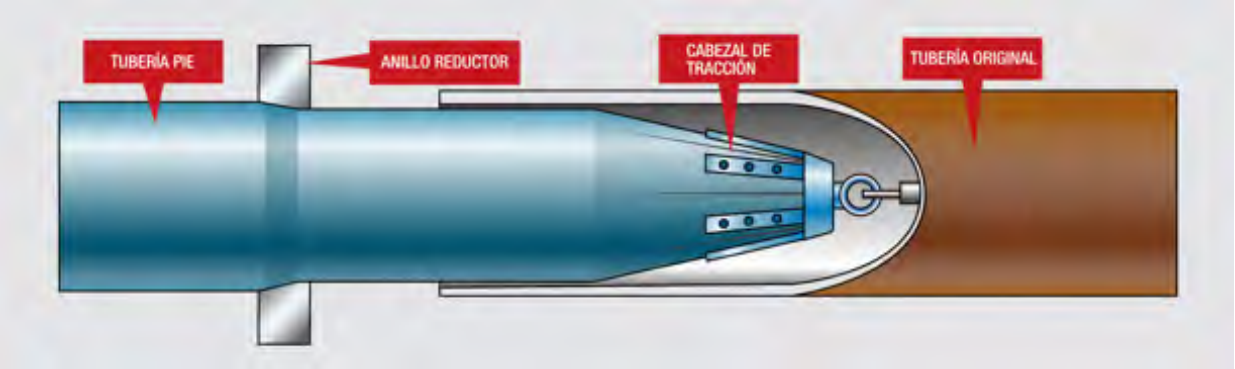
Existen dos variantes principales del proceso:

1. Instalación con proceso de reducción en obra

Con el proceso de reducción, se fabrica en obra una tubería continua, proveniente de barras de tubería PE entregadas en obra y soldadas por termo fusión o fusión a tope.

Reducción Simétrica

El tramo soldado es traccionado a través de un anillo reductor o troquel para reducir temporal-



mente su diámetro exterior. El diámetro exterior de la tubería de revestimiento se reduce hasta en un 12% en un reductor cónico, generalmente sin aplicar calor.

Esta reducción permite que el tubo de PE sea fácilmente deslizado a través de la tubería mediante un equipo de tiro hidráulico o un cabrestante.

Se debe mantener una tensión de tracción mínima durante todo el proceso de extracción para evitar un remodelado prematuro.

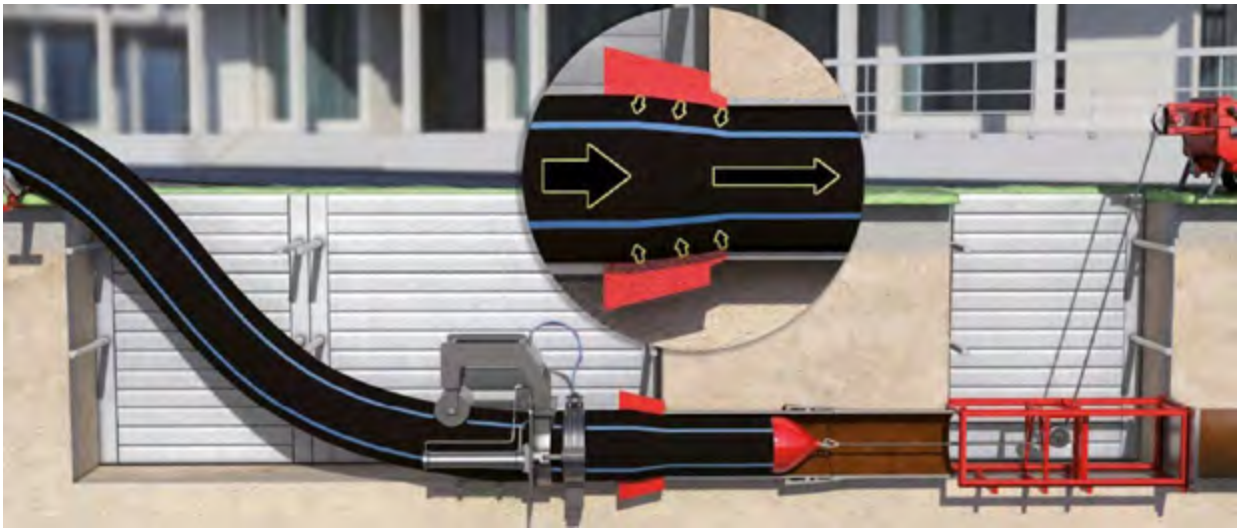
Después de alcanzar el pozo de destino y el alivio de tensión, la tubería de revestimiento se expande radialmente nuevamente y se ajusta firmemente contra la tubería principal.

Actualmente se puede cubrir un rango de diámetro nominal de DN 100 a DN 1600. Las longitudes máximas de tubería de revestimiento dependen



de las fuerzas de tracción permitidas y de las condiciones de obra. Dependiendo del diseño, son posibles longitudes individuales de hasta 1.000 m.

Los materiales termoplásticos se utilizan como materiales de entubado. Con estos materiales, los niveles de presión hasta PN 16 pueden cubrirse en el proceso de reducción.

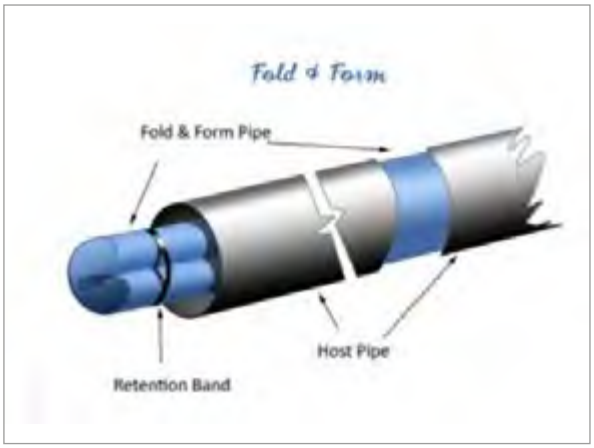


Reducción por plegado

Un segundo método de reducción es por plegado ("*fold and form*").

La técnica de plegado en obra es menos sensible a las variaciones de diámetro y a las irregularidades geométricas del tubo de acogida, en comparación con el sistema de reducción simétrica.

La energía requerida para reducir el diámetro de la tubería se incrementa con el tamaño de tubería más y el espesor de pared.





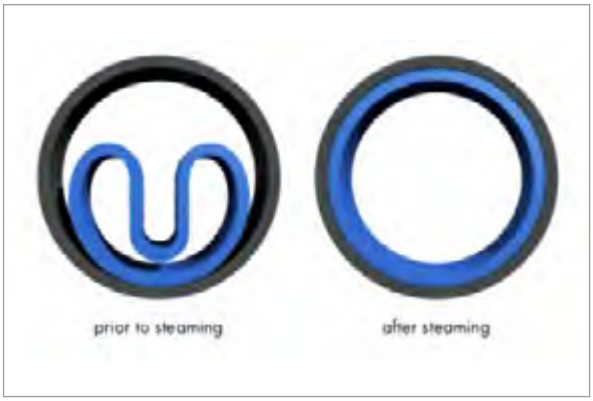







2. Técnica de deformación

Con la técnica de deformación, los tubos se extruyen con sección circular en la fábrica y se predeforman allí, se enrollan en tambores y se entregan in-situ. Las dimensiones y la longitud del tramo a rehabilitar se determinan en términos del proyecto específico, pero dependen de la combinación del diámetro y de la capacidad del tambor. Los tubos utilizados están fabricados con materiales PE 80, PE 100, PE 100-RC (resistente al agrietamiento) o RT (temperatura elevada) y PVC modificado. Es posible una gama de diámetros nominales de



DN 100 a DN 500 (en DN 500 hasta PN 6) en longitudes de inserción de hasta 600 metros.

Después de la inserción, la tubería recupera su forma original a través de un proceso especificado por el fabricante, que combina en general vapor y presión de aire, de modo que al final el revestimiento se ajusta estrechamente contra la pared interior de la tubería principal.

La reducción de sección, más importante que con la reducción simétrica, permite pasar por codos de hasta 45º.







Tantos las técnicas de revestimiento de reducción y deformación se pueden clasificar como Clase A (totalmente estructural) o Clase B (semi estructural con rigidez) según EN ISO 11295, Tabla 17.

Cabe señalar que se interrumpirá el servicio a un tramo en rehabilitación. También debe tenerse en cuenta que puede ser necesario tiempo para las pruebas de presión o las medidas de descontaminación y controles de calidad del agua.

Se debe limpiar la tubería principal, eliminar las obstrucciones que afectan la sección transversal y verificar el paso libre mediante inspección CCTV

y calibración. Puede ser posible la instalación a través de curvas, teniendo en cuenta factores como el diseño de la tubería, las condiciones locales y el procedimiento que se esté utilizando.

La renovación de válvulas, cambios de dimensión, conexiones domiciliarias, tés y codos debe realizarse mediante el método a cielo abierto. Una vez que se completa la rehabilitación, las secciones se unen y las uniones se reparan con accesorios y dispositivos especiales (por ejemplo, manguitos de refuerzo, expansores, adaptadores, enchufes de revestimiento o enchufes soldados estándar, bridas de conexión y conexiones de bridas sueltas) y la tubería se vuelve a poner en servicio después prueba de presión, purga y desinfección.

Las acometidas domiciliarias se pueden volver a conectar posteriormente.

Tabla 7.4. Ventajas e Inconvenientes del entubado Ajustado.

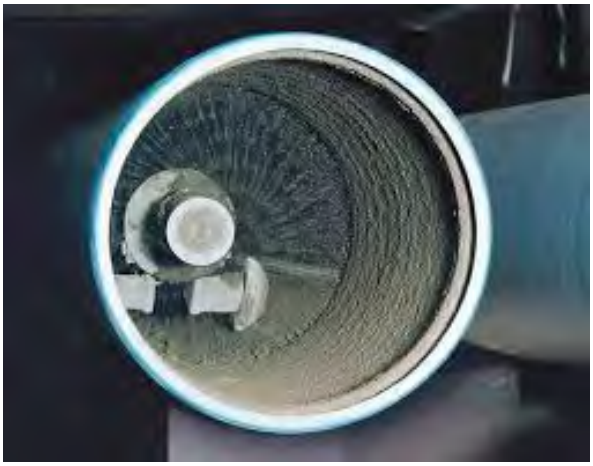
Ventajas	Inconvenientes
• Reducción mínima de sección y sin necesidad de relleno anular, en comparación con la técnica del entubado simple. El liner puede ser enrollado previamente para transporte a obra (diámetros pequeños) • La mejora del coeficiente de rugosidad interior puede llegar a mejorar las capacidades hidráulicas. • Posibilidad de rehabilitar largos tramos • El liner (tubo PE) puede ser diseñado para proporcionar integridad estructural completa o ser semi-estructural, dependiendo del estado del tubo existente. • Sin necesidad de disponer de un tubo seco y con un grado de limpieza/preparación muy alto. • Sin necesidad de relleno anular. Rápido y con mínima molestia.	• Ocupación relativamente importante, para acomodar equipo de soldadura a tope, almacenamiento y ubicación de tubos, etc., y necesidad de realización de pozos de inserción. • Deben tenerse en cuenta las obstrucciones, los elementos de tubos existentes deformados, todas las irregularidades de dimensión, las juntas desplazadas ya que pueden impedir el proceso operativo de instalación • Por tanto, el tubo de acogida necesita reconocimiento, limpieza y preparación • El tubo fabricado para la inserción (liner) puede necesitar la fabricación de moldes especiales por no ser de dimensión estándar. • No pasan curvas con radio pequeño. • Necesidad de excavación en las acometidas, Tés, válvulas, etc.

7.4. Proyección de cemento (cement mortar lining)

El documento de referencia que describe este sistema de rehabilitación es el estándar W 343 de DVGW. La rehabilitación de las tuberías de agua potable con un revestimiento de mortero de cemento presupone que la tubería siga teniendo estabilidad frente a las cargas estáticas y dinámicas internas y externas, por lo que la tubería rehabilitada puede esperar tener una vida útil satisfactoria.

El revestimiento de mortero de cemento forma una capa protectora interna que previene la corrosión y evita la acumulación de incrustaciones que tienen un efecto negativo sobre las características hidráulicas.

Por razones técnicas, solo las tuberías con un mismo diámetro a lo largo de una sección pueden limpiarse y luego recubrirse.



Antes del inicio de los trabajos de rehabilitación es necesario dejar fuera de servicio la línea en su totalidad mediante tuberías provisionales o suministro alternativo.

Es necesario realizar dos excavaciones en cada extremo del tramo de actuación (distancia habitual hasta 200 metros) para las operaciones de limpieza y revestimiento. Estas excavaciones se sitúan en lugares elegidos con el fin de afectar lo mínimo al tráfico peatonal y rodado.

Tras las labores de excavación, se procede a los trabajos de limpieza y revestimiento.

Procedimientos de limpieza

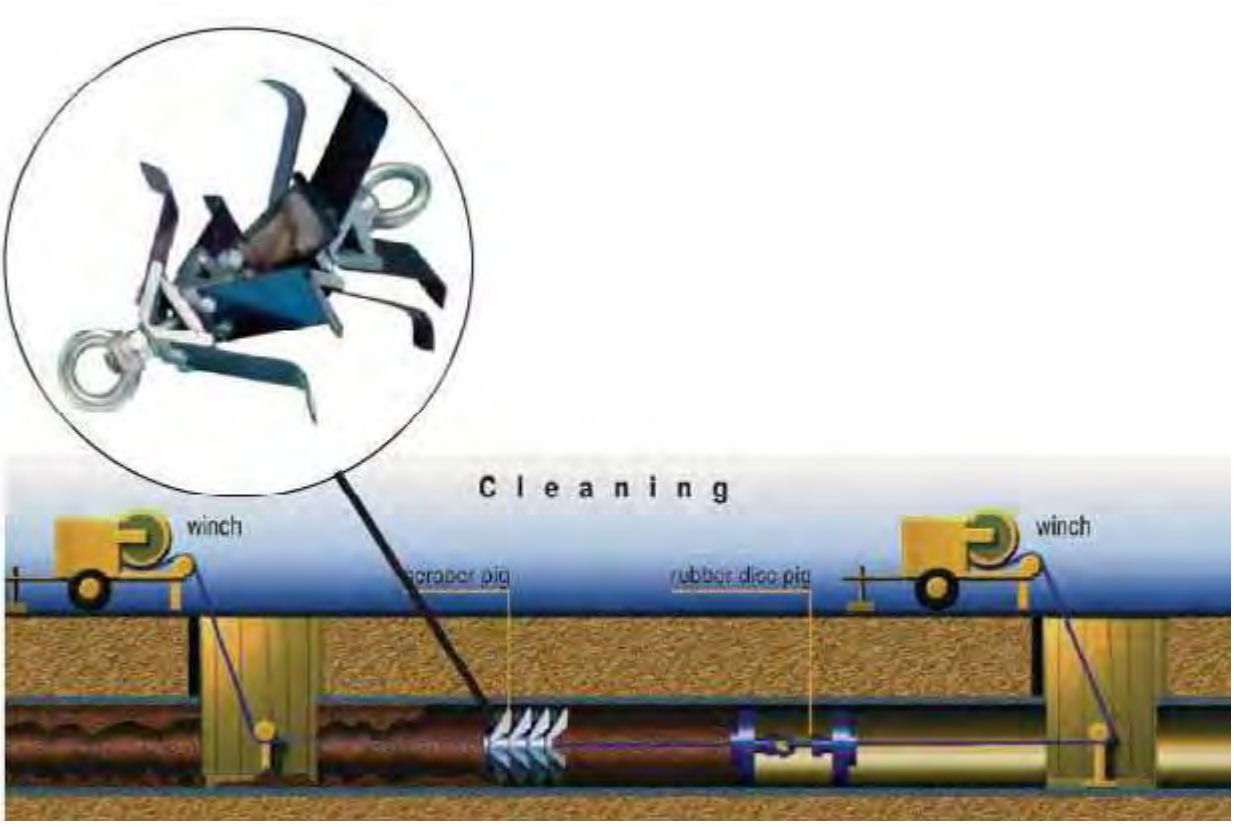
General

Los procedimientos de limpieza deben elegirse para que, por un lado, el mortero de cemento se adhiera satisfactoriamente y, por otro lado, para que la tubería no sufra daños.

Deben eliminarse las incrustaciones y los productos de corrosión. Para tuberías con revestimiento bituminoso, se deben eliminar los elementos sueltos, sin exponer la superficie del metal. La elección de los procedimientos de limpieza depende, entre otras cosas, de la composición química de las incrustaciones, la presencia de un revestimiento (bituminoso), el diámetro nominal y las posibles deformaciones de la tubería (curvas, etc.).

Limpieza mecánica

La limpieza de anchos nominales de 80 mm a 1200 mm se puede realizar con raspadores, cepillos y discos de goma. Estos equipos se tiran a través de la tubería mediante cabrestante y cable de acero, de modo que los rascadores de acero puedan extraer las incrustaciones, los productos de corrosión y el revestimiento suelto. El paso de disco de goma a su vez completa la limpieza. Este proceso se repite varias veces hasta que la tubería alcanza un nivel satisfactorio de limpieza.



Limpieza manual

Cuando una tubería es visitable y la limpieza mecánica no es posible, secciones cortas de tubería, accesorios y curvas, se pueden limpiar manualmente.

Limpieza hidráulica con swabs/pigs

La limpieza hidráulica se puede utilizar para tuberías largas con diámetro constante. Los pigs se pueden usar a lo largo de varios kilómetros, que son desplazados/empujados por la propia presión del agua. Debido a la gran cantidad de agua involucrada en el caso de tuberías de gran diámetro este procedimiento se utiliza principalmente para diámetros más pequeños.

Una condición previa para la limpieza hidráulica es que la tubería debe haber sido diseñada "*piggable*".

Limpieza con chorro de agua a alta presión

El chorro de agua a alta presión hasta 150 bar se utiliza solo en tuberías con incrustaciones y productos de corrosión que se desprenden fácilmente, o bien para la limpieza posterior.

Limpieza con chorro de agua a ultra alta presión

Las tuberías de suministro de agua potable se limpian cada vez más con chorros de ultra alta presión. Se puede utilizar entre diámetros nominales de 80 mm a 3000 mm e incluso más anchos si es necesario. Las áreas de incrustaciones, corrosión y revestimiento que son difíciles de desprender se suelen aflojar con una presión de agua de hasta 1000 bar.

Técnicas de revestimiento de mortero de cemento

La rehabilitación de tuberías por técnica de proyección se puede utilizar para todos los diámetros habituales de tubería de suministro de agua desde DN 80 a DN 3000.

Con este procedimiento, el mortero de cemento se proyecta sobre la pared interior de la tubería mediante un cabezal que gira a alta velocidad. La superficie se puede alisar con una llana giratoria o con un cono de alisado.



Una vez que la tubería se ha vuelto a poner en servicio, la capa de mortero se combina con el material ferroso en la pared de la tubería. El efecto barrera del mortero de cemento proporciona una protección pasiva contra la corrosión de la pared de la tubería. **La alcalinidad del mortero dificulta la corrosión, proporcionando una protección activa.**

Se suele prescindir del alisado del revestimiento, ya que por un lado los laterales que sobresalen, los desvíos angulares y las curvas pueden dañar el cono de alisado y, por otro lado, el alisado será más difícil si la tubería es demasiado ovalizada.

Espesor del revestimiento y resistencia del mortero

El espesor requerido del revestimiento de mortero cuando se aplica un revestimiento mecánico debe calcularse según la hoja de trabajo DVGW W 343. Hay varias razones, por ejemplo, la geometría de la tubería, porque las tuberías pueden recibir una capa significativamente más gruesa, incluso el doble de espesor. El mortero se compone de cemento, arena de cuarzo y agua potable.

La mezcla de mortero prescrita es una proporción 1:1 por peso de cemento y arena de cuarzo.

Cuando se prueba según DVGW W 343, el mortero debe tener una resistencia a la compresión de 50 N / mm^2 después de 28 días y una resistencia a la tracción a la flexión de 5 N / mm^2. Estos valores sirven indirectamente como criterios de calidad.

Tratamiento de seguimiento de revestimiento de mortero de cemento

Después del recubrimiento, los extremos de la tubería deben cerrarse para evitar que el recubrimiento se seque y evitar la formación posterior de grietas. Después de la aplicación del recubrimiento, se debe tener cuidado para asegurar que haya suficiente humedad disponible y una temperatura mínima de 5ºC para que el mortero fresco se cure correctamente.

Puesta en servicio de las tuberías revestidas con mortero de cemento

Enjuagar la tubería

Una vez que se ha llenado la tubería, el valor de pH aumenta a 12,5. Se debe vigilar un aumento en el valor de pH cuando hay una caída en la velocidad de flujo del agua y, por tanto, un tiempo de retención más prolongado. También debe tenerse en cuenta que el valor de pH aumenta más rápidamente con una disminución en la relación entre el volumen de la tubería y el área de la superficie interna (en diámetros nominales pequeños). Este aumento, que también ocurre durante las pruebas de presión, normalmente se puede reducir lavando la tubería. Una vez que el pH cumple con el valor límite establecido en las regulaciones de agua potable, la tubería puede volver a ponerse en servicio.

Prueba de presión

Se debe realizar una prueba de presión como mínimo 7 días después del recubrimiento y consiste en saturar el mortero con agua. La prueba de presión debe realizarse siguiendo la hoja de trabajo DVGW W 343, a una presión superior a la presión de funcionamiento normal de la tubería. Luego, la prueba se lleva a cabo siguiendo la hoja de trabajo DVGW W 400-2. Esta prueba solo es apropiada para secciones de tubería sin acometidas. Debe asegurarse de que la tubería sin recubrimiento (es decir, antes del recubrimiento) pueda soportar la presión requerida.

7.5. Rehabilitación continua estructural con tubería flexible reforzada (Kevlar)

La rehabilitación continua estructural con tubería flexible reforzada se usa para restaurar la eficiencia funcional de una tubería existente. Requieren una preparación básica en forma de inspección y limpieza de la tubería existente. La rehabilitación suele producir una mejora de la rugosidad (valor *K*). Se deben observar las pautas de instalación del fabricante y las técnicas adecuadas deben ser utilizadas por personal especializado, calificado y capacitado.

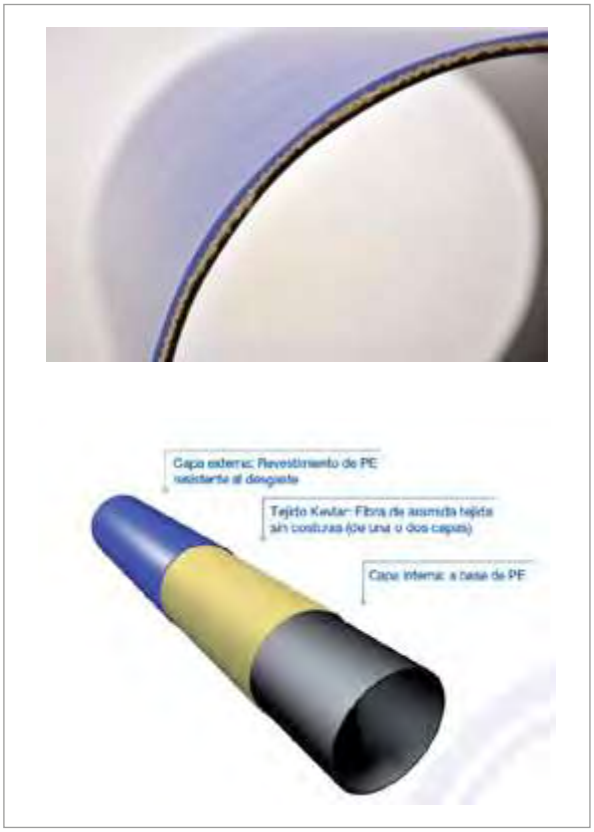


Figura 7.21. Sistema PRIMUSLINE. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE – SINZATEC – RADLINGER.



Figura 7.22. Sistema PRIMUSLINE. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE – SINZATEC – RADLINGER.

La rehabilitación continua estructural con tubería flexible reforzada normalmente consiste en un revestimiento exterior de PE, un núcleo de tejido reforzado con fibra (por ejemplo, Kevlar) y un revestimiento interior de PE o poliuretano termoplástico (TPU). Dependiendo de la clasificación de presión deseada para la tubería que se está rehabilitando, estas tuberías continuas no adheridos se fabrican con un espesor de pared de 6 mm a 8 mm (núcleo de tela de 2 mm a 4 mm).

Se recurre habitualmente a este sistema para solucionar daños de estas características: tipo: corrosión interna (por ejemplo, Picaduras), juntas con fugas, poros localizados, grietas longitudinales y transversales y desplazamientos.

La nueva tubería, sin estar adherida a la pared de la tubería existente, puede absorber completamente la presión operativa interna y es independiente de la tubería principal. La tubería original rehabilitada solo tiene que soportar la carga estática externa. Estos sistemas son, por tanto, rehabilitaciones de tuberías presurizados que cumplen con la definición 3.1.8 de la norma EN ISO 11295. Según la Tabla 17 nota 1.

Hay sistemas disponibles para la rehabilitación de tuberías de agua, gas y petróleo presurizadas desde DN 150 a DN 500.

Dadas las pruebas realizadas y la certificación del producto, se ha demostrado que los sistemas de rehabilitación con tubería continua flexible reforzada tienen una vida útil de al menos 50 años y que soportan presiones operativas de hasta 82 bar de acuerdo con la especificación de prueba DVGW VP 643. El procedimiento es apropiado para todo tipo de tubería (acero, hierro fundido, fibrocemento y plástico).

La tubería continua flexible estructural se elabora en fábrica. La instalación se realiza in-situ, siguiendo las pautas del fabricante.

Preparación

Inspección de la tubería existente

Idoneidad para la rehabilitación en lo que respecta, por ejemplo, El estado de la tubería y el recorrido de la tubería, así como las posibles medidas para eliminar las obstrucciones, deben establecerse mediante una inspección inicial (generalmente mediante CCTV).

Se debe establecer y registrar lo siguiente:

- Longitud de la tubería.
- Diámetro interior.
- Incrustaciones, depósitos y contaminación.

- Obstrucciones que afectan a la sección transversal (por ejemplo, soldaduras de unión, tornillos, acometidas, ánodos de sacrificio, etc.).
- Juntas defectuosas.
- Deformaciones, predeformaciones, cambios en la sección transversal.
- Cambios de dirección (curvas).
- Tés, conexiones.
- Accesorios y válvulas.

Limpieza

El objetivo de la limpieza de la tubería es asegurar que el diámetro interior de la tubería a rehabilitar esté libre de obstrucciones, eliminando incrustaciones o depósitos dañinos. En la mayoría de los casos, el uso de raspadores de acero y discos de goma resulta eficaz. Las obstrucciones fijas que sobresalen del diámetro interno de la tubería se pueden eliminar realizando cala de acceso y cambiando el elemento de tubería con la obstrucción, o mediante el uso de un robot de fresado. Se deben trabajar las soldaduras hasta que la circunferencia interior sea uniforme y lisa.

Instalación

Dependiendo del proyecto, la nueva tubería flexible reforzada se instala en longitudes de hasta varios cientos de metros, se pliega (en general en forma de U) y enrolla en tambores que se entrega directamente en obra.

La instalación es rápida y ágil, realizándose por tracción con un cabrestante en la tubería previamente limpiada y se ajusta sin apretar a la tubería dejando un espacio anular.

Se conecta a la red mediante conectores (acero o hierro fundido) en los que se inserta la nueva tubería.

El sistema permite tomar curvas de hasta 45º.

Control de estanqueidad, inspección final y reconexión

Se pueden probar para verificar la estanqueidad, como las tuberías recién instaladas, de acuerdo con las reglas reconocidas para esta técnica. La prueba de presión debe basarse en la presión operativa normal de la tubería.

Operación y mantenimiento

La nueva tubería continua flexible no está adherida a la pared de la tubería, por tanto, se deben tener en cuenta los siguientes puntos relacionados con la operación y el mantenimiento:

No es posible realizar una perforación sobre esta nueva tubería.

Las piezas en T se pueden integrar retroactivamente en la sección rehabilitada colocando nuevos conectores.

Solo se puede limpiar, cuando sea necesario, con un *pig* o *swab* de esponja.

8 Normativa de aplicación

- ASME PCC2 Repair of Pressure Equipment and Piping.
- ASTM C876 “Standard Test Method for corrosion potentials of Uncoated reinforcing steel in concrete”.
- ASTM F1216-09: Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube.
- ASTM F1743: Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by Pulled-in-Place Installation of Cured-in-Place Thermosetting Resin Pipe (CIPP)
- AWWA C217-09 Petrolatum and petroleum wax tape coatings for the exterior of connections and fittings for Steel wáter pipelines.
- AWWA C304-14 (R19) Desing of prestressed concrete cylinder pipe.
- AWWA C305-2018: CFRP Renewal and Strengthening of Prestressed Concrete Cylinder Pipe.
- AWWA M28 Rehabilitation of wáter mains, third edition.
- AWWA M77 Condition assessment of wáter mains.
- DIN 2880:1999-01 Application of cement mortar linings for cast iron pipes, steel pipes and fittings.
- DIN 8074:2011-12 Polyethylene (PE) - Pipes PE 80, PE 100 - Dimensions; Text in German and English.
- DIN 8075:2018-08 Polyethylene (PE) pipes - PE 80, PE 100 - General quality requirements, testing; Text in German and English.
- DIN EN 10224:2005-12 Non-alloy steel tubes and fittings for the conveyance of water and other aqueous liquids - Technical delivery conditions; German version EN 10224:2002 + A1:2005.
- DIN EN 10298:2005-12 Steel tubes and fittings for onshore and offshore pipelines - Internal lining with cement mortar; German version EN 10298:2005.
- DIN EN 12068:1999-03 Cathodic protection - External organic coatings for the corrosion protection of buried or immersed steel pipelines used in conjunction with cathodic protection - Tapes

and shrinkable materials; German version EN 12068:1998.

- DIN EN 15542:2008-06 Ductile iron pipes, fittings and accessories - External cement mortar coating for pipes - Requirements and test methods; German version EN 15542:2008.
- DIN 30670:2012-04 Polyethylene coatings of steel pipes and fittings - Requirements and testing.
- DIN 30672:2019-05 Field coating materials for corrosion protection of buried pipelines.
  - DIN 30672-1:2019-05 Part 1: Requirements and product testings.
  - DIN 30672-2:2019-05 Part 2: Application and quality control on site.
- DIN 30674-3:2001-03 Sheathing ductile cast iron pipes - Part 3: Zinc coating with protective sheathing.
- DIN 30678:2013-09 Polypropylene coatings on steel pipes and fittings - Requirements and testing.
- DVGW W 343:2005-04 "Sanierung von erdverlegten Guss- und Stahlrohrleitungen durch Zementmörtelauskleidung – Einsatzbereiche, Anforderungen und Prüfungen"
- DVGW W 346:2000-08 "Guss- und Stahlrohrleitungsteile mit ZM-Auskleidung - Handhabung".
- DVGW VP 643:2004-06 "Flexible fabric reinforced plastic in-liners and associated connectors for gas lines operating at pressures above 16 bar"
- EN ISO 11298-4:2021 Plastics piping systems for renovation of underground water supply networks — Part 4: Lining with cured-in-place pipes.
- ISO 21857:2021 "Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Prevention of corrosion on pipeline systems influenced by stray currents"
- ISO 24817:2017 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Composite repairs for pipework — Qualification and design, installation, testing and inspection.
- UNE-EN 196-1:2018 Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias.
- UNE-EN 545:2011 Tubos, racores y accesorios de fundición dúctil y sus uniones para canalizaciones de agua. Requisitos y métodos de ensayo.
- UNE-EN 805:2000: Abastecimiento de agua. Especificaciones para redes exteriores a los edificios y sus componentes.
- UNE-EN 1504 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y EVCP.
  - UNE-EN 1504-1:2005 Parte 1: Definiciones.
  - UNE-EN 1504-2:2005 Parte 2: Sistemas de protección superficial para el hormigón.
  - UNE-EN 1504-3:2006 Parte 3: Reparación estructural y no estructural.
  - UNE-EN 1504-4:2005 Parte 4: Adhesión estructural.
  - UNE-EN 1504-5:2014 Parte 5: Productos y siste4mas para inyección del hormigón.
  - UNE-EN 1504-6:2007 Parte 6: Anclaje de armaduras de acero.
  - UNE-EN 1504-7:2007 Parte 7: Protección contra la corrosión de armaduras.
  - UNE-EN 1504-8:2020 Parte 8: Control de calidad y evaluación y verificación de la constancia de prestaciones (EVCP)
  - UNE-EN 1504-9:2011 Parte 9: Principios generales para el uso de productos y sistemas.
  - UNE-EN 1504-10:2019 Parte 10: Aplicación "in situ" de los productos y sistemas y control de calidad de los trabajos.
- UNE-EN 1796:2014 Sistemas de canalización en materiales plásticos para suministro de agua con o sin presión. Plásticos termoestables reforzados con fibra de vidrio (PRFV) basados en

resina de poliéster insaturada (UP). UNE-EN 10224:2003 Tubos y accesorios en acero no aleado para el transporte de líquidos acuosos, incluido agua para consumo humano. Condiciones técnicas de suministro.

- UNE-EN 10224:2003/A1:2006 Tubos y accesorios de acero no aleado para la conducción de agua y otros líquidos acuosos. Condiciones técnicas de suministro.
- UNE-EN 10298:2007 Tubos y accesorios de acero para canalizaciones enterradas y sumergidas. Revestimiento interno de mortero de cemento.
- UNE-EN 12068:1999 Protección catódica. Recubrimientos orgánicos exteriores para la protección contra la corrosión de tubos de aceros enterrados o sumergidos, empleados en conjunción con la protección catódica. Cintas y materiales retráctiles.
- UNE-EN 12201:2012 Sistemas de canalización en materiales plásticos para conducción de agua y saneamiento con presión.
  - UNE-EN 12201-1:2012 Parte 1: Generalidades.
  - UNE-EN 12201-2:2012+A1:2020 Parte 2: Tubos.
- UNE-EN 12954:2020 Principios generales de la protección catódica de estructuras metálicas enterradas o sumergidas.
- UNE-EN 14364:2015 Sistemas de canalización en materiales plásticos para evacuación y saneamiento con o sin presión. Plásticos termoendurecibles reforzados con vidrio (PRFV) a base de resina de poliéster insaturado (UP). Especificaciones para tuberías, accesorios y uniones.
- UNE-EN 14505:2006 "Protección catódica de estructuras complejas"
- UNE-EN 14628-1:2021 Tuberías, racores y accesorios de fundición dúctil. Requisitos y métodos de ensayo. Parte 1: Recubrimiento de polietileno (PE).
- UNE-EN 15885:2019 Clasificación y características de las técnicas de renovación, reparación y sustitución de desagües y alcantarillados.
- UNE-EN 50162:2005 "Protección contra la corrosión provocada por corrientes vagabundas provenientes de sistemas en corriente continua".
- UNE-EN ISO 11295: Clasificación e información sobre el diseño de sistemas de canalización en materiales plásticos utilizados en la renovación y reemplazo.
- UNE-EN ISO 11297: Sistemas de canalización en materiales plásticos para renovación de redes de saneamiento y alcantarillado con presión.
  - UNE-EN ISO 11297-1:2018: Generalidades.
  - UNE-EN ISO 11297-2:2018 Entubado en continuo.
  - UNE-EN ISO 11297-3:2019 Entubado ajustado.
  - UNE-EN ISO 11297-4:2018 Entubado en continuo con tubo curado en obra.
- UNE-EN ISO 11298: Sistemas de canalización en materiales plásticos para la renovación de redes de conducción de agua enterradas.
  - UNE-EN ISO 11298-1:2018 General.
  - UNE-EN ISO 11298-2:2018 Entubado en continuo.
  - UNE-EN ISO 11298-3:2019 Entubado ajustado.
- UNE-EN ISO 12162:2010 Materiales termoplásticos para tubos y accesorios para aplicaciones a presión. Clasificación, coeficiente de diseño y designación.
- UNE-EN ISO 12696:2017 "Protección catódica del acero en el hormigón".
- UNE-EN ISO 15589-1:2018 "Industrias del petróleo, petroquímicas y del gas natural. Protección catódica de sistemas de transporte por tuberías. Parte 1: Canalizaciones terrestres.

- UNE-EN ISO 21225: Sistemas de canalización en materiales plásticos para la sustitución sin zanja de redes de canalizaciones enterradas.
  - UNE-EN ISO 21225:2018-1: Sustitución en la canalización mediante rotura y extracción del tubo.
  - UNE-EN ISO 21225:2018-2: Sustitución fuera de la canalización por perforación horizontal dirigida y perforación percusiva por impacto.
- UNE-EN ISO 8044:2020 Corrosión de metales y aleaciones. Vocabulario.
- UNE-EN ISO 9080:2013 Sistemas de canalización y conducción en materiales plásticos. Determinación de la resistencia hidrostática a largo plazo de materiales termoplásticos en forma de tuberías mediante extrapolación.

9 Tuberías de acero

9.1. Introducción

Existe una clara tendencia a una mayor utilización del acero en las tuberías de grandes diámetros.

9.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación

Es fundamental proteger contra la corrosión exterior, de modo preventivo, las grandes tuberías de acero para disminuir los riesgos de precisar las caras y complicadas operaciones de rehabilitación, reparación o sustitución.

9.2.1. Corrosión y protección catódica externa de tuberías enterradas de acero

Cuando se decide instalar un sistema de protección catódica para detener la corrosión externa de una tubería de acero enterrada existente, soldada longitudinalmente, debemos distinguir entre dos casos muy diferentes en función de si la tubería dispone de juntas dieléctricas que la aíslan eléctricamente de otras estructuras metálicas enterradas o no.

Esta protección puede ser tanto por ánodos de sacrificio o por corriente impresa, aunque en el caso de grandes tuberías suelen ser preferibles los sistemas de corriente impresa por adaptarse mejor a las condiciones tanto de la tubería como del terreno.

En cualquier caso, es importante destacar que todos los sistemas de protección catódica precisan de un mantenimiento adecuado realizado por personal especializado

Tuberías aisladas eléctricamente de otras estructuras

El que la tubería de acero enterrada disponga en sus extremos de juntas dieléctricas que la aíslan de otras estructuras metálicas enterradas suele darse tan sólo si en el proyecto inicial se han previsto ya dichas juntas, normalmente pensando en la instalación de un sistema de protección catódica.

Otra posibilidad es la de instalar dichas juntas dieléctricas en una tubería enterrada de acero existente, lo que suele ser una operación relativamente costosa y complicada.

La protección catódica de una tubería de acero aislada de otras estructuras metálicas enterradas

tiene la gran ventaja de que toda la corriente de protección del sistema se dirige de los ánodos del sistema de protección a los fallos del revestimiento de la tubería y no a otras estructuras, con lo que en general se precisan intensidades moderadas y el sistema es relativamente sencillo, eficaz y económico.

Según el diámetro y longitud de la tubería existente a proteger catódicamente puede ser interesante realizar un ensayo de inyección de corriente para conocer las necesidades de intensidad y poder dimensionar mejor el sistema.

En el caso de la protección catódica externa de una tubería enterrada de acero por la que circula agua, equipada con juntas dieléctricas, existe el riesgo de que parte de la corriente de la protección catódica pueda cortocircuitar la junta dieléctrica por dentro a través del agua. Esto puede provocar corrosión interior en el lado de la junta por el que sale corriente del tubo al agua y deben tomarse las precauciones necesarias para evitarlo. Habitualmente se recomienda que una determinada longitud del tubo disponga de un buen revestimiento interno en el lado de la junta por el que entraría la corriente del agua al tubo, para aumentar así la resistencia eléctrica de la vena líquida que debe recorrer la corriente.

Los detalles para este tipo de sistemas de protección catódica para tuberías enterradas aisladas de otras estructuras metálicas se definen en la norma UNE-EN ISO 15589-1:2018 “Industrias del petróleo, petroquímicas y del gas natural. Protección catódica de sistemas de transporte por tuberías. Parte 1: Canalizaciones terrestres.

Tuberías unidas eléctricamente a otras estructuras

Lo más habitual en la protección catódica de las grandes tuberías existentes enterradas de acero que transportan agua es que no existan juntas dieléctricas y sea muy complicado y costoso el instalarlas.

Nos encontramos frente al diseño e instalación de un sistema de protección catódica que denominamos de “estructuras complejas” y que debe acometerse de acuerdo con la norma UNE-EN 14505:2006 “Protección catódica de estructuras complejas”

Al estar la tubería a proteger catódicamente unida eléctricamente a otras estructuras metálicas enterradas, como sistemas de puesta a tierra de cobre o armaduras de hormigón armado, el riesgo de corrosión de esta suele ser muy superior al de las tuberías aisladas de otras estructuras, a causa de las importantes pilas galvánicas existentes. En efecto se produce una importante salida de corriente anódica desde el acero de la tubería en contacto con el suelo, en los fallos del revestimiento, hacia las importantes zonas catódicas que forman las tomas de tierra de cobre o las armaduras del hormigón armado enterrado.

Por otra parte, tras instalar la protección catódica, la corriente que salga de los ánodos del sistema de protección tendrá más dificultades en alcanzar los fallos del revestimiento de la tubería de acero que queremos proteger, pues una gran parte de esta se dirigirá preferentemente a las tomas de tierra y resto de estructuras enterradas, que probablemente presentan una menor resistencia a tierra que la tubería de acero.

En la protección catódica de estructuras complejas se admiten otros criterios de protección catódica distintos a los del caso de las tuberías aisladas de otras estructuras, las necesidades de corriente de protección son siempre más elevadas y es recomendable actuar en dos fases, instalando primero un sistema inicial que permita un ensayo importante de inyección de corriente y poder así acabar de definir mejor el sistema final.

Debido a las importantes necesidades de corriente, los sistemas de ánodos de sacrificio normalmente no pueden utilizarse en la protección catódica de estructuras complejas, debiendo recurrirse a la corriente impresa.

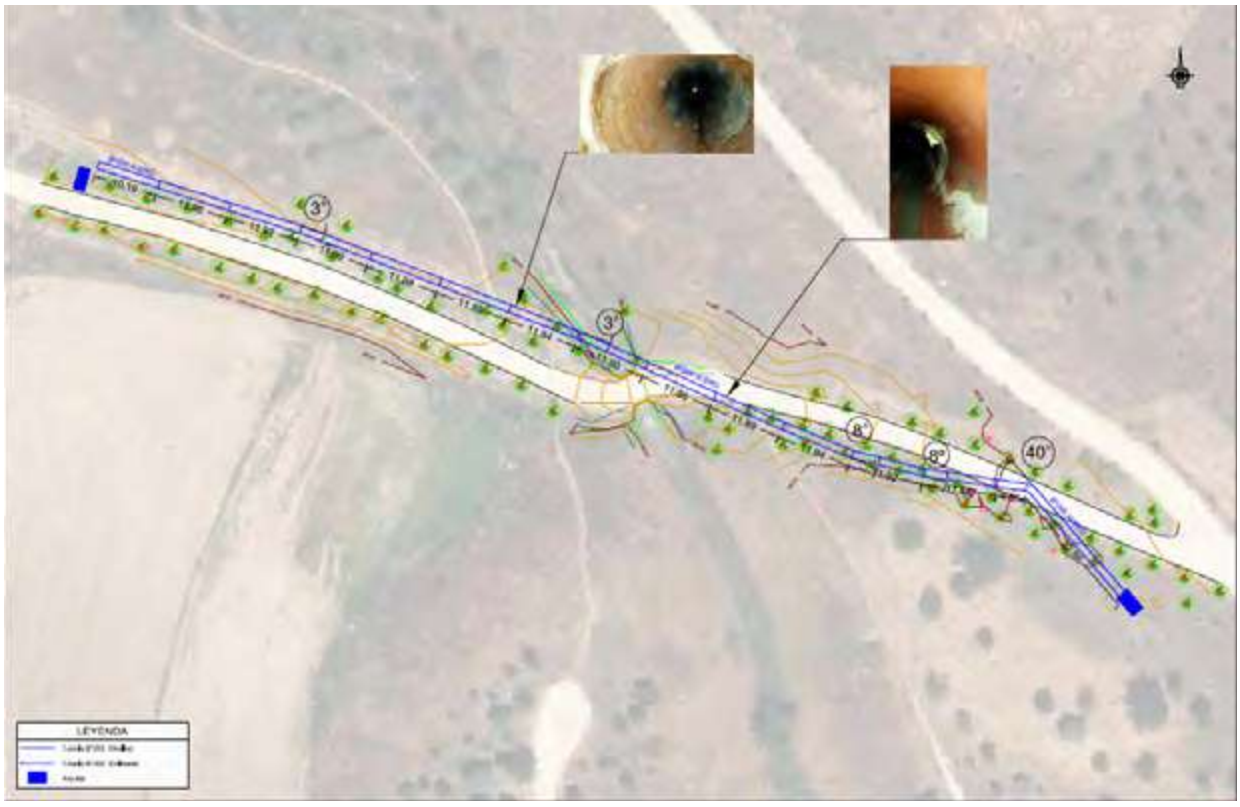
9.3. Experiencias

9.3.1. Experiencia N.º 1 – Rehabilitación con manga continua

En este punto se abordará la rehabilitación llevada a cabo por Canal de Isabel II en junio del año 2020 en la denominada Arteria de Alta Presión de Fuenlabrada, canalización de acero helicosoldado DN 1.250 mm.

El tramo de 160 m se localiza en el municipio de Fuenlabrada, concretamente en uno de los viales interiores del parque de Bosquesur en su cruce con el arroyo Culebro. Se trata de una conducción de grandes dimensiones de DN 1250 mm y PN10, a la que se le realiza una rehabilitación con manga continua semi-estructural.

El tramo de tubería, ubicado en un entorno terrizo, se delimita entre un codo de 40° localizado en dirección sureste y una arqueta en dirección noroeste. Atraviesa soterrado el arroyo Culebro en paralelo a uno de los viales interiores del parque. Tras cruzar el arroyo por su margen derecha, la traza de la tubería se posiciona sobre el vial, con ligeros cambios de dirección que hacen que la arteria atraviese el mismo en dos ocasiones. Finalmente, la traza se desvía mediante un codo de 40°. El resto de los giros citados los conforman dos suaves desviaciones de 3° y dos de 8°.



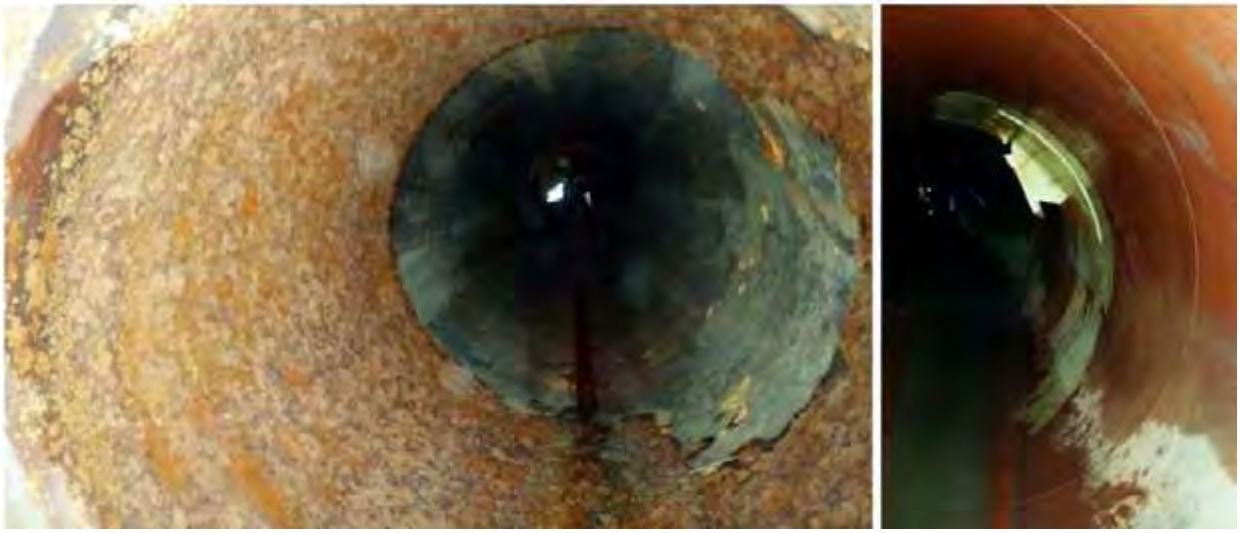
En cuanto al perfil de la tubería, encontramos el punto bajo en la arqueta; la pendiente se mantiene prácticamente nula hasta el arroyo y comienza a ascender de forma lineal hacia el codo.

Por su parte, el tubo está conformado por acero al carbono helicoidal con espesor de 12 mm revestido con pintura antioxidante. También se descubre, una vez se comienza con los trabajos de excavación, que la conducción de acero posee un recubrimiento exterior de hormigón en masa sin encofrar.

La problemática que genera el estudio del tramo es la aparición de algunas subsidencias en la su-

perficie del vial que apuntan a socavación del material por pérdidas de agua de la tubería. Estas subsidencias se producen de manera habitual a pesar de ser reparadas. Por ello, dada la perseverancia del problema y la importancia de la arteria, se propone un estudio detallado para abordar una posible renovación del tubo.

Se procede, por tanto, a realizar una inspección interior visitable, localizando algunas reparaciones interiores que, aunque se han protegido con pintura antioxidante, presentan pequeñas áreas con corrosión. También se localiza un tramo, de 1,5 m de longitud, que coincide con el cruce del arroyo, en donde la corrosión es mucho más evidente y se aprecia de manera homogénea en toda la superficie. Se concluye que ambas patologías pueden estar siendo las causantes de las fugas de agua y se procede al estudio de la solución del problema.

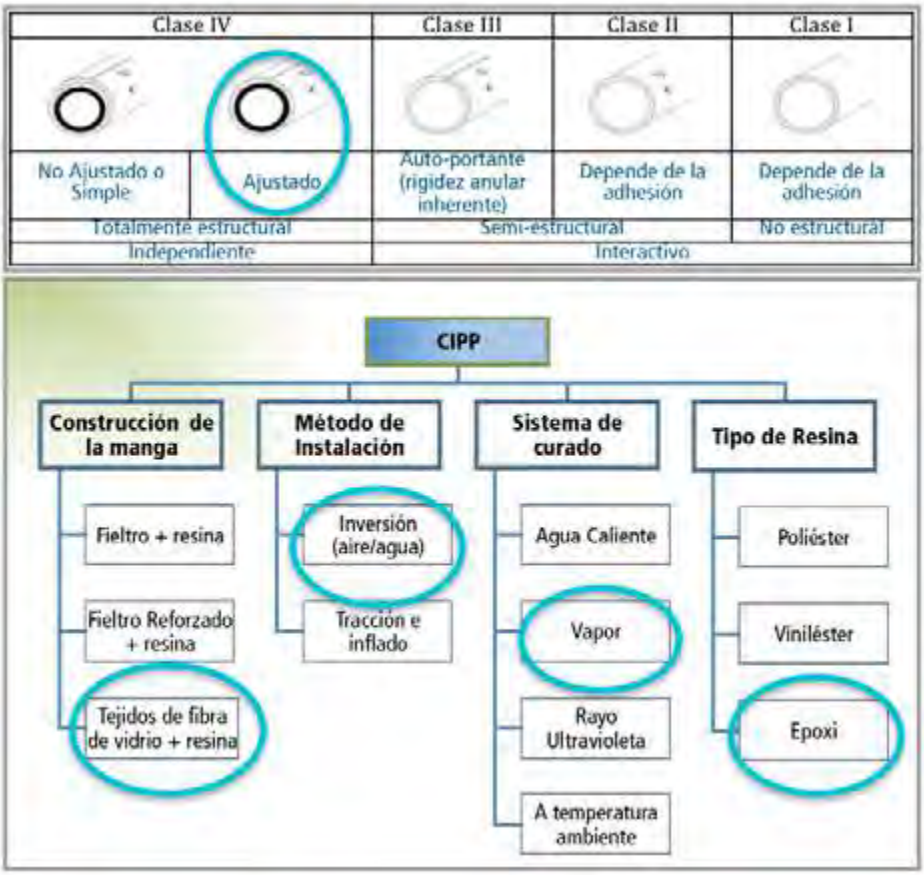


Solución propuesta:

Estudiadas las incidencias dentro del tubo, se procede a analizar la viabilidad de una rehabilitación interior de la tubería que requiera de las menores afecciones posibles a un entorno tan particular como es el cruce del arroyo y que soporte las solicitaciones de la tubería actual manteniendo su diámetro interior. Se decide finalmente realizar la rehabilitación con manga continua semi-estructural.

La solución propuesta supone un desafío por dos motivos. Por un lado, requería de unos materiales muy específicos que garantizaran la resistencia suficiente a las exigentes cargas de la conducción y que contaran, a su vez, con las aprobaciones de potabilidad. Por otra parte, las dimensiones del tramo imponían unas magnitudes de manga muy significativas, para las que se necesitaba del desarrollo de técnicas específicas y de medios materiales suficientes que posibilitaran la ejecución de la intervención con las garantías exigidas.

La primera parte se centró en definir la manga y la resina, que constó de un conjunto de manga de fieltro de poliéster y capas de fibra de vidrio orientadas con revestimiento de polipropileno y una resina de formulación epoxídica, con gran resistencia y alta flexibilidad necesarias para soportar las cargas dinámicas que se producen en las redes de abastecimiento. Como se cita anteriormente, el conjunto consta de la aprobación de KIWA, del DVGW y del RD140/2003 para estar en contacto con agua destinada al consumo humano. Este conjunto, de resistencias contrastadas tanto por el instalador (LICUAS) como por el fabricante, se utilizó para la realización del cálculo del espesor.



El dimensionamiento de dicho cálculo se basó en la normativa americana ASTM F-121609, ya que a día de hoy es la única normativa que permite el cálculo de redes en presión. Las condiciones asumidas para el cálculo fueron las siguientes:

- Estado de la tubería: Parcialmente deteriorada
- Diámetro interior: 1200mm
- Ovalidad: 2%
- Profundidad: 3,0 m
- Nivel freático sobre clave: 1,0 m
- Sobrecarga: Tráfico pesado
- Máxima presión positiva: 10 bar
- Máximo vacío: –0,025 bar
- Orificio en pared de tubo: 50 mm
- Factor de seguridad: 2

Tras realiza los cálculos oportunos, el espesor resultante de manga fue de 15 mm.

Con el material, el espesor y las dimensiones de la manga definidas, se procedió a estudiar un método de implantación que permitiera la instalación de la manga, teniendo en cuenta el escaso tiempo de trabajabilidad del epoxi una vez mezclado e impregnado. Para ello se optó por separar la manga en dos partes que permitieran la inserción. Por un lado, se instalaría por arrastre una primera manga de espesor 9 mm. Una vez en su interior, se procedería, por el método de reversión con aire, a revertir una manga de 6 mm, formando así un espesor final de 15 mm. El sellado se realizaría mediante juntas de estanqueidad de EPDM fijadas mediante anillos de acero inoxidable apoyados sobre cabos extremos nuevos.

La elección de este método atiende, principalmente, a una razón logística. Se pretende dividir el peso total de la manga, haciendo posible su traslado sin emplear transportes especiales cuyo acceso a la zona de obra sería muy dificultoso. Por otro lado, permite emplear medios de instalación más livia-

nos, que no requieren de grandes montajes ni afecciones, algo que precisamente se quería evitar. A su vez, esta técnica hacía posible un curado mucho más eficiente ya que posibilitaba la reversión con aire y curado con vapor, más rápido y con un menor consumo de agua que el curado con agua caliente.

















9.3.2. Experiencia N.º 2 – Rehabilitación interior con fibra de carbono

ARTERIA ALCOBENDAS DN950 - CANAL DE ISABEL II. REPARACION CON POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO SEGÚN NORMA AWWA C305



Figura 9.1. Fuente: PIPELINE NFRASTRUCTURE.

Material: Acero con revestimiento interior cemento.

Diámetro: DN900-DN1000.

MOP: 12 bares.

Antecedentes: Tras múltiples roturas en zona de "Y" de bifurcación de la arteria, y tras varios intentos inoperantes de reparación por soldadura exterior de la tubería se procede a la aplicación interior, según reglas de estándar AWWA C305, de refuerzo de polímero reforzado con fibra de carbono (Figura 9.2).

"Y" Arteria Alcobendas. Las reparaciones convencionales por soldadura exterior no dan resultado y fallan con la puesta en servicio a presión de 12 bares de la red.

Material: Sistema CFRP TYFO SCH41-2X-S compuesto de tejido unidireccional de espesor nominal 2mm, densidad mínima de fibra 1424 g/m^2 y resina epoxi TYFO S libre de componentes orgánicos volátiles. El *composite* final tiene resistencia a tracción mínima de 986 MPa, módulo de tensión 95,8 MPa. El material responde explícitamente a todas las exigencias normativas en cuando a propiedades mecánicas, físicas, de durabilidad y de experiencia, así como en su proceso de instalación y los controles de calidad realizados (Tabla 9.1).

Diseño: el cálculo según AWWA C305 confirma la siguiente construcción a aplicar: 2 capas de *composite* Tyfo SCH41-2X en sentido circunferencial y 1x capa del mismo *composite* en sentido longitudinal.



Figura 9.2. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

Tabla 9.1. Características mecánicas de compuesto CFRP. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

Composite Gross Laminate Properties			
Property	ASTM Method	Typical Test Value	Design Value
Ultimate Tensile Strength in Primary Fiber Direction	D3039	143,000 psi (986 MPa) (11.4 kip/in. width)	121,000 psi (834 MPa) (9.6 kip/in. width)
Elongation at Break	D3039	1%	0.85%
Tensile Modulus	D3039	13.9 x 10^6 psi (95.8 GPa)	11.9 x 10^6 psi (82 GPa)
Flexural Strength	D790	17,900 psi (123.4 MPa)	15,200 psi (104.8 MPa)
Flexural Modulus	D790	452,000 psi (3.12 GPa)	384,200 psi (2.65 GPa)
Longitudinal Compressive Strength	D3410	50,000 psi (344.8 MPa)	42,500 psi (293 MPa)
Longitudinal Compressive Modulus	D3410	11.2 x 10^6 psi (77.2 GPa)	9.5 x 10^6 psi (65.5 GPa)
Flexural Failure Strain	D790	1.0%	0.85%
Longitudinal Coefficient of Thermal Expansion	D696	3.6 ppm./ºF	
Coefficient of Thermal Expansion	D696	20.3 ppm./ºF	
Nominal Laminate Thickness	D1777	0.08 in. (2.0 mm)	0.08 in. (2.0 mm)

Procedimiento de ejecución:

1. Preparación de superficie:
   - Eliminación del revestimiento de cemento interior por ser defectuoso en su gran parte: desconchamiento, defecto de adherencia, encapsulamiento de agua (creando corrosión por confinamiento agresiva del acero)
   - Granallado hasta condición de superficie SA2,5 según ISO 8501
2. Control de condiciones por ventilación forzada y calefactores.
3. Aplicación de capa inicial de *composite* de vidrio Tyfo SEH51 – S. Esta fase previa es imprescindible en caso de aplicación de refuerzo de *composite* de carbono sobre superficie metálica ya que permite crear barrera dieléctrica entre acero existente y carbono aplicado, evitando desarrollo de corrosión galvánica (Figura 9.4).



Corrosión del acero



Vista general de demolición de revestimiento

Figura 9.3. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.



Figura 9.4. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

4. Aplicación de refuerzo CFRP Tyfo SCH41-2X según diseño y método de aplicación normativos: aplicación por método húmedo con saturación de fibra mecanizado, instalación y control de ejecución manual capa por capa (Figura 9.5).

Control de calidad:

Se realiza control continuo capa por capa de la aplicación por verificación de alineamiento de tejido de fibra instalado y por inspección de huecos o delaminaciones. Se realizan muestras de materia-



Figura 9.5. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

les diariamente y se procede a ensayo de tracción unidireccional en laboratorio independiente confirmando la validez del material instalado y los valores declarados para el diseño.

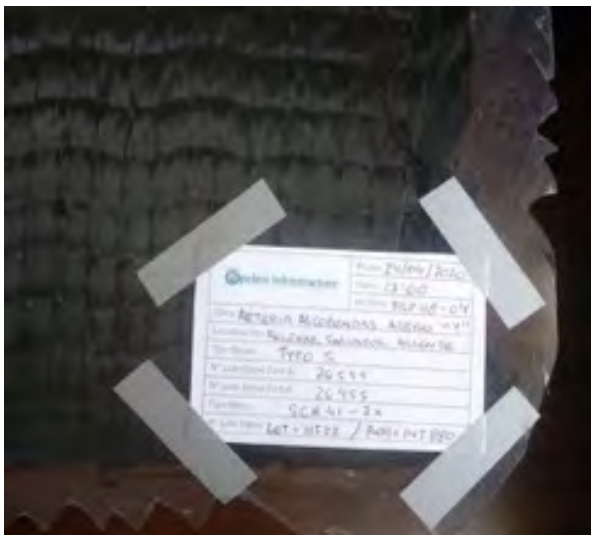


Figura 9.6. Etiquetado de muestra CFRP para envío a laboratorio.



Figura 9.7. Ejemplo de muestra para envío a laboratorio.

Resultados de ensayo:

REF Nro.	Resistencia a tracción en sentido fibra		Elongación de rotura en sentido de la fibra		Nº Lote /Rollo
	Valor de diseño	Valor Medio de Ensayo	Valor de diseño	Valor Medio de Ensayo	
FRP118	834 MPa	1173 MPa	0,85 %	1,27 %	11522/145877

9.3.3. Experiencia N.º 3 – Refuerzo exterior con fibra de carbono

REFUERZO ESTRUCTURAL EXTERIOR (DISEÑO ASME PCC2) EN TUBERÍA DE ADUCCIÓN DE ACERO DE DIÁMETRO 1200MM – CONSORCIO DE AGUAS BILBAO BIZKAIA

Dentro del alcance de trabajos de recuperación y puesta en servicio de la tubería Venta Alta-Ollargan (conducción de bombeo/turbinación a futura estación de Bolueta), se detectaron varios tramos en mal estado, con signos de corrosión avanzada, en los cuales aparecieron diversas fugas a la hora de poner en carga la tubería.

Uno de estos puntos es el acueducto de Montefuerte, más concretamente en el carrete de salida del macizo, aguas arriba. Este carrete de DN1200 y de 1.000 mm aproximadamente de longitud, estaba seriamente afectado, considerándose su estado como irrecuperable mediante reparaciones puntuales.

El difícil acceso rodado a la zona, junto con el propio condicionante de altura del acueducto, aconsejó el estudio y aplicación de una técnica alternativa a la solución tradicional de reposición integra del carrete en acero, mediante maquinaria de elevación, andamiaje, soldadura in situ, etc. (Figura 9.8).

El elemento de tubería aérea de acero sufría de un desarrollo grave de corrosión que llego a la aparición de varios puntos de perforación. Las soluciones iniciales de soldar placas de acero no daban resultado eficaz ya que aparecían nuevos agujeros rápidamente en otras zonas y no se detenía el proceso de desarrollo de corrosión. Por ello se optó por una solución estructural que garantizase que el resultado final tuviera resistencia a cargas existentes a largo plazo, asegurando, además, es-



Figura 9.8. Fotografías estado tubería.

tanqueidad completa, y con una durabilidad superior a 50 años. La conducción trabaja a una presión de servicio de 4 bares y tiene un espesor original de 6mm.

Se diseñó una solución con los sistemas de Polímeros Reforzados con Fibra de carbono (PRF) basándose para ello en la norma ISO 24817 (ASME PCC2) para los cálculos. Tras eliminación del recubrimiento exterior por medios abrasivos mecánicos, El sistema de refuerzo PRF incluyó en una primera etapa una imprimación con la función de realizar puente de adhesión, luego se instalaron varias capas de un tejido ligero bidireccional de vidrio saturado de resina epoxi bicomponente con el objetivo de crear estanquidad y una barrera dieléctrica entre el acero y el compuesto de carbono final que se aplicó en sentido circunferencial en varias capas. Sólo se aplicaron productos que disponen de certificación ASME PCC2, garantizando así la calidad, resistencia y durabilidad de la solución PRF aplicada según las normativas internacionales vigentes. Las resinas epoxi de alto rendimiento tienen, además, adhesión estructural demostrado por el certificado CE según EN 1504-04. Se realizaron muestras que fueron ensayadas a tracción unidireccional en laboratorio independiente y se confirmó la resistencia del compuesto de carbono de 1000 MPa, muy superior a los valores de diseño.



Figura 9.9. Fases rehabilitación y estado final. Fuente: Pipeline Infrastructure.

Esta solución fue un acierto por su efectividad en los tiempos de ejecución (1 día), en el ahorro económico que supuso, y en las garantías de resistencia y durabilidad.

9.3.4. Experiencia N.º 4 – Encamisado con tubería de fundición dúctil

Dentro de las aducciones de Canal de Isabel II se encuentra la arteria de San Fernando, una de las más importantes arterias que da suministro al corredor del Henares. Esta conducción a su paso por la C/ Deyanira de Madrid (aproximadamente un kilómetro de longitud), estaba formada por una tubería de acero de Ø 1422 mm, con 7 milímetros de espesor, que está protegida parcialmente con hormigón en masa.

En esa misma calle existe una subestación eléctrica (en la esquina de la calle Deyanira con la calle Arrastaria) y, además, el trazado discurre paralelo a la línea de tren, sin que disponga la tubería de ninguna protección frente a la corrosión.

Esta tubería de acero tenía un espesor bastante inferior a lo que recomiendan las Normas de Abastecimiento de Canal de Isabel II y más si cabe, en un sitio donde el ataque por corrosión es muy alto. Esto ha provocado la pérdida de acero, de manera que se han registrado hasta 8 roturas distintas en los últimos 10 años. Estas roturas se reparaban soldando por dentro una pieza de acero, lo que conllevaba tener que cortar el suministro de esta arteria, vaciarla, y reparar desde su interior.

Ejemplos de antes y después de reparaciones previas:







Desde una última rotura de 2017 se hizo imposible su restablecimiento y puesta en servicio, puesto que cada vez que se cargaba la conducción, perdía por un sitio. Por ello se solicitó la realización de un informe del estado de la tubería, que incluía una inspección visual y un mapeado de espesores por ultrasonidos, tomando en cada metro de tubería 8 mediciones (a 0º, 45º, 90º, 135º, 180º, 225º, 270º y 315º) a lo largo de los aproximadamente 1030 metros afectados, dividiendo esta longitud en varios sectores O, A, B, C, D, E.

Obteniéndose las siguientes evidencias en el informe:

1. Se han observado a lo largo de toda la tubería multitud de “afloraciones de oxidación” de pequeño tamaño, pero en grandes cantidades, y que se deshacen con la mano. Dichas afloraciones pueden presuponer un problema de corrosión externa tipo Pitting llegando a producir perforaciones a corto plazo. La mayor parte de estas afloracio-



nes se concentran en los sectores B y C. De la propia observación no se puede deducir el grado de profundidad que pueden alcanzar por lo que no se puede saber si son pasantes completamente en la pared de la tubería. Cabe la posibilidad de que estas afloraciones puedan derivar en un problema mayor a corto plazo. Basándonos en estas observaciones, podemos deducir que la pared exterior tiene corrosiones generalizadas que afectan a la resistencia estructural de la tubería.



2. Se han observado multitud de ampolladuras a lo largo de la tubería, concentrándose sobre todo en los extremos de los distintos tramos de tubería, cerca de las uniones de unos con otros que también pudieran ser indicadores de corrosiones externas. Es difícil encontrar alguna unión, en todos los sectores de la tubería, sin este tipo de deficiencias siendo el Sector B el más perjudicado. La proximidad a los extremos soldados puede dar a entender que durante el proceso de soldadura se calentaron en exceso esos puntos ocasionando un cambio en la estructura cristalina del acero motivando un proceso de corrosión acelerado.



3. Se han encontrado 2 agujeros pasantes de 1 cm de diámetro. De la inspección visual no se ha podido observar el material que existe al otro lado de la tubería con el objeto de determinar el grado de influencia en el exterior de estos agujeros. Estos 2 agujeros se hallan en el sector B lo que hace que este sea, junto al resto de deficiencias, el más perjudicado en todos los sentidos del total de sectores de la tubería.



4. A lo largo de toda la tubería se encuentran multitud de parches metálicos lo que hace suponer que existían graves pérdidas de espesor o taladros pasantes en esos puntos.
5. El número de parches que se pueden encontrar a lo largo de la tubería son en tal cantidad que podríamos calificar la misma como una tubería bastante deficiente en cuanto a su estructura. De nuevo son los Sectores B y C los más perjudicados. El estado de conservación de la mayoría de estos parches es bastante deficiente, mostrando un aspecto oxidado, en especial en sus bordes soldados producidos por el cambio estructural del material, consecuencia del choque térmico sufrido en el proceso de soldadura.



De esta forma, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

De las observaciones detectadas, y del análisis de los datos recogidos, podemos concluir que la tubería se encuentra en un estado de conservación bastante deficiente aconsejándose una intervención en la misma lo antes posible dadas las deficiencias encontradas. Todos los sectores, principalmente los sectores B y C, presentan deficiencias en mayor o menor grado localizándose taladros pasantes, abolladuras, ampolladuras en el material base que advierten zonas de corrosión exterior (tipo Pitting o “microporos”) y con un grado de parcheado interior con bordes corroídos, que hace recomendable su reparación completa. Basándonos en estas observaciones podemos estimar que la contribución estructural de la tubería traducido a espesores remanentes equivalentes medios de los tramos B y C estarían en el 30%-40%, y en los tramos 0, A, D y E en el entorno del 50%-60%.

Así mismo se obtuvo la tabla de espesores (en mm) de todo el tramo tal y como en la Tabla 9.2 que sirva de ejemplo:

Una vez tenido en cuenta este estudio, toca ver opciones de renovación o reparación. Para reparar esta arteria, se estudiaron las siguientes alternativas:

a) Sustitución con apertura de zanja; esta solución se descartó, por el alto coste, así como el impacto sobre el tráfico, pues es una zona muy transitada debido a la proximidad del centro comercial Plenilunio.

Tabla 9.2. Ejemplo tabla de espesores.

Sector A	0º	90º	180º	270º	45º	135º	225º	315º
A47	8,3	8,26	7,45	7,9	7,65	8,23	8,29	7,75
A48	7,8	7,36	7,89	7,64	7,67	7,88	7,6	7,36
A49	7,89	7,79	7,69	7,7	7,95	8,09	8,14	7,8
A50	7,5	7,47	7,52	7,22	7,9	7,93	7,86	7,2
A51	6,96	7,8	7,9	7,94	7,97	7,95	8,17	7,64
A52	7,87	7,8	7,39	7,6	8,01	7,9	8,01	6
A53	8,01	7,79	7,95	7,7	7,82	7,85	7,95	7,6
A54	7,43	7,73	7,62	7,33	7,98	7,76	7,94	7,91
A55	7,83	7,8	7,39	7,86	7,95	7,76	7,85	7,34
A56	7,08	7,62	7,76	7,55	7,8	7,7	7,1	7,8
A57	8,19	7,73	7,42	7,56	7,85	7,8	7,4	7,49
A58	8,21	7,85	7,71	7,73	7,81	8,01	7,15	7,86
A59	8,49	7,79	7,47	7,79	7,82	7,8	7,28	6,65
A60	8,22	7,62	7,9	7,9	7,84	7,7	7,13	7,66
A61	8,31	7,67	7,71	7,88	7,72	7,94	7,9	7,83
A62	8,21	7,91	8,1	7,93	7,87	8,01	8,06	7,93
A63	8,04	7,87	8,03	7,99	7,75	7,88	7,95	7,92
A64	8,71	8,02	7,86	7,82	7,82	7,7	8,05	8,01
A65	8,53	7,88	7,89	8,03	7,91	7,5	7,49	8,01
A66	8,6	7,85	7,3	7,76	8,9	7,61	7,86	7,8
A67	8,58	7,83	7,89	7,94	8,09	7,83	8,1	7,89
A68	8,43	7,8	7,92	7,84	7,87	7,99	7,91	7,94
A69	8,53	7,83	7,85	8,05	7,99	7,95	8,03	8
A70	8,21	7,97	7,5	7,98	7,92	7,8	8,05	7,89
A71	8,27	7,98	7,5	7,95	7,95	7,86	7,97	7,75
A72	7,8	7,86	7,83	7,94	7,85	7,81	7,98	7,98
A73	7,9	7,9	7,91	7,96	7,8	7,97	7,83	7,81
A74	7,85	7,67	7,7	7,56	7,91	7,66	7,81	7,64
A75	7,6	7,9	7,75	7,82	7,91	7,41	7,85	7,69
A76	7,74	7,82	7,85	7,77	7,83	7,66	7,91	7,77
A77	7,92	7,92	7,81	7,79	7,84	7,65	7,77	7,92
A78	7,91	7,76	7,89	7,83	7,83	7,42	7,9	7,91
A79	7,75	7,65	7,8	7,82	7,93	7,85	7,95	7,8
A80	7,85	7,76	7,75	7,89	7,89	7,83	7,8	7,88

b) Refuerzo estructural mediante la aplicación de fibra de carbono. El presupuesto aproximado de esta actuación supera los 5 millones de €.

c) Refuerzo estructural mediante la instalación de una manga de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), por un presupuesto aproximado superior a 3 millones de €, y con pozos de ataque cada 80 metros.

d) Encamisado con tubería de acero de Ø 1.200 mm, y 12.5 mm. de espesor, el presupuesto es superior a 3 millones de euros, y necesita pozos de ataque cada 80 metros.

e) Encamisado con tubería de fundición dúctil Ø 1.000 mm. con dos tramos a cielo abierto de 21 m y seis pozos de ataque con un presupuesto de un millón de euros.

Si bien es cierto, que la alternativa e) Encamisado con tubería de fundición dúctil, reduce la sección, respecto de la existente, se tuvo en cuenta que este diámetro sería más que suficiente para aportar suministro al Corredor del Henares.

Es por ello que, la solución que finalmente se adoptó consistió en aprovechar el tubo existente, introduciendo una tubería de fundición dúctil DN1000 mm en su interior. Con esta solución se consiguió afectar lo mínimo en superficie, evitando de este modo grandes molestias a vehículos y peatones.

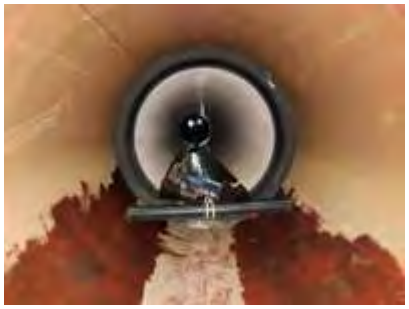
Para poder introducir un tubo en el interior fue necesario realizar unas calas de ataque por donde se introdujeron los tubos alternados con calas de tiro desde los cuales mediante el uso de cabrestantes tirando de estos hasta dejarlos enfrentados para su posterior conexión en el interior. Para ello se abrieron hasta 7 calas, a lo largo del km de distancia, por donde se introducían los tubos nuevos.





Estos tubos nuevos eran desplazados sobre unos carros desmontables para que rodaran sobre el interior de la tubería existente hasta su punto de unión con el anterior tubo, momento en el cual se desmontaban dichos carros para sustituirlos por bancadas metálicas, así como también instalaron a cada tubo dos conjuntos de abrazadera que dispondrán 3 tornillos M12x40 (zincados) soldados a la propia pletina destinados a la colocación silentblocks para ajustarse contra la tubería existente.







Con ayuda de un gato hidráulico, posteriormente se aseguraba el encaje de un tubo de fundición dúctil con el siguiente.

Para las zonas donde había que hacer giro, se optó por realizar obra de calderería y poner un tramo de acero helicosoldado, para así poder salvar los quiebros que tenía la tubería existente previamente.

De esta forma, pudieron ser renovados los 1.030 m de red con un tubo interior metido por el existente y deteriorado. Esta aducción fue puesta en servicio a principios de 2020, y desde entonces no se ha vuelto a apreciar ningún defecto en la misma.





9.3.5. Experiencia N.º 5 – Rehabilitación con Primus Line

RENOVACIÓN TUBERIA ACERO DN600 EN CRUCE DE AUTOVIA – CANAL DE ISABEL II. LINER ESTRUCTURAL FLEXIBLE PE REFORZADO CON KEVLAR (SISTEMA PRIMUSLINE)



Figura 9.10. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE / SINZATEC.

Propiedad: Canal de Isabel II.

Ubicación: cruce por debajo de la M11 a la altura de la Calle de Gregorio Sánchez Herráez (Madrid). La tubería tiene un trazado a modo de sifón de manera que tiene dos codos ubicados bajo los carriles extremos de ambos sentidos.

Material: Acero sin revestimiento.

Diámetro: DN600.

Longitud: 55 metros.

MOP: 8 bares.

Antecedentes/necesidad de rehabilitación: tubería sin revestimiento, histórico de fugas/averías, situación que imposibilita la actuación convencional a cielo abierto en zanja.

Detalle de la solución: instalación de un tramo de tubería flexible de alta presión, compuesta por 2 capas de polietileno de alta densidad y una capa de refuerzo con fibra de aramida (Kevlar), todo ello constituyendo una tubería con 6 mm de espesor y DN500mm Primus-Line PN11.

Primus Line® DN 500	454	6.0	442	40	16	7.7	10	8.6

Fecha: septiembre 2019

Duración de la obra: 3 días, incluido prueba de presión y puesta en servicio.



FASE 1. Limpieza de tubería de acero:

Se realiza la limpieza del interior de la tubería de acero mediante un rascador metálico que va anclado a un cable de acero y es tirado con un cabrestante desde el punto de extracción, así el material incrustado en la pared de la tubería (verdugones) es despegado. Posteriormente se pasa disco de goma de neopreno que va arrastrando todo el material depositado (Figura 9.11).

FASE 2. Instalación por tracción de la tubería flexible estructural PRIMUSLINE:

La tubería flexible se posiciona de tal manera que pueda desenrollarse desde la bobina directamente dentro de la tubería de acero. Se ancla un extremo al cable de acero y se tira del mismo con el cabrestante hasta que la tubería llega al punto de extracción. Una vez la tubería se ha colocado en su posición final, se instalan balones obturadores en sus extremos para luego a través de uno de ellos inyectar aire dentro de la conducción para inflarla y "abrir" la tubería insertada plegada (Figura 9.12).

FASE 3. Instalación de piezas de anclaje / conectores PN16 PrimusLine:

Se instalan los primeros componentes de las piezas de anclaje (elemento externo) en los extremos de la tubería de acero acondicionados con bridas. La tubería flexible sobresale de la pieza y se corta a ras de la cara externa. Se instala la segunda pieza de anclaje (estructura central), la cual entra en la tubería flexible dejando una sección de la misma encapsulada entre las dos piezas. El anclaje de la tubería en las piezas especiales se logra mediante la inyección a presión (150 bar) de una resina epóxica que ocupa el volumen entre las dos piezas de anclaje y pliega la tubería flexible dentro. La resina solidifica en un rango de al menos 6 horas. Para una mejor visión del proceso de la instalación de los anclajes se presentan en la Figura 9.13.

FASE 4. Prueba de presión:

Una vez que ha solidificado la resina, se realiza una prueba de presión con agua en la tubería a una presión de 12 bares (1,5x presión de servicio) (Figura 9.14).



Tubería de acero antes de limpieza

Proceso de limpieza con rascador

Extracción de material depositado



Tubería preparada para inserción de Primusline



Llegada de rascador en punto de extracción



Vista de tubería después de limpieza

Figura 9.11. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE / SINZATEC.



Posicionamiento de tambor de tubería



Vista de tambor de tubería Primusline



Inserción de tubería plegada en tubería de acero



Extracción de tubería en punto de salida

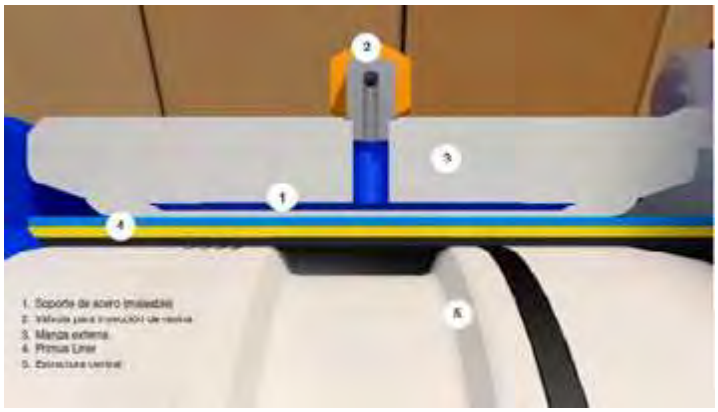


Instalación de obturador

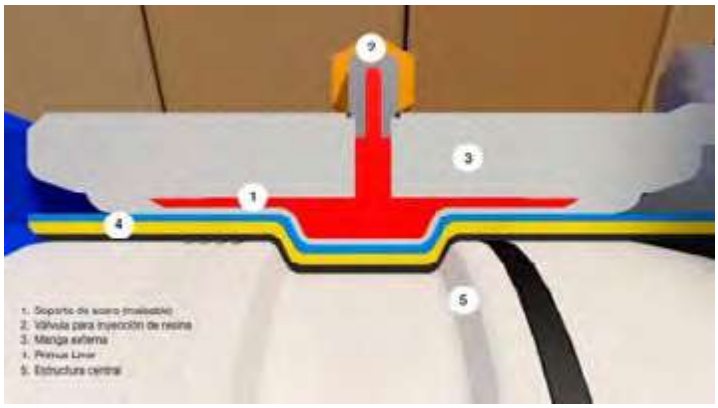


Inflado de tubería PrimusLine

Figura 9.12. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE / SINZATEC.



Vista en alzado de sección longitudinal de pieza instalada antes de la inyección de la resina



Vista en alzado de sección longitudinal de pieza instalada después de la inyección de la resina



Primera pieza de anclaje (manga externa)



Instalación de primera pieza de anclaje



Segunda Pieza de anclaje (estructura central)



Instalación de segunda pieza de anclaje



Sellado de anclaje por inyección de resina epoxi



Presión para sellado de anclaje (150bar)

Figura 9.13. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE / SINZATEC.



Figura 9.14. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE / SINZATEC.

10 Tuberías fundición dúctil

10.1. Introducción

Las tuberías de fundición dúctil comenzaron a utilizarse en Europa de forma habitual a partir de 1955. Tuvieron tal éxito que en la década de los años setenta, del siglo XX, sustituyeron prácticamente a la antigua fundición gris, de menor resistencia y susceptibles de rotura frágil. La fundición debe ser dulce, tenaz y dura, sin embargo, debe poder ser cortada y taladrada.

La fundición dúctil es una aleación de hierro, carbono y silicio. Gracias a la adición de magnesio durante el proceso de fabricación, se consigue que el grafito forme esferas en vez de láminas. Con esta transformación se consigue eliminar la posible fragilidad del material con el consiguiente aumento en ductilidad, elasticidad y elevada resistencia al choque y a los asentamientos del terreno. Incluso puede ser instalado con rellenos de zanja poco cuidados o en terrenos inestables.

La estructura molecular hace que la fundición dúctil absorba la fuerza y reaccione de forma plástica y elástica antes de llegar al punto de rotura. Es decir, la energía de impacto se convierte en deformación.

En general, los tubos de fundición pueden obtenerse en foso de colada o por centrifugación, siendo estos últimos de calidad superior.

A diferencia de las tuberías fabricadas a partir de planchas de acero, las tuberías de fundición dúctil no presentan ninguna unión por soldadura, lo que da como resultado una tubería mucho más resistente.

En la actualidad, las excelentes propiedades mecánicas de la fundición dúctil, hace que su uso se extienda a las canalizaciones de agua potable, regadío y saneamiento en una gran parte del mundo.

La fundición dúctil también tiene una gran capacidad para aguantar altas presiones (tanto interiores como exteriores), amortiguan los golpes de ariete, se ven poco afectadas por la corrosión del suelo (incluso en terrenos húmedos) y es muy resistente a cambios térmicos extremos (congelación - descongelación).

Los tubos de fundición dúctil deberán cumplir con lo especificado para los mismos en la norma UNE-EN 545. Su uso se limitará preferentemente dentro del rango de diámetros entre 80 m y 1.000 mm.

Las características mecánicas de la fundición dúctil empleada en las tuberías deberán cumplir con lo especificado en la siguiente Tabla. Para la densidad del material se adopta, en general, el valor de 7.050 kg/m^3 y para el módulo de elasticidad, 1,7 x 10^5 N/mm^2.

Tabla 10.1. Características mecánicas de la fundición dúctil.

Tipo de pieza	Resistencia mínima a la tracción, R_m (N/mm^2)	Alargamiento mínimo en rotura, $A_{min,r}$ (%)	Dureza Brinell Máxima, HB
Tubos centrifugados	420	10	230
Tubos no centrifugados	420	5	230
Piezas especiales	420	5	250

A continuación, se muestra el rango de presiones admisibles en las tuberías de fundición dúctil:

	Tipo de tubo	PFA (N/mm^2)	PMA (N/mm^2)
Función dúctil	Clase 30	3,00	3,60
	Clase 40	4,00	4,80
	Clase 50	5,00	6,00
	Clase 64	6,40	7,68
	Clase 100	10,00	12,00

Las dimensiones normalizadas de los tubos de fundición con junta flexible serán las indicadas en la Tabla 10.2 y Figura 10.1. Si excepcionalmente, se dispusieran tubos unidos con bridas, sus dimensiones serán las especificadas en la norma UNE-EN 545.

Todos los tubos van protegidos contra la corrosión mediante revestimientos adecuados, los cuales recubrirán uniformemente la totalidad de los contornos de los tubos, constituyendo superficies lisas y regulares, exentos de defectos tales como cavidades o burbujas. Habrán de estar bien adheridos a la fundición, no descascarillándose, ni exfoliándose, y secando en un tiempo rápido. Los revestimientos se aplicarán siempre en fábrica, excepto la manga de polietileno que se colocará en la propia obra. Salvo indicación en contra, todos los tubos deberán suministrarse con las siguientes protecciones:

- Un revestimiento exterior de cinc metálico con capa de acabado.
- Un revestimiento interior de mortero de cemento.

Excepcionalmente, podrían ser admisibles también los siguientes revestimientos conforme a lo especificado para los mismos en la norma UNE-EN 545:

- Revestimientos exteriores:
  - Recubrimientos de pintura rica en cinc con capa de acabado.
  - Manga de polietileno (añadida al recubrimiento de cinc con capa de acabado) según la norma ISO 8180.
  - Recubrimiento de aleación de cinc y aluminio con o sin otros metales, con capa de acabado.
  - Polietileno extruido de acuerdo con la norma UNE-EN 14628.
  - Poliuretano según la norma UNE-EN 15189.
  - Mortero de cemento reforzado de acuerdo con la norma UNE-EN 15542.
  - Cinta adhesiva.

Tabla 10.2

Diámetros (mm)		Espesor mínimo (mm)					Longitudes		
Valor nominal							Valor nominal (m)		
DN	OD	Clase 30	Clase 40	Clase 50	Clase 64	Clase 100	Tubos para unión flexigle	Tubos con bridas incorporadas	Tubos con bridas soldadas o roscadas
80	98					4,7	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
100	118					4,7	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
125	144				4,0	5,0	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
150	170				4,0	5,9	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
200	222			3,9	5,0	7,7	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
250	274			4,8	6,1	9,5	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
300	326		4,6	5,7	7,3	11,2	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
350	378		5,3	6,6	8,5	13,0	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
400	429		6,0	7,5	9,6	14,8	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
450	480		6,8	8,4	10,7	16,6	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
500	532	5,6	7,5	9,3	11,9	18,3	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
600	635	6,7	8,9	11,1	14,2	21,9	5-5,5-6	0,5-1-2-3	2-3-4-5
700	738	7,8	10,4	13,0	16,5		5,5-6-7	0,5-1-2-3	2-3-4-5-6
800	842	8,9	11,9	14,8	183,8		5,5-6-7	0,5-1-2-3	2-3-4-5-6
900	945	10,0	13,3	16,6			5,5-6-7-8,15	0,5-1-2-3	2-3-4-5-6
1.000	1.048	11,1	14,8	18,4			5,5-6-7-8,15	0,5-1-2-3	2-3-4-5-6

* El diámetro nominal (DN) se refiere, aproximadamente, el diámetro interior (ID).

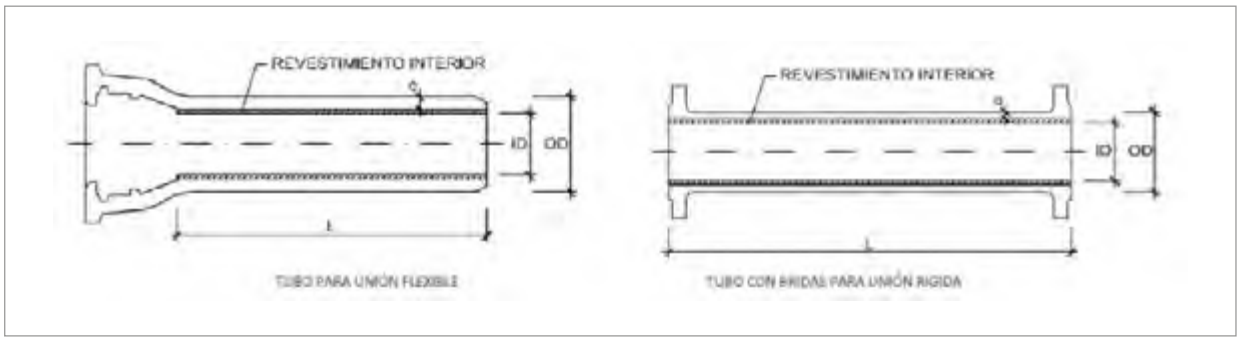


Figura 10.1

- Revestimientos interiores:
  - Mortero de cemento con mayor espesor.
  - Mortero de cemento con capa de sellado ("seal-coat").
  - Poliuretano según la norma UNE-EN 15655.
- Revestimientos del área de unión:
  - Recubrimiento epoxi.
  - Recubrimiento de poliuretano.

Como criterio general, la elección del revestimiento exterior se realizará en función de la agresividad del suelo que rodee la conducción, conforme a lo indicado en la Tabla 10.3 (anexo D informativo de la norma UNE-EN 545).

Tabla 10.3

Agresividad del terreno	Tipo de revestimiento exterior de los tubos
Terrenos poco corrosivos	Cinc metálico y pintura bituminosa de acabado
Terrenos muy corrosivos	Cinc metálico; pintura bituminosa de acabado; manga de polietileno o cinc-aluminio y pintura de acabado
Terrenos sumamente corrosivos	Poliuretano; cinc metálico; polietileno extruido o cinta adhesiva

La norma UNE-EN 545 entiende por suelos muy corrosivos los que tienen una resistividad muy baja (menor de 1.500 Ω•cm si es una instalación por encima del nivel freático o 2.500 Ω•cm si es bajo la capa freática), o un pH menor de 6, o si tienen un alto contenido de sulfatos, cloruros o sulfuros, o si hay peligro de contaminación por vertidos orgánicos o industriales o si existen corrientes vagabundas, etc.

En cuanto a los revestimientos interiores, su elección será función de la agresividad del agua transportada como se indica en la Tabla 10.4 mostrada a continuación:

Tabla 10.4

Agresividad del agua transportada	Tipo de revestimiento interior de los tubos
Aguas no agresivas	Mortero de cemento portland
Aguas agresivas	Mortero de cemento resistente a los sulfatos (incluyendo cementos de alto horno)
Aguas sumamente agresivas	Mortero de cemento aluminoso Poliuretano

Las aguas agresivas son, según el anexo E (informativo) de la norma UNE-EN 545, las que se indican en la Tabla 10.5.

En cualquier caso, en el ámbito del agua para consumo humano, se considerará con carácter general que el agua transportada es no agresiva.

Tabla 10.5. Clasificación de las aguas por su agresividad (UNE-EN-545)

Agresividad del terreno	Aguas no agresivas	Aguas agresivas	Aguas sumamente agresivas
Valor mínimo de pH	6	5,5	4
Contenido máximo (mg/l) en:			
CO_2 agresivo	7	15	No limitado
Sulfatos (SO_4^-)	400	3.000	No limitado
Magnesio (Mg^{++})	100	500	No limitado
Amonio (NH_4^+)	30	300	No limitado

10.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación

Debido a la relativa juventud de las tuberías de fundición dúctil y a las características de las mismas, es un material en el que hasta la fecha no está observando un deterioro importante, y, por tanto, tampoco son frecuentes las roturas en este tipo de tuberías.

Las averías se pueden reparar por los procedimientos expuestos en el siguiente apartado, pero también se le podrían aplicar otros métodos de rehabilitación explicados en las tuberías de otros materiales.

10.3. Experiencias

10.3.1. Experiencia N.º 1

ARTERIA FUNDICIÓN DÚCTIL DN600- GLOBAL OMNIUM

Material: Fundición dúctil, con unión tipo campana con anillo de elastómero y junta express. Tubería enterrada.

Diámetro: DN600

Procedimiento de ejecución:

1. Preparación de zona de trabajo. Corte de firme, excavación y acondicionamiento de zanja.
2. Instalación de protección taludes de excavación mediante sistema de entibado metálico.
3. Corte y retirada de tubería afectada.
4. Sustitución por tubo de FD con manguitos de unión.
5. Realización de pruebas de estanqueidad y posterior puesta en servicio.







Causas y propuestas de mejora:

La causa de esta avería son los asientos diferenciales que se producen en entornos donde confluyen una instalación elástica, como es la tubería, y cualquier elemento que por sus características tenga un comportamiento diferente a la flexibilidad de la tubería.

En concreto esta fuga se produjo en la junta express de una "te" de desagüe. La válvula y poceta correspondiente eran solidarias a una arqueta y en su trasdós estaba la "te" de desagüe. Al producirse asentamiento de la tubería se produce una fuga en la junta. Con el paso del tiempo esta pequeña fuga que se puede provocar va erosionando el tubo y la propia junta de goma, tal y como se muestra en las imágenes.

Para evitar este tipo de problemas es muy recomendable que en el entorno de cualquier estructura que vaya a rigidizar cualquier elemento de la tubería, también se rigidicen los tubos que entroncan con la misma. Es muy importante que se alcancen los pares de apriete recomendados, especialmente en estos puntos.





10.3.2. Experiencia N.º 2

ARTERIA FUNDICIÓN DÚCTIL DN450 - GLOBAL OMNIUM

Material: Fundición dúctil, con unión tipo campana con anillo de elastómero. Tubería enterrada.

Diámetro: DN450

Procedimiento de ejecución:

1. Preparación de la zona de trabajo. Excavación y acondicionamiento de zanja.
2. Instalación de abrazadera hermética de reparación sobre punto de fuga. Reparación sin necesidad de corte.







11 Tuberías fundición gris

11.1. Introducción

Según la propia definición de la Real Academia Española, se dice que fundición es una "aleación de hierro y carbono que contiene más del 2% de este. Se usa principalmente para obtener piezas por moldeo del material fundido".

Efectivamente, la fundición es como tal una aleación de hierro y carbono, donde el contenido de carbono, en grafito, varía entre el 1,76 y un 6,67% en peso. Una aleación con menos del 1,76% de carbono será acero, y por encima de 6,67% de carbono será cementita, un compuesto químico que carece de propiedades metálicas.

La fundición gris con la que se trabaja en obras hidráulicas suele tener una composición de 2,5 a 4% de carbono y de 1 a 3% de silicio para estabilizar el grafito. Esto último es lo que diferencia a la fundición gris de la fundición blanca.

La forma en la que se presenta el carbono es clave para determinar el tipo de fundición que tenemos. La fundición gris es aquella en la que la precipitación del carbono se produce en forma laminar, mientras que en la fundición dúctil lo hace en forma de esferas.

Esta disposición del carbono es la que marca la clara diferencia entre los dos tipos de fundiciones

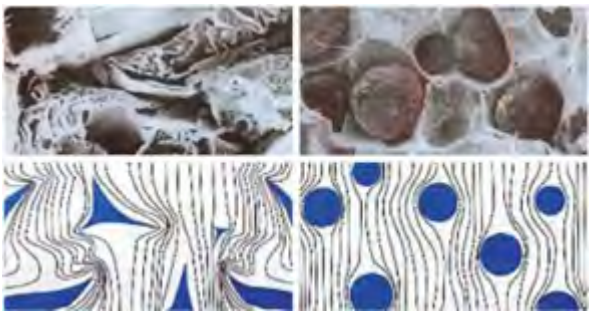


Figura 11.1. Izquierda fundición gris. Derecha fundición dúctil. Fuente: https://www.construtec.com/que-es-la-fundicion-ductil-que-quiere-decir-ductil/.

citados. Tal y como se aprecia en la imagen superior, la disposición laminar la que acaba generando unas líneas de tensiones que se concentran, generando puntos de rotura, puntos de fragilidad que pueden justificar algunas roturas espectaculares como las que se verán más adelante.

No sucede así con la fundición dúctil, que mantiene las líneas de tensiones más separadas, lo que hace que el material sea menos frágil y más maleable, más dúctil que la fundición gris.

La fundición gris es una vieja conocida del hombre, pues de una u otra forma se trabajaba con ella desde la prehistoria en la Edad de Hierro, donde ya hacían herramientas y armas fundiendo el hierro en moldes de arena. Sin embargo, hay que esperar

hasta el año 1313 para tener un uso con moldes y a gran escala. A partir de este año es cuando se tiene constancia del comienzo del uso de la fundición gris para la fabricación de cañones en Europa. Presumiblemente se supone que entorno a esos años debió de usarse también la fundición gris para la fabricación de tuberías. Pero no es hasta el año 1455 cuando se tiene documentado la primera tubería de fundición gris que se instaló en Alemania para conducir agua al castillo de Dillenberg.

Actuaciones posteriores a estas, y que también se ejecutaron con fundición gris, son, por ejemplo, las canalizaciones que llevaron agua a las fuentes del Palacio de Versalles en 1664, ordenado construir por Luis XIV. 35 km de red que unían el Sena vía Marly con los jardines del palacio de Versalles con juntas de plomo o cuero que permitían un funcionamiento con una presión máxima de 15 bar. Las redes de plomo existentes en la época eran insuficientes para aguantar esos diámetros (de hasta 800 mm) y esas presiones.



Figura 11.2. Tubería de fundición. Palacio de Versalles (1748). https://www.pamline.es/tuberia-fundicion-traves-historia.

En España alrededor del año 1720 y por orden de Felipe V se construye el Palacio de la Granja de San Ildefonso, cuyas fuentes son alimentadas a través de fundición gris.

Para otros usos de este material en otros lugares como Londres, hay que esperar hasta el 1746 para la primera instalación de tuberías de fundición gris, y hasta 1817 en EEUU, donde por primera vez en el país se instalan tuberías de fundición gris en Filadelfia usando eso sí, tubos importados de Inglaterra.

Este tipo de tubería está fuera de la normativa vigente y debido a la frecuencia de fugas y sus efectos, está siendo paulatinamente reemplazado, siendo sustituido de forma normal por fundición dúctil.

Los tubos de fundición gris pueden estar en diámetros comprendidos entre los Ø 80 a Ø 1.000 milímetros. Suelen ser tubos de 5 a 6 metros de longitud, si bien es cierto que a medida que aumenta el diámetro se pueden ver tubos de 7 y 8 metros de longitud.

Las uniones existentes entre tubos de fundición gris de forma normal son juntas automáticas flexibles de enchufe y extremo liso, donde un anillo elastomérico ajusta un tubo con el otro.

11.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación

En lo que se refiere a la reparación propiamente dicha, actualmente se puede resumir en dos casos:

Reparación con corte de tubo, sustitución de tramo y unión mediante manguitos

En el caso de las tuberías de fundición gris será la reparación más común, salvo que no se pueda llevar a cabo por accesibilidad, interrupción de suministro, u otros. La reparación consistirá en la extracción del tramo de tubería afectado y la sustitución que normalmente será de fundición dúctil y unas uniones con acoplamientos o manguitos. Actualmente en el mercado existen manguitos para diámetros superiores a 1.400 mm

La sustitución se hace en varios pasos:

1. Corte de tubo. En este paso se cortan los extremos de la zona afectada, de forma perpendicular. El corte deberá ser lo más perfecto posible para así evitar posibles desajustes entre los tubos.
2. Introducir los manguitos o acoples en la parte sana del tubo existente.
3. Colocar el tramo de tubo nuevo centrado.
4. Apretar las tuercas de los manguitos o acoples sobre la unión de los tubos, cen-

trando previamente los acoples para que estén en la mejor posición posible

5. Comprobar la estanqueidad de las dos nuevas uniones que se han originado entre el tubo existente y el nuevo tramo montado.

Reparación sin corte de tubería con abrazaderas

Este tipo de reparación en tuberías de fundición gris apenas se realiza, ya que en medida de lo posible se renueva con el anterior método renovando así un tramo. Las reparaciones sin corte de tubería se dan para tuberías con pequeños daños que tienen difícil sustitución o acceso, o para reparaciones provisionales.

Consiste en una abrazadera mecánica de dos o tres sectores. Estas abrazaderas están provistas de una junta interior que garantiza la estanqueidad al realizar el apriete de los tornillos, mientras que la parte externa suele ser de acero inoxidable o fundición con pintura de protección para evitar problemas de corrosión.



Figura 11.3. Abrazadera para reparación provisional en tubería.

11.3. Experiencias

En un estudio realizado en 2016 por Canal de Isabel II se comprobó que el 45% de las roturas en tubería general son en tuberías de fundición gris, siendo actualmente el material con más roturas en lo que se refiere a roturas en tubería general por delante del fibrocemento.

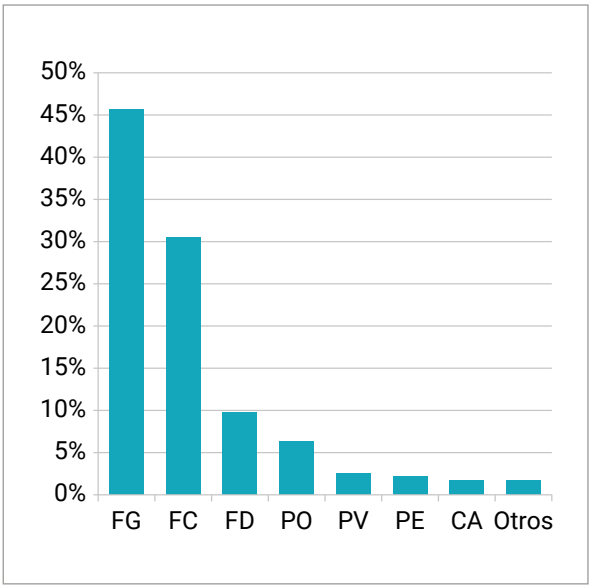


Figura 11.4. Distribución porcentual de roturas en tubería general según material. Cuaderno 24 de I+D+i de Canal de Isabel II.

Otro dato revelador de las tuberías de fundición gris respecto a las de otros materiales es el índice de roturas por kilómetros instalado. En fundición gris y en Canal de Isabel II el índice es próximo al 0,55 rotura/km anual, mientras que en otros materiales como en la fundición dúctil este valor es de 0,03 rotura/km. No hay que obviar que las tuberías de fundición gris presentan valores más altos de roturas porque son tuberías con más edad, y que poco a poco van siendo sustituidas por nuevas tuberías de fundición dúctil.

Se adjuntan a continuación fotografías con ejemplos de la tipología de averías más habituales.



Figura 11.5. Rotura en tubería general de fundición gris de tipo circunferencial.



Figura 11.6. Rotura longitudinal en tubería general de fundición gris de Ø 600 mm en galería.



Figura 11.7. Rotura explosiva en tubería de fundición gris de Ø 1.000 mm en galería.

Como se puede apreciar en las anteriores imágenes, los tubos habían perdido prácticamente los recubrimientos, tanto interiores como exteriores, facilitando así la corrosión. Esta corrosión aparece en prácticamente la totalidad de las roturas de las tuberías de este material, si bien puede que esta no sea la causante de la rotura.

En la Figura 11.8 se puede apreciar incrustaciones interiores y características de las tuberías de fundición gris, que en ocasiones pueden superar los 35 milímetros y que hacen que las tuberías pierdan características resistentes. Las tuberías se muestran más frágiles ante variaciones de presión y sobrecargas debido a estás incrustaciones. Así mismo, reducen sección efectiva de la tubería, aumentan la rugosidad y perdida de carga y suelen ocasionar problemas de calidad por exceso de hierro en zonas donde se producen cambios de dirección del flujo del agua o grandes gradientes de caudales.

11.3.1. Experiencia N.º 1 – Refuerzo exterior con fibra de carbono

ARTERIA FUNDICIÓN GRIS DN900 – CANAL DE ISABEL II. REFUERZO EXTERIOR CON POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO

Material: Fundición gris, con juntas emplomadas y contrabrida instalada en cada junta. Tubería aérea



Figura 11.8. Ejemplos de tuberías de fundición gris con incrustaciones interiores.

en galería con apoyo sobre dado de hormigón cada tres metros.

Diámetro: DN900

Longitud: 330 ml

MOP: 9 bares



Fig. 11.9. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

Antecedentes: La tubería tiene más de 50 años de vida. No existe un historial de roturas o fallos estructurales en este tramo especifico de tubería, aunque se conocen roturas explosivas en conducciones del mismo material, diámetro y antigüedad en otras ubicaciones de la red de arterias gestionadas por el Canal de Isabel II. La conducción discurre en galería en una zona critica de Madrid, con comercios y metro a proximidad inmediata. Por ello, dada la antigüedad, el nivel de oxidación y la ubicación critica de esta conducción, cuyo fallo supondría un trastorno grave, se identifica la necesidad de aplicar un refuerzo estructural con el objetivo de garantizar su capacidad resistente y así mismo la continuidad segura de su funcionamiento a largo plazo.

La solución elegida, la aplicación de un refuerzo exterior con polímeros reforzados con fibra de carbono, además de aportar la respuesta técnica requerida (materiales con excelente ratio resistencia-peso, adherencia estructural, durabilidad por ser inalterables, cualificación ASME PCC2), destaca por la ejecución ágil y sin molestia en una zona comercial peatonal de mucho paso: ninguna necesidad de obra civil, ninguna necesidad de vehículos pesados, ocupación mínima de la calzada.



Figura 11.10. Ocupación de obra reducida sin ocasionar molestias.

Material: Sistema CFRP TYFO SCH41-S compuesto de tejido unidireccional de espesor nominal 1mm, densidad mínima de fibra 1,74 g/cm^3 y resina epoxi TYFO S libre de componentes orgánicos volátiles. El *composite* final tiene resistencia a tracción mínima de 986 MPa, módulo de tensión 95,8 MPa. El material responde explícitamente a todas las exigencias normativas en cuando a propiedades mecánicas, físicas, de durabilidad y de experiencia, así como en su proceso de instalación y los controles de calidad realizados (Tabla 11.1).

Procedimiento de ejecución:

1. Preparación de superficie (Figura 11.11):
   - Limpieza por agua ultra alta presión o *waterjetting* (1800 bares) para eliminación de todo el óxido presente en superficie exterior
   - Rascado mecánico diario para eliminar *flash rust* antes de la aplicación del compuesto.
2. Control de condiciones por ventilación forzada, deshumidificador 2500 m^3/h, con cerramiento de zonas de aplicación
3. Aplicación de imprimación de alto rendimiento específico para substratos metálicos y nivelación de superficie

Tabla 11.1. Características mecánicas de compuesto CFRP. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

Composite Gross Laminate Properties			
Property	ASTM Method	Typical Test Value	Design Value
Ultimate tensile strength in primary fiber direction	D3039	143,000 psi (986 MPa) (5.7 kip/in. width)	121,000 psi (834 MPa) (4.8 kip/in. width)
Elongation at break	D3039	1.0%	0.85%
Tensile modulus	D3039	13.9 x 10^6 psi (95.8 GPa)	11.9 x 10^6 psi (82 GPa)
Flexural strength	D790	17,900 psi (123.4 MPa)	15,200 psi (104.8 MPa)
Flexural modulus	D790	452,000 psi (3.12 GPa)	384,200 psi (2.65 GPa)
Longitudinal compressive strength	D3410	50,000 psi (344.8 MPa)	42,500 psi (293 MPa)
Longitudinal compressive modulus	D3410	11.2 x 10^6 psi (77.2 GPa)	9.5 x 10^6 psi (65.5 GPa)
Longitudinal coefficient of thermal expansion	D696	3.6 ppm./ºF	
Transverse coefficient of thermal expansion	D696	20.3 ppm./ºF	
Nominal laminate thickness		0.04 in. (1.0 mm)	0.04 in. (1.0 mm)



Figura 11.11. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE

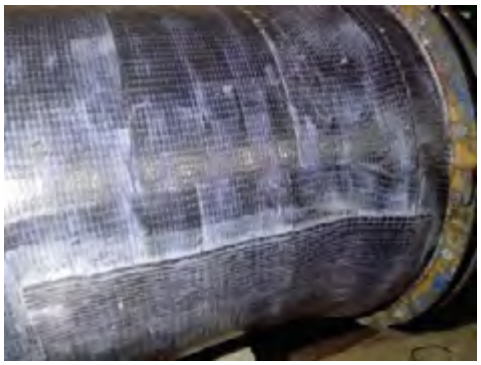
4. Aplicación de capa inicial de *composite* de vidrio Tyfo SEH51 – S. Esta fase previa es imprescindible en caso de aplicación de refuerzo de *composite* de carbono sobre superficie metálica ya que permite crear barrera dieléctrica entre acero existente y carbono aplicado, evitando desarrollo de corrosión galvánica (Figura 11.12).
5. Aplicación de refuerzo CFRP Tyfo SCH41-X según diseño y método de aplicación nor-



Figura 11.12. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.







Aplicación de refuerzo adicional longitudinal en puntos de apoyos de la tubería

Figura 11.13. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

mativos: aplicación por método húmedo, instalación y control de ejecución manual capa por capa. Un diseño ASME PCC2 confirmó así mismo que el refuerzo aplicado permite un funcionamiento seguro sin fallo estructural con una corrosión de hasta el 90% de la pared de los tubos.

Control de calidad:

1. Control continuo. Se realiza control continuo capa por capa de la aplicación por verificación de alineamiento de tejido de fibra instalado y por inspección de huecos o delaminaciones.
2. Control de propiedades de resistencia a tracción en sentido de las fibras. Se realizan muestras de materiales diariamente y se procede a ensayo de tracción unidireccional en laboratorio independiente, confirmando la validez del material instalado y los valores declarados para el diseño.

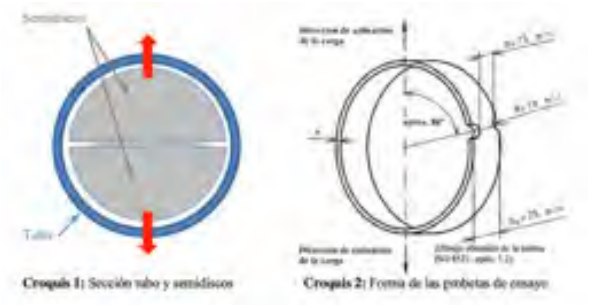




Resultados de ensayo:

Resistencia a tracción en sentido fibra		Elongación de rotura en sentido de la fibra	
Valor de diseño	Valor Ensayo	Valor de diseño	Valor Ensayo
834 MPa	900 MPa	0,85 %	0,96 %

3. Ensayo a rotura presión interna – IECC - Instituto Eduardo Torroja: PRESIÓN DE DISEÑO INICIAL Y DE FALLO PARA TUBOS DE PRESIÓN Resistencia en tracción circunferencial inicial aparente ISO 8521.

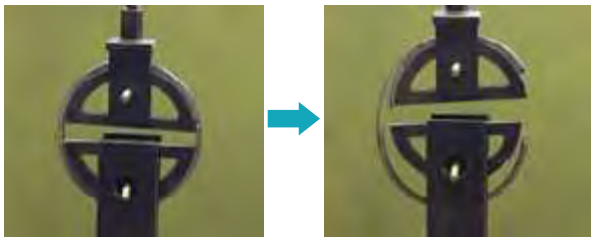


Preparación de muestras sobre elemento de tubería de fundición gris antigua DN400. Corte de anillos: 4 unidades con refuerzo carbono (1 x capa SCH41 = 1 mm de espesor nominal), 3 unidades sin refuerzo:

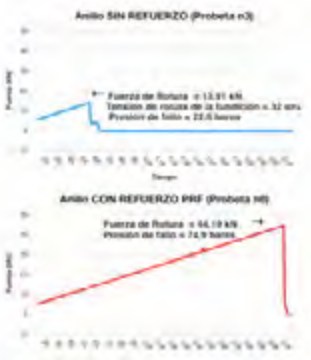




Ensayo realizado en instalaciones del IETCC – Instituto Eduardo Torroja (Madrid):







Resultados:



	Probeta Numero	P rotura (N)	Resistencia Circunferencial Aparente (N/mm)	Presión interior (bares)
Probetas sin refuerzo	S-TC 1	15.800	516,0	25,8
	S-TC 2	15.660	509,9	25,5
	S-TC 3	13.910	451,0	22,6
Probetas con refuerzo exterior	E-TC 7	44.080	1.455,8	72,8
	E-TC 8	44.190	1.467,1	74,9
	E-TC 9	65.620	2.136,1	106,8
	E-TC 10	54.810	1.819,1	91,0

Conclusiones Informe:

Probetas sin refuerzo: *"la carga de rotura estuvo en el orden de los 15 kN (...) lo que equivale a una tensión de rotura para la fundición gris de unos 35 MPa, valor excesivamente bajo para este material. La superficie interior de los anillos ensayados, provenientes de tubos usados, estaba oxidada (...)"*

Probetas con refuerzo: *"Comparando la rotura entre los anillos de fundición sin refuerzo (15,1 kN de carga media) y los reforzados exteriormente con fibra de carbono (52,2 kN), resulta para estos últimos una* ***resistencia cerca de 3,5 veces superior*** *a la de los tubos de fundición sin refuerzo, carga de rotura para los tubos reforzados equivalente a una presión interior de 87,0 bares."*

11.3.2. Experiencia N.º 2 – Rehabilitación interior con tecnología primusline

RENOVACIÓN TUBERIA FUNDICION GRIS DN550 EN ZONA VERDE PEATONAL – CANAL DE ISABEL II. LINER ESTRUCTURAL FLEXIBLE PE REFORZADO CON KEVLAR (SISTEMA PRIMUSLINE)



Figura 11.14. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE / SINZATEC.

Propiedad: Canal de Isabel II

Ubicación: Parque del Oeste (Madrid)

Material: Fundición Gris

Diámetro: DN550

Longitud: 295 metros

MOP: 7 bares

Antecedentes/necesidad de rehabilitación: histórico de numerosas averías, ubicación con mucho paso peatonal que imposibilita la actuación convencional a cielo abierto en zanja.

Detalle de la solución: instalación de un tramo de tubería flexible de alta presión, compuesta por 2 capas de polietileno de alta densidad y una capa de refuerzo con fibra de aramida (Kevlar), todo ello constituyendo una tubería con 6 mm de espesor y DN300mm Primus-Line PN12.

OD (mm)	*t* (mm)	ID (mm)	Estallido (bar)	MOP agua (bar)	Peso agua (kg/m)
284	6.0	272	30	12	4.6

Fecha: noviembre 2019

Duración de la obra: 3 días, incluido prueba de presión y puesta en servicio.



FASE 1. Limpieza de tubería de fundición gris

Se realiza la limpieza del interior de la tubería de fundición gris mediante un rascador metálico que va anclado a un cable de acero y es tirado con un cabrestante desde el punto de extracción, así el material incrustado en la pared de la tubería (verdugones) es despegado. Posteriormente se pasa disco de goma de neopreno que va arrastrando todo el material depositado (Figura 11.15).

FASE 2. Instalación por tracción de la tubería flexible estructural PRIMUSLINE

La tubería flexible se posiciona de tal manera que pueda desenrollarse desde la bobina directamente dentro de la tubería de fundición gris. Se ancla un extremo al cable de acero y se tira del mismo con el cabrestante hasta que la tubería llega al punto de extracción. Una vez la tubería *PrimusLine*



Proceso de limpieza con rascador



Proceso de limpieza con disco de goma

Figura 11.15. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE / SINZATEC.



Posicionamiento de tambor de tubería



Vista de tambor de tubería Primusline



Inserción de tubería plegada en tubería de acero



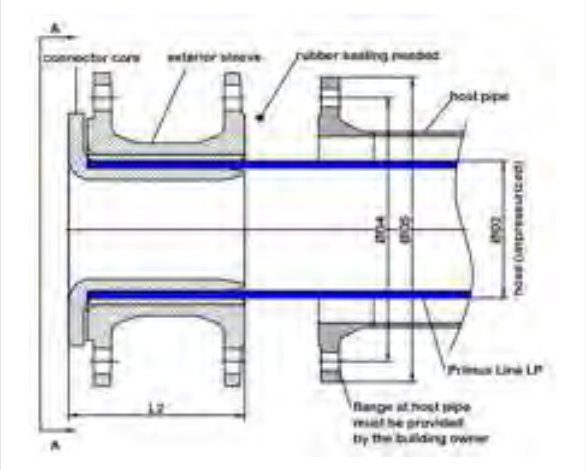
Inflado para apertura de tubería Primusline mediante inyección aire comprimido (0,5bar)

Figura 11.16. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE / SINZATEC.

se ha colocado en su posición final, se instalan balones obturadores en sus extremos para luego a través de uno de ellos inyectar aire dentro de la conducción para inflarla y "abrir" la tubería insertada plegada (Figura 11.16).

FASE 3. Instalación de piezas de anclaje / conectores PN16 PrimusLine

Posterior a la instalación de las reducciones en los extremos de la tubería, se instalan los primeros componentes de las piezas de anclaje, llamados "manga externa". La tubería flexible que sobresale de la manga externa se corta a medida para la instalación del núcleo interno, el cual se instala a presión mediante el uso de un gato hidráulico, la tubería flexible queda presionada en el espacio existente entre la manga externa y el núcleo interno, tal como se ve en la figura.





Primera pieza de anclaje (manga externa) + anillo de presión



Instalación núcleo interno a presión

Figura 11.17

FASE 4. Prueba de presión

Una vez que ha solidificado la resina, se realiza una prueba de presión con agua en la tubería a una presión de 9 bares, que se mantiene invariable durante una hora (Figura 11.18).





Instalación de bridas ciegas y apuntalamiento



Instalación de acometida para llenado de tubería



Llenado de la tubería y puesta en presión de prueba

11.18. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE / SINZATEC.

11.3.3. Experiencia N.º 3

ARTERIA FUNDICIÓN GRIS DN1000 - GLOBAL OMNIUM

Material: Fundición gris, con unión emplomada. Tubería enterrada.

Diámetro: DN1000

Procedimiento de ejecución (Figura 11.19):

1. Preparación de la zona de trabajo. Excavación y acondicionamiento de zanja.
2. Corte y retirada de tubería afectada.
3. Sustitución por tubo de Fundición Dúctil con manguitos de unión.
4. Instalación de nueva ventosa sobre tubería renovada.
5. Colocación de abrazadera sobre junta contigua al punto de fuga por detección de movimiento en la misma. Por el punto de fuga se inspeccionaron ambas juntas contiguas para localizar estos posibles movimientos provocados por la rotura.
6. Realización de pruebas de estanqueidad y posterior puesta en servicio.

Causas y propuestas de mejora:

La causa de esta avería es la presencia de árboles sobre la traza de la tubería. Las cargas que se trasmiten por parte de los árboles unido a las características y antigüedad del material son una combinación óptima para esta avería.

Durante la reparación se inspeccionaron las juntas aguas abajo y aguas arriba del tubo afectado, observándose movimientos diferenciales entre los tubos en uno de los lados, por lo que se instaló una abrazadera para evitar una nueva fuga durante la puesta en servicio (Figura 11.20).

Es muy importante detectar la presencia de vegetación de gran calibre para evitar la trasmisión de cargas sobre las tuberías. En este caso debido a la antigüedad de la aducción y, por tanto, a la falta de información precisa sobre la infraestructura, provoca que la tubería esté resistiendo esfuerzos para los que no ha sido diseñada.



Figura 11.19.



Figura 11.20.

11.3.4. Experiencia N.º 4

ARTERIA FUNDICIÓN GRIS DN600 - GLOBAL OMNIUM

Material: Fundición gris, con unión emplomada. Tubería enterrada.

Diámetro: DN600

Procedimiento de ejecución:

1. Preparación de la zona de trabajo. Excavación y acondicionamiento de zanja.
2. Instalación de protección taludes de excavación mediante sistema de entibado.
3. Corte y retirada de tubería afectada.
4. Sustitución por tubo de FD con manguitos de unión.
5. Realización de pruebas de estanqueidad y posterior puesta en servicio.





Causas y propuestas de mejora:

La causa de esta avería son los asientos diferenciales que se pueden producir tras una reparación. Esta fuga se produjo poco tiempo después de una reparación previa. En la zona donde hay fuga previa, se suelen producir blandones en el terreno. Si la reparación correspondiente no se afianza de manera adecuada se pueden producir estos asientos diferenciales.

Para evitar este tipo de problemas es muy recomendable que en el entorno de cualquier reparación se afiance de modo que no se produzcan estos asentamientos posteriores que dan lugar de nuevo a problemas.

11.3.5. Experiencia N.º 5

ARTERIA FUNDICIÓN GRIS DN600 - GLOBAL OMNIUM

Material: Fundición gris, con unión emplomada. Tubería enterrada.

Diámetro: DN600

Procedimiento de ejecución (Figura11.21):

1. Preparación de la zona de trabajo. Excavación y acondicionamiento de zanja.
2. Instalación de protección taludes de excavación mediante sistema de entibado.
3. Corte y retirada de tubería afectada.
4. Sustitución por tubo de FD con manguitos de unión.
5. Realización de pruebas de estanqueidad y posterior puesta en servicio.

Causas y propuestas de mejora:

La causa de esta avería es únicamente la vida útil de la conducción y unas presiones de trabajo próximas a la presión máxima de trabajo de la misma. A todo ello se une una gran profundidad de instalación, con las sobrecargas del terreno correspondientes.

Para evitar este tipo de roturas es recomendable realizar renovaciones preventivas de la red.





11.20.

12 Tuberías hormigón armado

12.1. Introducción

El tubo de hormigón armado con camisa de chapa es el formado por una pared de hormigón y una armadura transversal, compuesta por una o más jaulas cilíndricas y una camisa de chapa de acero soldada, que, además, es la encargada de garantizar la estanquidad. Normalmente la camisa de chapa está situada más próxima al paramento interior que las armaduras y entre este paramento y la camisa pueden disponerse armaduras transversales y longitudinales o bien un mallazo, dependiendo del diámetro del tubo.

Recubrimiento interior: Esta capa es de hormigón, generalmente en masa, aunque en algunos casos puede ir ligeramente armado, especialmente en tuberías de gran diámetro o incluso armado únicamente en los extremos del tubo (1 m por cada lado) con tela gallinera, esta capa se suele aplicar por centrifugado, se aplica haciendo girar la camisa de chapa elaborada previamente e ir vertiendo por capas sucesivas el mortero o micro-hormigón que la compone hasta llegar al grueso deseado, a partir de Ø interior 1100 mm. El recubrimiento interior se aplica por vertido vertical sobre encofrado y vibrado.

El espesor varía en función del diámetro siendo como mínimo 20 mm.

La función de esta capa es la de aparte de dar rigidez al conjunto, proteger de incrustaciones y de la corrosión a la camisa de chapa en función del tipo de aguas que discurren por la tubería.

La evolución de este proceso apenas ha tenido variaciones con el tiempo.

Camisa de chapa: Su función principal y por la que fue diseñada originalmente por A. Bonna, diferenciando estos tubos de los de J. Bordenave, es la de dar estanqueidad a las tuberías.

De no existir esta camisa, se producen exudaciones en la tubería, además, recordemos que el hormigón no es un material totalmente impermeable y es fácil que se produzcan pequeñas fisuras por donde saldría el agua. Otros fabricantes que no han utilizado la camisa de chapa han utilizado mezclas muy ricas en Cemento Portland, o han aplicado enlucidos interiores muy ricos en cemento, con el riesgo de fisurarse por la alta retracción que se produce.

O incluso como hizo José Eugenio Ribera, esperar a que las propias sustancias que transporta el agua en el caso de aguas incrustantes colmaten la superficie interior al paso de un tiempo garantizando así la estanqueidad.

De todo esto la experiencia nos dice, sin dar lugar a ninguna duda, que el método de la utilización de

la camisa de chapa es el más fiable y que, además, comporta colaborar mecánicamente con la tubería al integrar una superficie de acero que trabajará conjuntamente con las barras del armado de la tubería. El espesor de la camisa varía en función de las necesidades de cada tubería, el armado con redondos tiene limitaciones en cuanto a que los espesores de hormigón están normalizados y dependiendo de la cuantía no es posible introducir el número de barras necesarias, es en ese momento cuando la camisa de chapa tiene un valor relevante, ya que lo que hacemos es variar el espesor de ésta hasta obtener la cantidad de acero necesaria en esa sección.

La conformación de la camisa ha variado a lo largo de los tiempos, haciéndose hasta la década de 1980 mediante la unión de cuatro cilindros de chapa de un metro de longitud, unidos por cordones longitudinales y transversales, hasta la década de los años 60 con soldadura autógena, y de esta fecha en adelante con soldadura tipo MIG. En épocas de mucha demanda y restricciones de materiales, la camisa de algunos tubos se fabricaba empleando retales sobrantes de otras camisas y soldándolos entre sí para conformar nuevos cilindros que unidos conformarían la camisa de chapa de un tubo.

A partir de la década de 1980, el proceso se moderniza, fabricando la camisa con máquina automática de forma helicoidal, haciendo las soldaduras con el sistema MIG.

Recubrimiento exterior: Esta capa tiene la misión de aportar resistencia mecánica a la tubería y a su vez de proporcionar la protección necesaria a todas las partes metálicas de la acción de los posibles agentes externos agresivos que se encuentren en el ambiente de donde está instalada. En esta capa es donde se alojan principalmente las armaduras, distribuyéndose en barras longitudinales (Generatrices) y transversales en forma de espiral (Espiras). En estos armados sí que vemos una evolución muy importante, hasta los años treinta del siglo veinte tenían forma de cruz, momento en que pasaron a ser redondos lisos.

El hecho de que estas barras tuviesen forma de cruz mejoraba la adherencia de estas con el hormigón.

Las Generatrices tienen la función de armadura de montaje, además de trabajar como armaduras de flexión. La experiencia nos ha enseñado que los fabricantes variaban la cuantía de la armadura longitudinal en función del terreno donde iba el tubo instalado o, si este iba sobre apoyos, pudiendo soportar los esfuerzos a flexión que se producen sobre la tubería.

Las espiras también cambian de diámetro y separación en función de las cargas que ha de soportar la tubería (presión, tierras y tráfico).

Cuando con las espiras no obtenemos la cuantía suficiente para soportar los esfuerzos, se aumenta el espesor de la camisa de chapa hasta conseguir la cantidad de acero suficiente para soportar los esfuerzos.

Un aspecto a tener en cuenta es la resistencia de las barras de acero y la camisa. El acero empleado históricamente para la confección de la camisa de chapa es un acero equivalente a S-235JR (2.350 MPa) de límite elástico. El acero de los redondos hasta la década de 1980 eran barras lisas de acero del tipo A-37 (2.200 kp/cm^2) de límite elástico. Vemos que la resistencia de ambos aceros es similar, por lo que podemos calcular la cuantía fácilmente. En cambio, a partir de la década de 1980, se empiezan a emplear para el armado transversal barras corrugadas de acero AEH-4000 S, equivalente al actual B-400 S, cuyo límite elástico es de 400 MPa, por lo que existirá una diferencia importante entre la chapa y la camisa. Más tarde, debido a la dificultad de obtener barras del tipo B-400 S y la poca diferencia de precios entre estos dos tipos, se empleó hasta la actualidad el tipo B-500 S (500 MPa) de límite elástico, aunque se ha aumentado la resistencia de las barras hasta doblarla, los métodos de cálculo de los fabricantes apenas han variado, ya que han tomado un límite elástico de los redondos y la chapa de cálculo de entre 1.200 kp/cm^2 y 1.400 kp/cm^2.

Esto ha dado lugar a tener un coeficiente de seguridad mucho más elevado en las tuberías fabricadas a partir de la década de 1980.

La capa de hormigón que forma el recubrimiento exterior depende del diámetro interno de la tubería, manteniéndose constante independientemente de la carga que ha de resistir la tubería.



Figura 12.1. Conformación de camisa de chapa por curvado de la chapa en tramos de 1 m.



Figura 12.2. Unión de los diferentes tramos de 1m o la combinación de parches hasta formar la camisa de chapa de un tubo completo.



Figura 12.3. Formación de camisa helicoidalmente con máquina automática.

Para su cálculo, fabricación, control e instalación deberá cumplirse lo especificado por las siguientes normas e instrucciones: UNE-EN 639, UNE-EN 641, UNE-EN 642, Instrucción del Instituto Eduardo Torroja para tubos de hormigón armado o pretensado (IET) e Instrucción de Hormigón Estructural (EHE).

Las tuberías de hormigón armado con camisa de chapa podrán utilizarse en conducciones de diámetro igual o superior a 1.000 mm. Es recomendable su uso en conducciones en las que se puedan producir acciones ovalizantes importantes y en las que se prevean pocas derivaciones.

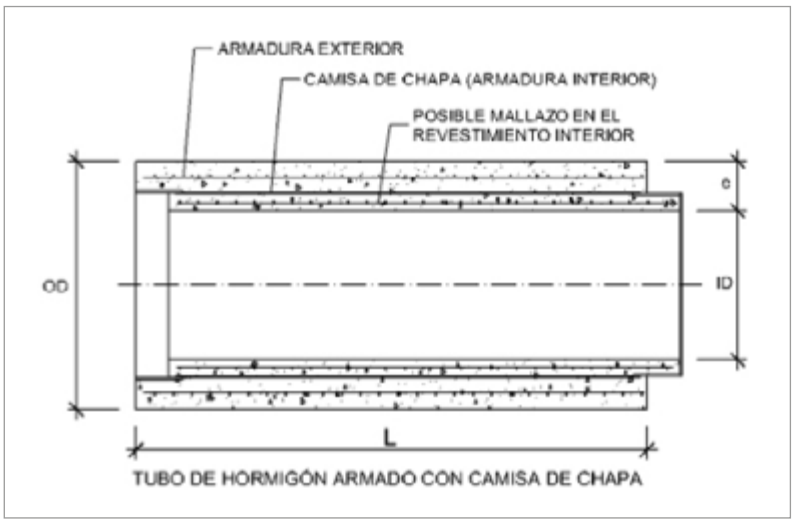
Los materiales a emplear en los tubos de hormigón armado (cemento, agua, áridos, aditivos, adiciones, acero para armaduras pasivas y chapas de acero) deberán cumplir:

- Cemento: El cemento a emplear deberá cumplir con lo especificado por la vigente Instrucción para la Recepción de Cementos. En ningún caso se deberá utilizar cemento aluminoso.
- Hormigón: Se emplearán hormigones cuya resistencia característica no sea inferior a 35 N/mm^2.
- Armaduras pasivas: En general, las barras o alambres de las armaduras pasivas deberán ser de los siguientes diámetros: 6, 8, 10 y 12 mm y el acero a emplear será de calidad soldable, cuando sea preciso. Las barras corrugadas cumplirán con la norma UNE 36068 y las mallas electrosoldadas con la UNE 36092.

  En la armadura principal (transversal) se utilizarán barras o alambres corrugados, mientras que en la armadura auxiliar (longitudinal) se utilizarán aceros lisos.

- Chapa de acero: La chapa empleada en las camisas de los tubos de hormigón armado o pretensado, debe ser de acero dulce y espesor uniforme (en ningún caso inferior a 6 mm).

Para su fabricación podrán emplearse chapas de tipo S-235 JR (UNE-EN 10025) o de calidad superior.



Los sistemas de unión de los tubos de hormigón podrán ser alguno de los que se indican a continuación, los cuales deberán ser conformes con lo especificado para los mismos en la norma UNE-EN 639:

- Uniones rígidas (uniones soldadas).
- Uniones flexibles con anillo elastomérico.

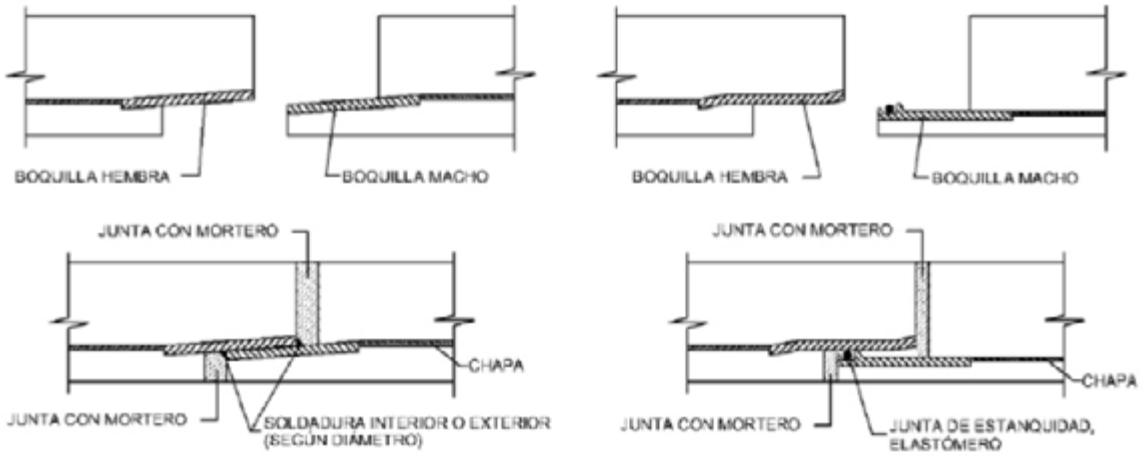


Figura 12.4. Unión rígida (izquierda) y flexible (derecha) en los tubos de hormigón.

Las desviaciones angulares admisibles son las indicadas en la siguiente tabla:

DN	Uniones flexibles
DN ≤ 1.000	1º 09'
DN > 1.000	1º 09' x 1.000/DN

12.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación

12.2.1. Corrosión y protección catódica de tuberías enterradas de hormigón armado

La protección contra la corrosión de las tuberías de hormigón armado se basa en que el pH alcalino del hormigón logra la pasividad del acero de las armaduras y de la camisa de chapa. En estas condiciones el acero de una tubería enterrada de hormigón armado no debería sufrir corrosión.

En ciertos casos, por diversas razones como pueden ser, por ejemplo, la carbonatación del hormigón o la presencia de cloruros se pierde la pasivación del acero y aparece la corrosión del acero embebido en hormigón.

Como indica la norma ASTM C876 "Standard Test Method for corrosion potentials of Uncoated reinforcing steel in concrete", en ciertos casos es posible saber si las armaduras del hormigón armado están pasivadas o no, midiendo su potencial electroquímico.

Si el potencial de una zona de la estructura de hormigón armado, medido respecto a un electrodo de referencia de $Cu/CuSO_4$ es más positivo de -0,20 V, existe más de un 90% de posibilidades de que el acero esté pasivado y de que no ocurran fenómenos de corrosión.

Si el potencial está comprendido entre −0,20 y −0,35 V, el riesgo de corrosión del acero en esa área es incierto.

Si el potencial en un área es más negativo de −0,35 V, existe más de un 90% de posibilidades de que exista un proceso de corrosión activo

Cuando en una tubería enterrada existente de hormigón armado que tenga continuidad eléctrica longitudinal se detecta un proceso de corrosión externa o se sospecha que puede producirse, una solución para detenerlo puede ser diseñar e instalar un sistema de protección catódica de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 12696:2017 "Protección catódica del acero en el hormigón".

12.3. Experiencias

12.3.1. Experiencia Nº 1 – Reparación juntas fibra de vidrio y refuerzo estructural fibra de carbono

ARTERIA RETAMARES DN1250 – CANAL DE ISABEL II. REPARACION DE JUNTAS MEDIANTE POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO Y REFUERZO ESTRUCTURAL DE TUBERIA MEDIANTE POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO SEGÚN NORMA AWWA C305.

Propiedad: *Canal de Isabel II*

Material: Hormigón Armado con Camisa de Chapa

Diámetro: DN1250

MOP: 9 bares



Figura 12.5. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

Antecedentes: Se produjeron en el año 2020 dos roturas consecutivas en un mismo tramo de la conducción que discurre en esta zona a una profundidad de más de 10 metros, ocasionando en cada reparación movimientos de más de 1200 m^3

de tierra y un coste de reparación importante. Se decidió, por tanto, aislar este tramo de conducción y proceder al suministro por red alternativa y analizar el estado de las tuberías.

Solución elegida: Polímeros reforzados con fibra = material ligero de alta resistencia y adherencia estructural soportado por normativa

Aunque la tecnología de materiales composite es ampliamente utilizada y entendida por sectores que incluyen automoción, aeroespacial o ingeniería civil y construcción, su uso para la reparación de tuberías, hasta la publicación de normas ASME e ISO en especial para aplicaciones exteriores en tuberías industriales, y el estándar AWWA C305 para aplicaciones interiores en grandes tuberías se basó en la experimentación más que en el diseño matemático. Estos estándares marcan el grado de exigencia y amparan los sistemas CFRP permitiendo a CANAL DE ISABEL II recurrir a estas soluciones sin zanja innovadoras con seguridad y garantía de fiabilidad y durabilidad.

Para aplicaciones de este tipo, es decir, aplicación interna de PRF en tubería presión de hormigón armado, la norma de referencia es la AWWA C305-18, que dicta con independencia y precisión el tipo de materiales, el cálculo de dimensionamiento, el método de aplicación y los controles de calidad a realizar. Los sistemas PRF son soluciones de tecnología sin zanja con un desarrollo importante desde hace más de 20 años en EEUU, y CANAL DE ISABEL es precursor en Europa en recurrir a este tipo de sistemas para las reparaciones y rehabilitaciones estructurales de sus grandes conducciones.

Los sistemas PRF se definen como refuerzos ligeros de alta resistencia, basados en la aplicación sobre estructuras de materiales constituidos por fibras de refuerzo de carbono o de vidrio, que se combinan en obra con resinas estructurales epoxi de alto rendimiento (material polimérico).

Los materiales compuestos FRP, cuando son conformes y certificados según normativa, destacan por la asociación única de un material extremadamente fuerte e inamovible que tiene una ratio resistencia/peso incomparable (50 veces superior al acero) con la característica de una adherencia estructural.

En el caso de tuberías, estos laminados de mínimo espesor y de alto rendimiento se pueden aplicar sobre superficie interior aportando, además, protección duradera contra la corrosión interna, o exterior con la ventaja de poder aplicarse sin parar el servicio.

Aplicación en la Arteria Retamares – Introducción (Figura 12.6): El enfoque de la rehabilitación ha sido el de optimizar el buen estado general de este tramo de más de 250 metros enfocando las reparaciones en las zonas deterioradas o con riesgo de deterioro en el futuro. Las dos roturas surgieron en juntas de tubería, siendo estas uniones identificadas como puntos de riesgo. Tras un análisis profundo se optó por tres tipos de actuaciones.

Reparación FRP Tipo 1: Reparacion estructural independiente según AWWA C305

Se realizo rehabilitación estructural continua en una longitud de aprox. 30 metros, correspondiente a la zona de roturas. El modelo de cálculo fue de una hipótesis independiente (“totalmente estructural”) validado por el método AWWA C305. Los tubos en esta zona presentaban asentamiento significativo, roturas en juntas, corrosión del cilindro, agrietamiento del hormigón interno, probablemente corrosión de los componentes estructurales que son las armaduras externas. El método de saturación es mecanizado y la aplicación de capas realizada de manera manual, asegurando así el control en todo momento de la correcta aplicación de cada capa y siguiendo las prescripciones de ejecución de la norma AWWA C305 (Figura 12.7).

Material: Sistema CFRP TYFO SCH41-2X-S compuesto de tejido unidireccional de espesor nominal 2mm, densidad mínima de fibra 1424 g/m^2 y resina epoxi TYFO S libre de componentes orgánicos volátiles. El *composite* final tiene resistencia a tracción mínima de 986 MPa, módulo de tensión



Figura 12.6. Estado inicial de la tubería. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

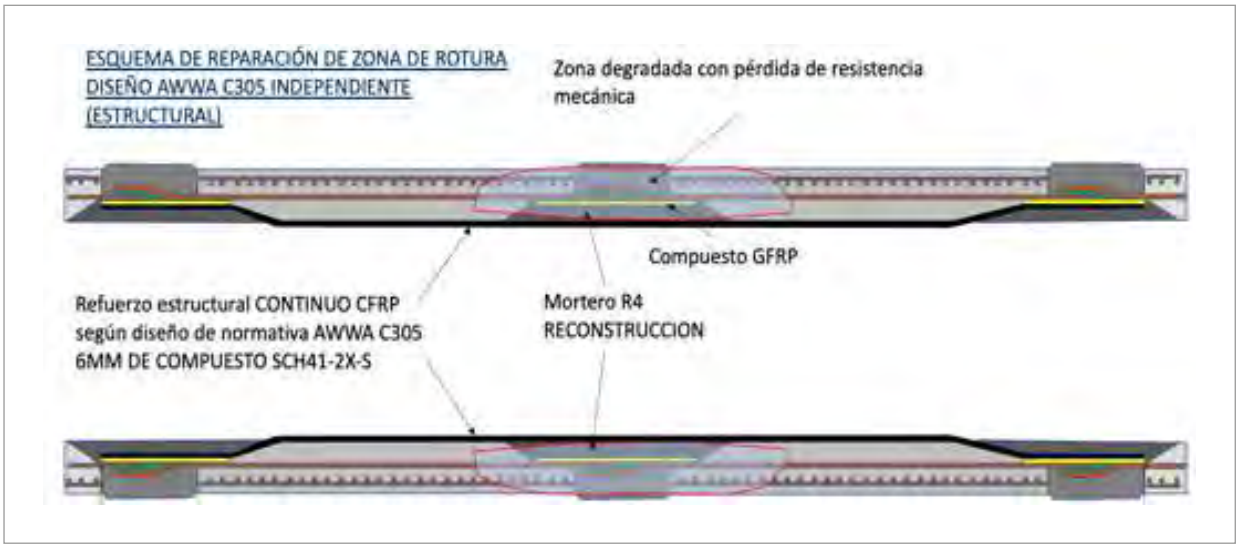


Figura 12.7. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

95,8 MPa. El material responde explícitamente a todas las exigencias normativas en cuando a propiedades mecánicas, físicas, de durabilidad y de experiencia, así como en su proceso de instalación y los controles de calidad realizados.

Diseño: el cálculo según AWWA C305 confirma la siguiente construcción a aplicar: 2 capas de *composite* Tyfo SCH41-2X en sentido circunferencial y 1x capa del mismo *composite* en sentido longitudinal.

Tabla 12.1. Características mecánicas de compuesto CFRP. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE

Composite Gross Laminate Properties			
Property	ASTM Method	Typical Test Value	Design Value
Ultimate tensile strength in primary fiber direction	D3039	143,000 psi (986 MPa) (11.4 kip/in. width)	121,000 psi (834 MPa) (9.6 kip/in. width)
Elongation at break	D3039	1.0%	0.85%
Tensile modulus	D3039	13.9 x 10^6 psi (95.8 GPa)	11.9 x 10^6 psi (82 GPa)
Flexural strength	D790	17,900 psi (123.4 MPa)	15,200 psi (104.8 MPa)
Flexural modulus	D790	452,000 psi (3.12 GPa)	384,200 psi (2.65 GPa)
Longitudinal compressive strength	D3410	50,000 psi (344.8 MPa)	42,500 psi (293 MPa)
Longitudinal compressive modulus	D3410	11.2 x 10^6 psi (77.2 GPa)	9.5 x 10^6 psi (65.5 GPa)
Flexural falture strain	D790	1.0%	0.85%
Longitudinal coefficient of thermal expansion	D696	3.6 ppm./ºF	
Transverse coefficient of thermal expansion	D696	20.3 ppm./ºF	
Nominal laminate thickness	D1777	0.08 in. (2.0 mm)	0.08 in. (2.0 mm)

Procedimiento de ejecución:

1. Control de condiciones de aplicación por ventilación forzada y calefactores (Figura 12.8).
2. Preparación de superficie: chorreado sobre superficie de hormigón hasta condición de superficie de hormigón CSP3. En cada extremo de la zona de aplicación se elimina el mortero de las juntas dejando superficie metálica en cada terminación. Esta superficie final se prepara por medios abrasivos hasta condición SA2,5 (metal casi blanco) (Figura 12.9).
3. Aplicación de refuerzo CFRP Tyfo SCH41-2X según diseño y método de aplicación normativos: aplicación por método húmedo con saturación de fibra mecanizado, instalación y control de ejecución manual capa por capa (Figuras 12.10 y 12.11).
4. Las terminaciones de aplicación se realizan en uniones de tubo sobre cilindro de acero, siguiendo recomendaciones normativas. Tras esta aplicación se reconstruye la junta con mortero estructural R4.

   La norma AWWA C305 define explícitamente el proceso de aplicación del refuerzo de CFRP en los puntos de terminación de aplicación de refuerzo CFRP, con el objetivo de impedir la penetración de agua entre el hormigón y el composite instalado. Para ello es imprescindible realizar terminación de refuerzo sobre el cilindro de acero. Se presenta aquí detalle en esquema (Figura 12.12).



Figura 12.8. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.



Figura 12.9. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

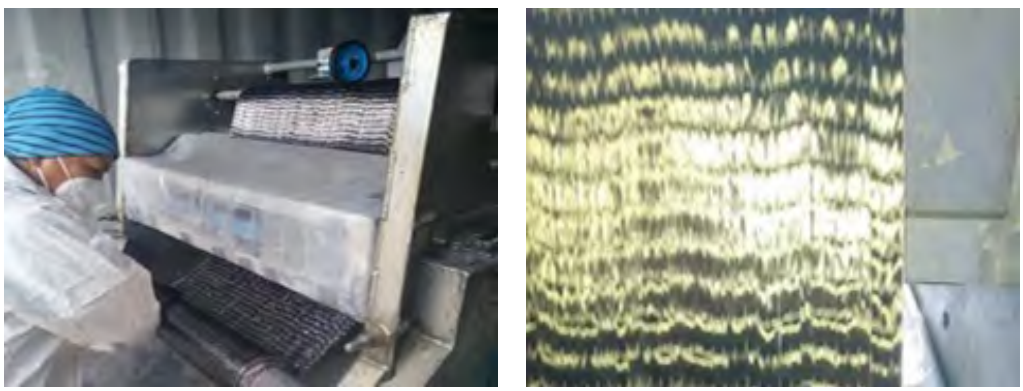


Figura 12.10. Proceso mecanizado de saturación de tejido de carbono unidireccional de espesor nominal 2 mm por capa, según requisito AWWA C305.
Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE

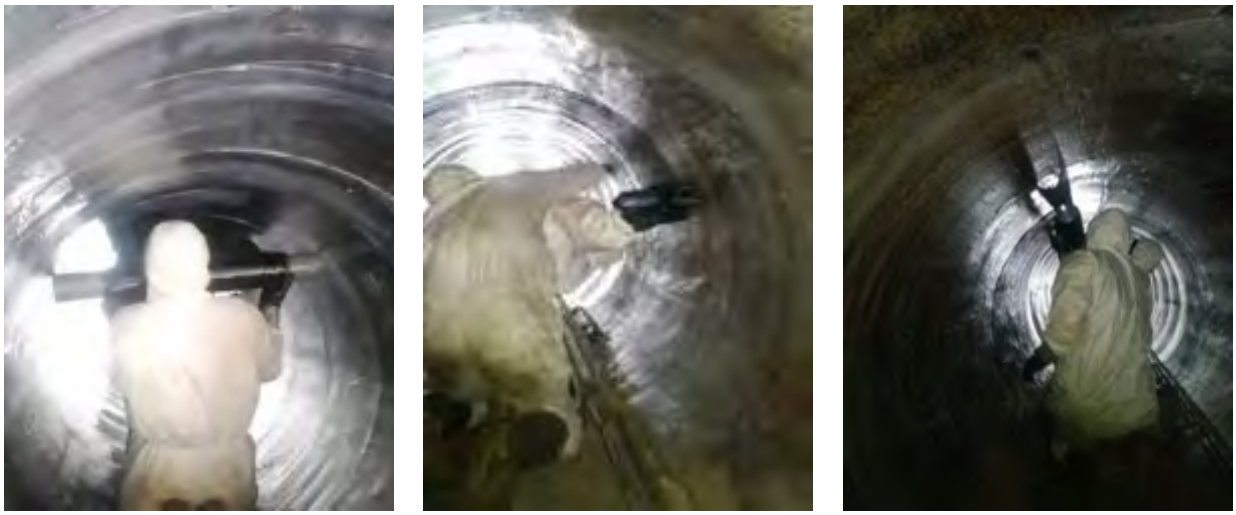


Figura 12.11. Aplicación por método húmedo – capa circunferencial y longitudinal. Aplicación manual que permite control continuo de ausencia de vacío y de sentido de las fibras, según exigencias AWWA C305. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

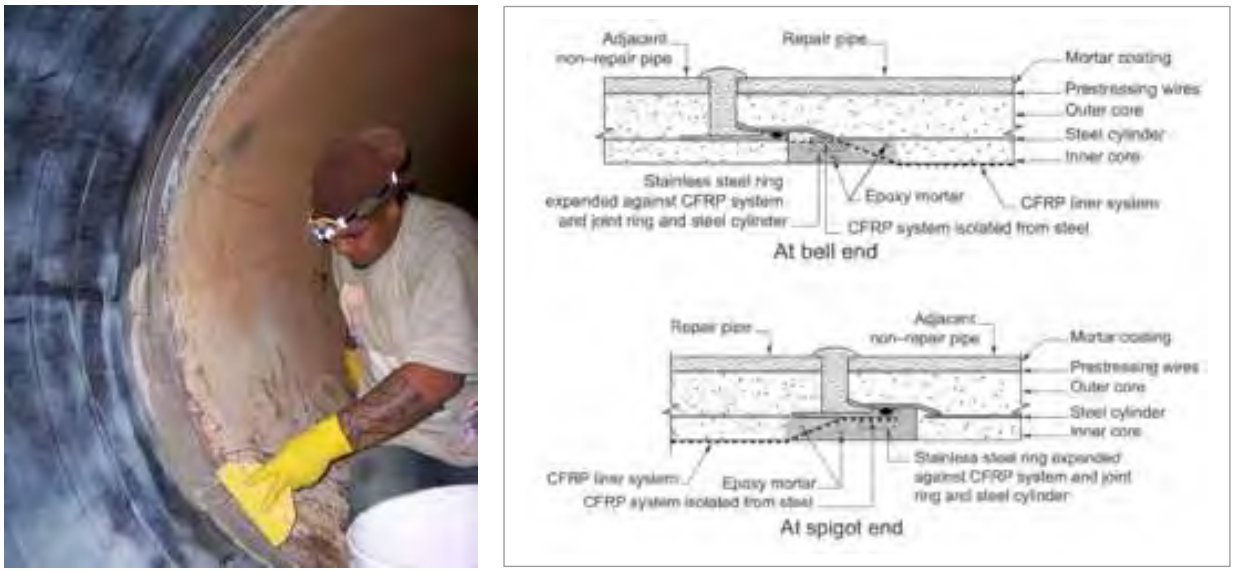


Figura 12.12. Esquema de aplicación en terminación – Norma AWWA C305.

2. *Control de calidad.* Se realiza control continuo capa por capa de la aplicación por verificación de alineamiento de tejido de fibra instalado y por inspección de huecos o delaminaciones. Se realizan muestras de materiales diariamente y se procede a ensayo de tracción unidireccional en laboratorio independiente confirmando la validez del material instalado y los valores declarados para el diseño (Figura 12.13).



Figura 12.13. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

REPARACIÓN FRP TIPO 2: REPARACION INTERIOR LOCALIZADA DE JUNTAS DE TUBERIAS

En las juntas con índice de deterioro del mortero y probable corrosión del cilindro (que fue de hecho confirmada tras la eliminación del mortero) se procede a la reconstrucción completa de la junta: eliminación del mortero, lijado de la chapa hasta metal blanco SA2,5, aplicación de PRF de vidrio de adherencia estructural sobre cilindro de acero, reconstrucción de unión con mortero R4, aplicación final sobre >1metro de PRF de vidrio. Con ello se consigue el objetivo de reparar puntos cuyo deterioro estaba iniciado y proteger a largo plazo estos puntos frágiles de la conducción: reparar y proteger para alargar la vida útil.

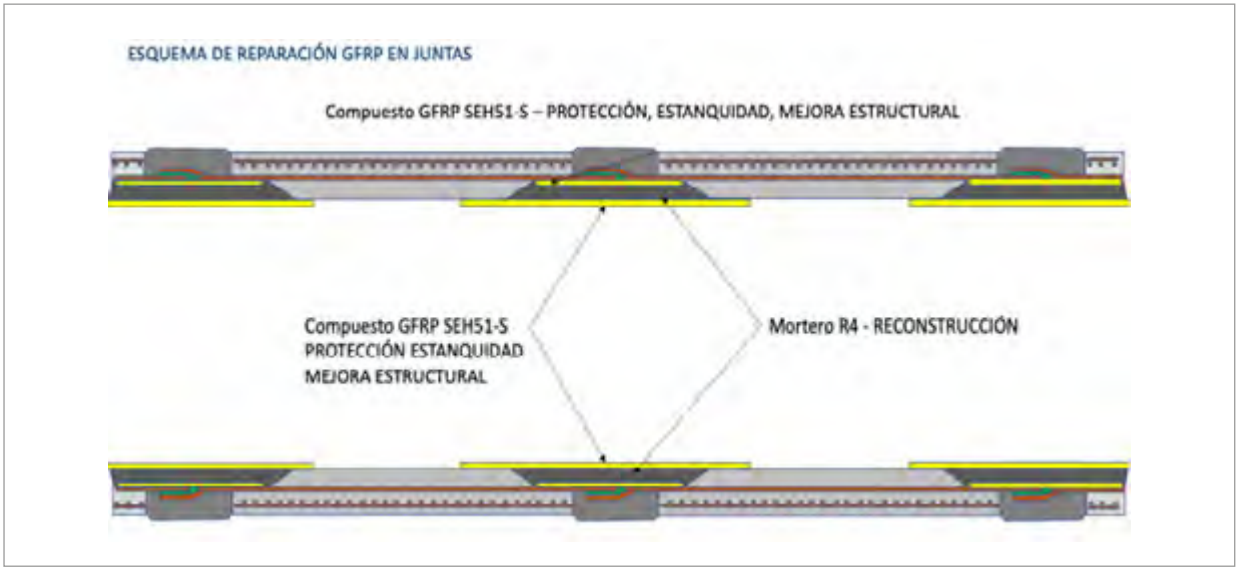


Figura 12.14. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.



Figura 12.15. Eliminación del mortero – Se confirma deterioro y corrosión de en la zona de la unión. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.



Figura 12.16. Preparación superficie de la chapa metálica. Lijado Blíster Blaster hasta metal casi blanco SA2,5. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE



Figura 12.17. Aplicación GFRP sobre cilindro de acero => estanquidad, protección, mejora mecánica. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.



Figura 12.18. Reconstrucción con mortero R4. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.



12.19. Aplicación final de compuesto vidrio SEH51-S. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

REPARACIÓN FRP TIPO 3: PROTECCION Y REFUERZO DE TODAS LAS JUNTAS DE TUBERIAS

En las juntas en las cuales no se observan ningún deterioro, que representan aproximadamente el 70% de todas las juntas del tramo de longitud 250metros, se procede a la protección de estos puntos con la aplicación de PRF de vidrio de adherencia estructural, y así conseguir el objetivo de proteger lo existente que está en buen estado y así alargar la vida útil de toda la infraestructura. El resultado final se puede apreciar en foto anterior (Figura 12.20).

Las propiedades del laminado composite de vidrio aplicadas se detallan en la Tabla 12.2.

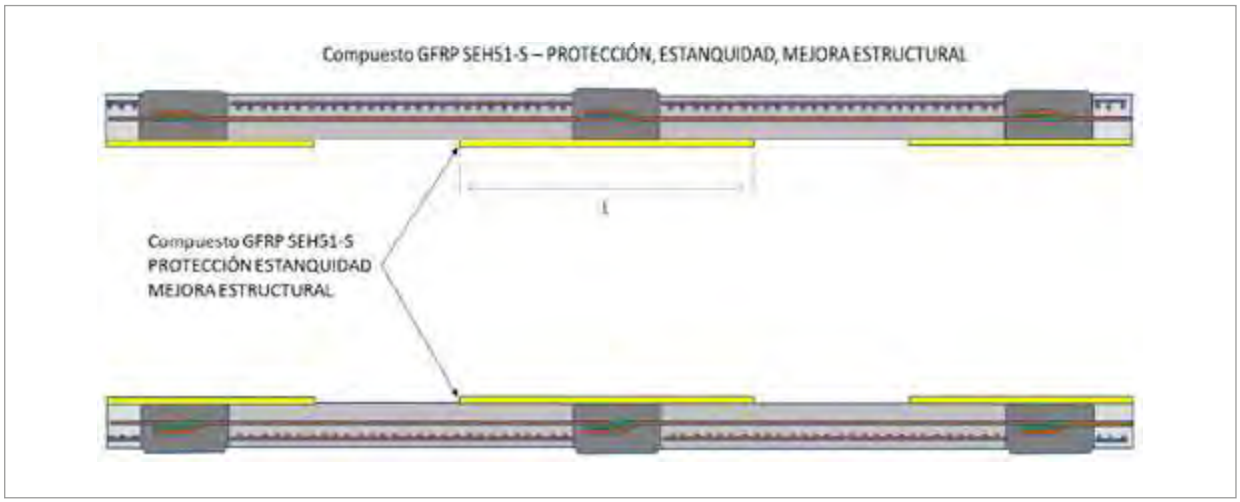


Figura 12.20. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

Tabla 12.2. Fuente: PIPELINE INFRASTRUCTURE.

Composite Gross Laminate Properties			
Property	ASTM Method	Typical Test Value	Design Value
Ultimate tensile strength in primary fiber direction, psi	D-3039	83,400 psi (575 MPa) (4.17 kip/in. width)	66,720 psi (460 MPa) (3.3 kip/in. width)
Elongation at break	D-3039	2.2%	1.76%
Tensile modulus, psi	D-3039	3.79 x 10^6 psi (21.1 GPa)	3.03 x 10^6 psi (20.9 GPa)
Ultimate tensile strength 90 degrees to primary fiber, psi	D-3039	6,250 psi (43 MPa)	5,000 psi (34.4 MPa)
Laminate thickness		0.05 in. (1.3 mm)	0.05 in. (1.3 mm)

Los sistemas PRF permiten estos enfoques de intervenciones quirúrgicas actuando con precisión sobre las partes deterioradas o las partes con mayor riesgo de desarrollo de deterioro en su vida útil restante. Esto permite optimizar presupuestos, reparar lo necesario y mantener infraestructuras que en su gran parte siguen y seguirán en buen estado, con todas las ventajas asociados una intervención sin zanja.

En caso de este proyecto, frente a los 1200 m^3 de movimiento de tierra, a los cuales se añaden el ruido, las molestias y la contaminación ocasionada, la actuación realizada supone CERO excavación ya que se utilizan las entradas de hombre existentes, CERO quejas de sus clientes, en este caso el ocupante del terreno bajo la cual discurre la tubería, con una solución de reparación definitiva y duradera.

13 Tuberías hormigón pretensado

13.1. Introducción

El PCCP (Prestessed Concrete Cylinder Pipe) se ha utilizado para redes de distribución y transporte de agua desde 1942. La primera instalación de PCCP consistió en un tipo de diseño conocido como tubería de cilindro revestido (LCP – Lined Cylinder Pipe). Un segundo tipo de diseño, tubería de cilindro integrado ECP (Embedded Cylinder Pipe), se desarrolló y se instaló por primera vez en 1953.

En Estados Unidos, noventa de cada cien empresas de abastecimiento utilizan tuberías de hormigón pretensado en las grandes tuberías o aducciones para atender la demanda.

Una tubería de hormigón con cilindro integrado PCCP típica consiste en un núcleo de hormigón que contiene una camisa cilíndrica de chapa, que le confiere estanquidad, un alambre de acero de alta resistencia que se enrolla helicoidalmente alrededor del núcleo, a una tensión previamente fijada, que se designa tensión de zunchado, y una capa exterior, de espesor y naturaleza variables, cuya misión principal es la protección del alambre.

El núcleo de hormigón y el cable pretensado son los componentes estructurales principales.

Los cables pretensados producen una fuerza de compresión uniforme en el núcleo que contrarresta las tensiones de tracción en la tubería proveniente de la presión interna del agua y de la carga de tierra.

El cable de acero de alta resistencia que no lleva protección es altamente vulnerable a la corrosión, por lo que se instala un revestimiento de mortero u hormigón que incorpora los cables en un ambiente alcalino para protegerlo de la corrosión y proporciona protección contra daños físicos.

Los estándares de diseño y fabricación de PCCP se han desarrollado gradualmente desde 1943 con el primer estándar de consenso tentativo para PCCP aprobado por AWWA en 1949. La norma AWWA C301 [2] se revisó varias veces con la última revisión publicada en 2014. En 1992, el AWWA creó un nuevo estándar para el diseño y fabricación de PCCP definido como el AWWA C304. La última versión de la norma AWWA C304 para el diseño de tubos de hormigón pretensado con cilindro también se publicó en 2014.

Actualmente en Canal de Isabel II se tiene en servicio un total de 58 km de red de hormigón pretensado.

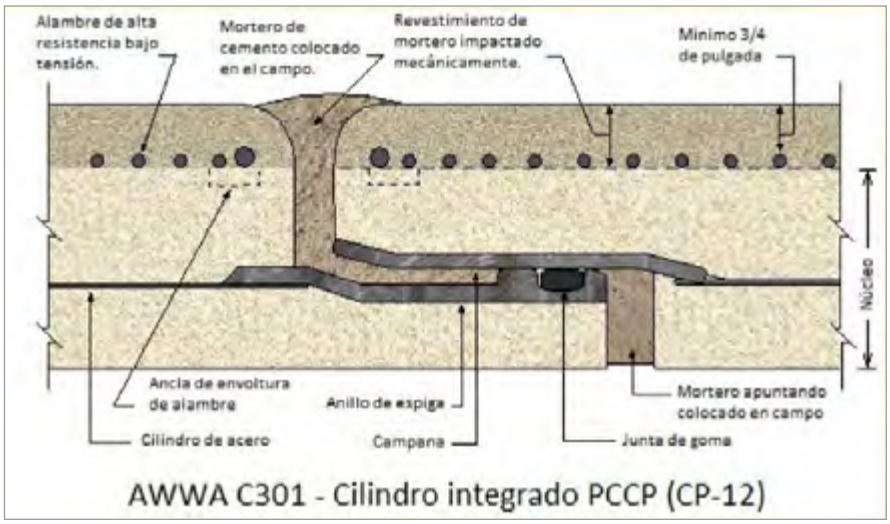


Figura 13.1. Sección transversal, conforme a la Norma AWWA.

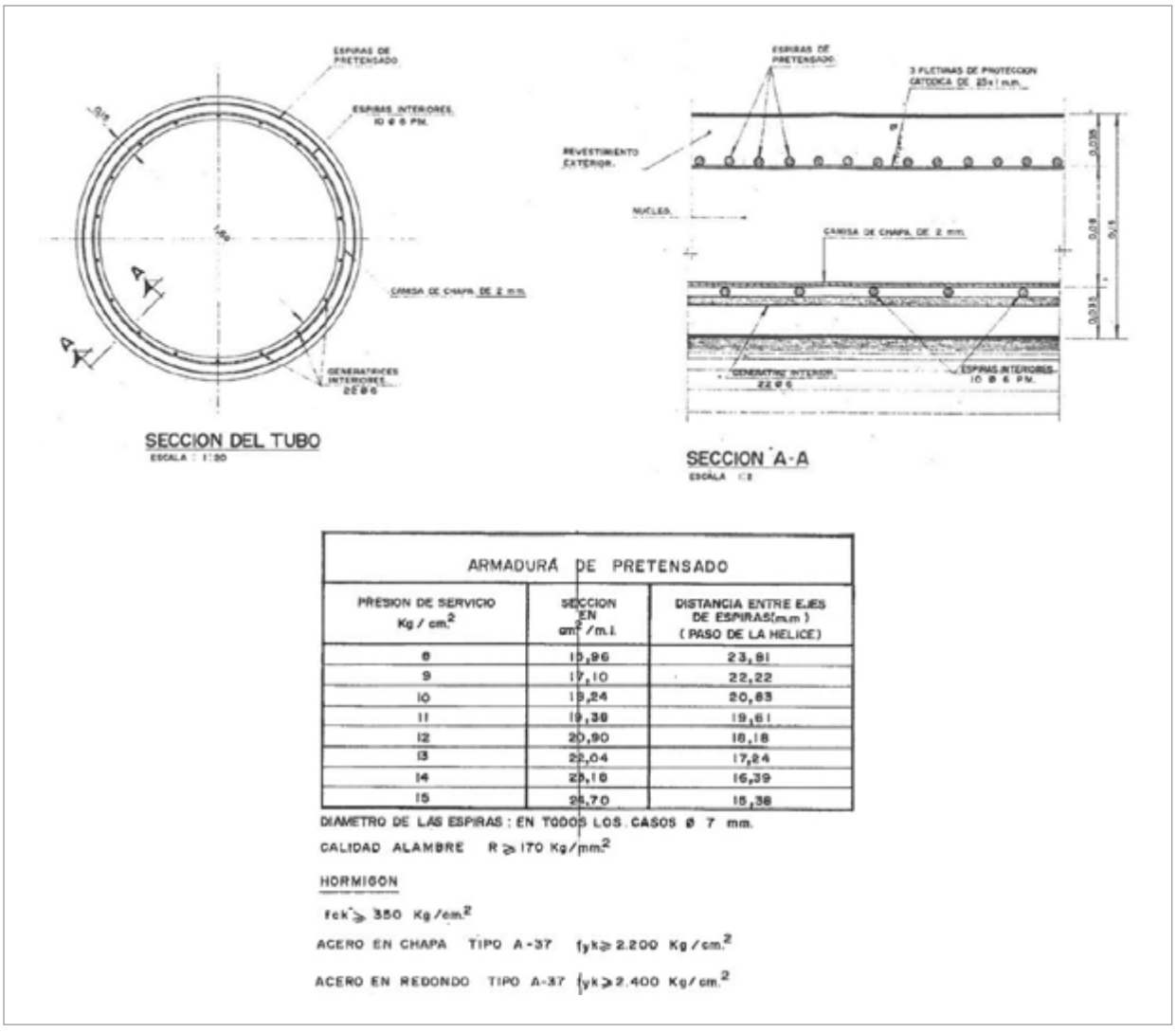


Fig. 13.2. Sección tubería hormigón pretensado.

13.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación

Las roturas en tuberías de hormigón pretensado se producen de forma imprevista y de manera explosiva. Es por esto por lo que en este tipo de canalizaciones es fundamental un análisis exhaustivo y continuado del estado en el que se encuentran las espiras del pretensado, para poder actuar de manera preventiva, evitando grandes daños y afecciones en el suministro de agua.

13.3. Experiencias

13.3.1. Experiencia Nº 1 – Reparación y rehabilitación interior con fibra de carbono

Se expone a continuación el proceso de reparación y rehabilitación que realizó Canal de Isabel II en una conducción de Hormigón Pretensado de diámetro DN 1600 mm en la Comunidad de Madrid, a raíz de una rotura en la misma.

Con fecha 21 de mayo de 2018 se produce una rotura explosiva en tubería de Hormigón Pretensado en la denominada Arteria Principal del Este, ocasionando esta, faltas de agua durante una mañana en aproximadamente un cuarto de la ciudad de Madrid.

La Arteria Principal del Este está formada por dos ramas de DN 1600 mm., izquierda y derecha, a lo largo de 15,2 km., siendo prácticamente la totalidad de esta arteria de Hormigón Pretensado.

Como consecuencia de la rotura, se decide inspeccionar esta arteria. Por ello, en julio de 2018 se procede a la realización de una inspección electromagnética a lo largo de los 15,2 km que forman la rama derecha de esta arteria.

Con esta inspección electromagnética se busca detectar para ubicar y cuantificar el número de espiras rotas de esta conducción. Estas espiras rotas podrían suponer una falta de resistencia del tubo.

El funcionamiento es muy similar a un transmisor y a un receptor de radio. El “transmisor” genera un campo electromagnético. Los elementos de acero en el tubo amplifican la señal que registra el “receptor”. Si hay espiras/armaduras rotas o deterioro del cilindro, la señal se distorsiona. Una medición de la distorsión cuantifica el número de espiras/armaduras rotas

Previamente a la inspección se realizó una calibración del sistema con tubos fuera de servicio de esta misma arteria.

Para la inspección se procedió al vaciado de la arteria y entrada del equipo en ella por las entradas de hombre existentes.





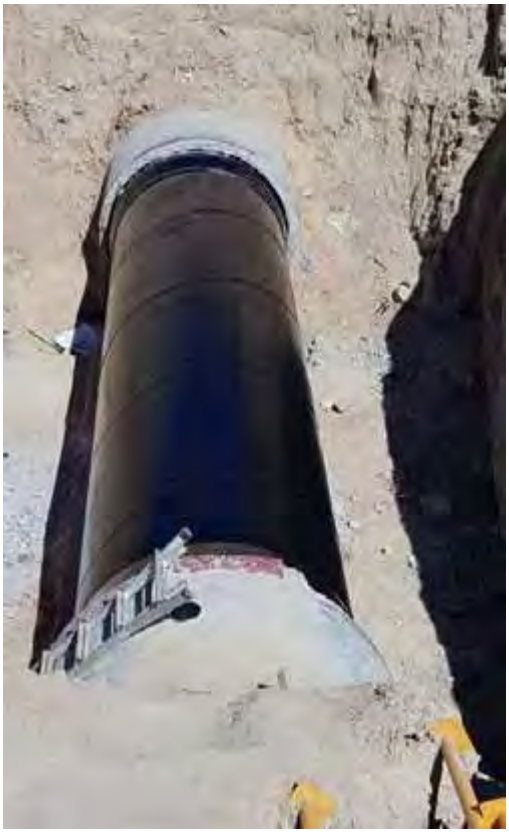


Se inspeccionaron un total de 2461 tubos, de los cuales se detectó que en 36 de ellos tenían alguna anomalía.

Durante finales de 2018 e inicios de 2019, se procedió a la sustitución o rehabilitación de los tubos dañados. Los que se encontraban en zona terriza y donde era posible, fueron sustituidos directamente a cielo abierto los tubos dañados por unos tubos nuevos de acero helicosoldado, tal y como se aprecia en las siguientes imágenes:







En otros, los que se encontraban en lugares de cierta complejidad, fueron rehabilitados mediante fibra de carbono con dos empresas distintas y especializadas en la materia, cada una con un sistema.

El primer método empleado siguió el siguiente proceso:

1. **Preparación de la superficie.** Se asegura que la superficie se encuentra seca y dentro de los parámetros indicados, realizando limpieza por medios manuales y aspiración de polvo.



2. **Imprimación y reconstrucción.** Consiste en la impermeabilización del árido descubierto y la reconstrucción de defectos y grietas mediante resina epoxi bicomponente con carga de sílice coloidal. Esta operación, además de sellar, permite uniformizar la superficie y favorecer la transmisión de cargas entre sustrato existente y fibra de carbono.

   Sobre la imprimación se coloca seguidamente un tejido temporal de protección. Este tejido evita la contaminación del sustrato durante el tránsito de los trabajadores en el interior de la tubería, y se retira únicamente la zona a trabajar en el día. Además, promueve y mejora la adhesión de la fibra de carbono creando un perfil de anclaje óptimo.



3. **Fibra de carbono y malla de distribución.** Preparación y corte de franjas de fibra de carbono autoadhesiva y de malla de distribución, ambas con extensión transversal y axial definidas, de acuerdo con el patrón de la zona a intervenir. Todo el material se prepara en unidades que puedan ser manipuladas por los trabajadores a modo de 'kits', para la correcta trazabilidad e implantación de los mismos.

   Tras la retirada del tejido de protección, colocación de fibra de carbono autoadhesiva respetando un solape longitudinal de ± 50 mm y un solape circunferencial de ± 205 mm, garantizando la continuidad del refuerzo estructural en toda la superficie.

   A continuación, colocación de malla de distribución sobre la fibra de carbono. Su misión es crear una cámara de aire para el flujo de la resina epoxi durante el proceso de impregnación de las fibras. Además, es el soporte para la instalación del sistema de infusión y vacío.



4. **Sistema de infusión y vacío.** Secuencia y colocación de material consumible que confecciona el sistema de infusión y vacío:
   - Colocación equidistante de espirales de distribución y conexiones correspondientes. La aportación de resina se realiza por los puntos inferiores, y la aspiración de vacío se introduce por los puntos superiores.
   - Colocación y cierre de bolsa de vacío, sellando los extremos con una masilla adhesiva de cierre. La bolsa de vacío sobrepasa en ambos extremos la malla de distribución.
   - Colocación de tubos de transporte de resina y aspiración de vacío, y sus conexiones correspondientes. Se comprueba la no existencia de fugas en el sistema por UT.
   - Se garantiza la correcta impregnación y consolidación por vía húmeda de las fibras, eliminando las burbujas de aire, así como excesos de resina que dan lugar a la fragilización del conjunto y con-

secuente pérdida de propiedades mecánicas.

- Se elimina el posible error producido por el factor humano derivado de la destreza del operador, cansancio en jornada laboral y/o condiciones críticas de trabajo en emplazamientos complejos como son tramos verticales, pendientes o claves en tuberías, siendo el punto más crítico la generatriz superior a lo largo de toda la conducción.

Esta tecnología permite llevar a la práctica las hipótesis extraídas en los cálculos de diseño, manteniendo una presión de vacío homogénea y constante hasta la finalización del ciclo de curado, obteniendo así las mismas propiedades mecánicas a lo largo de todo el sistema.



5. **Ciclo de curado e inspecciones.** El cambio de color en la malla de distribución indica visualmente el progreso de impregnación.

   Una vez la fibra de carbono se encuentra totalmente impregnada por saturación, se inicia el ciclo de curado a temperatura ambiente y a una presión de vacío constante entre -0,7 y -0,85 bar, obteniendo una capacidad estructural homogénea con las mismas propiedades mecánicas en toda la superficie.

   Los trabajadores no están expuestos a la inhalación de vapores provenientes de la resina empleada de forma continuada, minimizando completamente el tiempo de exposición.

   La fracción de volumen fibra/resina se corresponde con 60-70% fibra y 40-30% resina, siendo la proporción óptima de trabajo en un refuerzo estructural con material compuesto, garantizando seguridad, calidad y fiabilidad de la aplicación.

   A continuación, retirada de material consumible e inspección de la fibra de carbono:

   - Comprobación de la correcta orientación de las fibras.
   - Ausencia de fibras no impregnadas o expuestas.

- Ausencia de imperfecciones o sustancias foráneas al sistema.
- Ausencia de delaminaciones y oclusiones de aire o burbujas por medio de taqueo con maza metálica y con maza de goma dura o nylon.
- Comprobación de dureza Shore D mediante durómetro, valor entre 72-85 Shore D.

Finalmente, tras el proceso de curado, se espera obtener las siguientes propiedades mecánicas:

- Resistencia a tracción: 547 MPa
- Módulo de tracción: 50 GPa
- Resistencia a compresión: 275 MPa
- Módulo de compresión: 42,4 GPa



6. **Recubrimiento de protección de agua potable.** Finalmente, y tras las inspecciones correspondientes, validación de la implantación de la fibra de carbono y aplicación de recubrimiento de protección apto para agua potable, a brocha o rodillo.

   Se emplea un recubrimiento nanocerámico de baja fricción superficial con carga cerámica diseñado contra agentes abrasivos y corrosivos, para minimizar cualquier incrustación del fluido circulante. Inspección de película húmeda mediante galga normalizada tipo peine, espesor ±250-350 µm.

   El ciclo de curado del recubrimiento de protección se realiza a temperatura ambiente. Tras la inspección final visual, validación de la aplicación de recubrimiento.



El segundo método empleado siguió el siguiente proceso:

1. Antes de comenzar las reparaciones, se estudian las condiciones de la tubería existente, estableciendo planes de Seguridad y Salud, comprobando si hay presencia gases peligrosos, y preparando sistemas de ventilación.



2. En tuberías de hormigón, se prepara la superficie en general mediante uso de sistema de chorro de agua a alta presión eliminando aprox. 1-2 mm de espesor de hormigón en la superficie interna. En tuberías metálicas, es necesario eliminar el revestimiento interior existente y realizar un tratamiento abrasivo.




3. Control Continuo de humedad de superficie, temperatura y punto de rocío. Se aislará la zona de aplicación y se usarán equipos tales como deshumificadores y calefactores.




4. En la fase de saturación de las fibras, las resinas epoxi de dos componentes se mezclan en la obra en una zona protegida. Una vez saturado, el compuesto debe aplicarse en tres horas. Se enrollan habitualmente las bandas de fibra ya saturadas sobre rodillos.

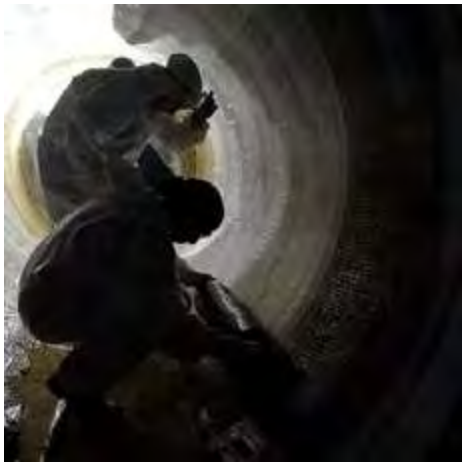



5. Tras la preparación del substrato, se aplica una primera capa de imprimación que prepara la superficie interna de la tubería a recibir el compuesto.



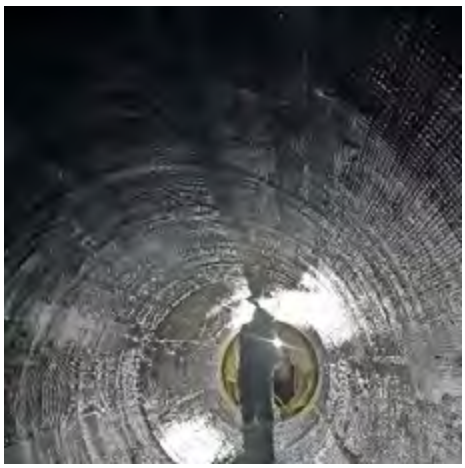


6. Los rodillos saturados de material compuesto se aplican sobre la pared de la tubería. Cuando el compuesto se aplica en la dirección circunferencial, se refuerza la tubería en tensión circunferencial. Cuando el compuesto se aplica en la dirección longitudinal, se logra resistencia al momento de flexión.



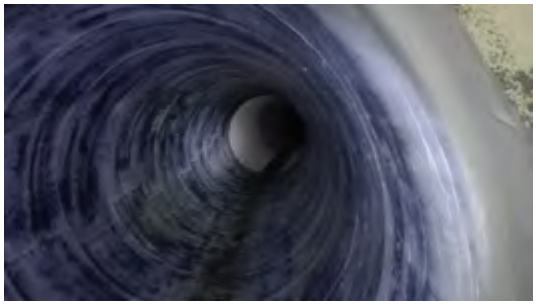






7. Aplicación de juntas de cierre.





8. Control de Calidad. Se hace control de Dureza Shore, control visual, control auditivo, en busca de oquedades o vacíos y prueba de adherencia de arrancado, realizando muestras en mismas condiciones y de los mismos lotes.





Posteriormente a estas reparaciones, este tramo de la Arteria Principal del Este fue puesto en servicio, y hasta el día de hoy no ha habido ningún problema con estas reparaciones.

14 Tuberías PRFV

14.1. Introducción

Las tuberías de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) se comenzaron a utilizar en España en la década de 1960, aunque fue en la segunda mitad de la década de 1990 cuando empezó a cobrar más interés su utilización. Sus buenas prestaciones hidráulicas y mecánicas, su elevada resistencia química y su disponibilidad en una amplia gama de diámetros, presiones y rigideces, han conseguido incrementar su uso de forma considerable estos últimos años, siendo en la actualidad uno de los materiales a tener en cuenta en el sector de las tuberías de transporte de agua en nuestro país.

Los materiales constitutivos principales de las tuberías de PRFV son los siguientes:

- Fibra de vidrio
- Resina de poliéster
- Cargas inertes

La fibra de vidrio y la resina de poliéster son las materias primas principales en la fabricación de las tuberías de PRFV, sin menoscabo de que también se utilicen cargas inertes para mejorar algunas propiedades mecánicas del tubo, como la rigidez circunferencial, de una forma más económica que si solo se emplearan resina y fibra.

Cada uno de estos materiales tiene una función diferente. La fibra de vidrio le confiere la resistencia a los esfuerzos a los que se someten los tubos. La resina de poliéster tiene por misión configurar la estructura final del tubo y contribuir a su resistencia química. Las cargas inertes son las encargadas de obtener espesores importantes para aumentar la rigidez del tubo (Figura 14.1).

Los tubos de PRFV deberán cumplir, en general, con lo especificado en la norma UNE-EN 1796.

También es recomendable el cumplimiento de lo establecido en las siguientes Normas:

- ISO 10639. Plastics piping systems for pressure and non-pressure water supply. Glassreinforced thermosetting plastics (GRP) systems based on unsaturated polyester (UP) resin.
- AWWA C950. Fiberglass pressure pipe.

Los tubos de PRFV se clasifican por su diámetro nominal (DN), su presión nominal (PN) y su rigidez nominal (SN).

Su rango de diámetros más adecuados de utilización está entre los 800 mm y los 2.000 mm.

En los tubos de PRFV la designación genérica DN se refiere, al diámetro interior (ID), si bien estos



Figura 14.1. Materias primas (Fuente: Future Pipe).

tubos presentan la singularidad de poder ser fabricados bajo dos series: la serie A y la B.

En serie A los aumentos de espesor se obtienen por variación del diámetro externo (OD) (el ID es fijo), mientras que en la serie B ocurre al contrario: el OD es fijo y varía el ID al aumentar o disminuir el espesor, pero en ambas la designación genérica DN se refiere al interior.

Para la serie B, además, la Norma UNE-EN 1796 normaliza cuatro subseries: B1, B2, B3 y B4. La primera es una serie genérica para tubos de PRFV, mientras que las series B2, B3 y B4 tienen unas dimensiones tales que los tubos fabricados bajo dichas series sean compatibles, respectivamente, con accesorios de fundición (según ISO 2531), accesorios de PVC (según UNE-EN ISO 1452-3) y tubos de acero (según ISO 4200).

No obstante, se recomienda emplear únicamente las series B1 y B2.

En cuanto a los DN normalizados, en los tubos de las series A y B1 los diámetros deben estar comprendidos entre los valores indicados en la Tabla 14.1, cumpliendo las tolerancias correspondientes.

Los espesores de los tubos de PRFV no están normalizados debiendo ser el fabricante quien los declare en cada caso particular.

Las longitudes normalizadas en la norma UNE-EN 1796 son de 3, 5, 6, 10, 12 y 18 metros, siendo las más habituales las de 6 y 12 metros.

Los valores normalizados para PN en la norma UNE-EN 1796 y su relación con la PFA son los que se indican en la Tabla siguiente. También se indican los valores de la PMA calculados según el manual AWWA M45 (Tabla 14.2).

Los valores normalizados de SN para tuberías a utilizar, extraídos de la UNE-EN 1796 son los siguientes:

5.000 – 8.000 – 10.000

Los tubos de PRFV pueden estar provistos con diferentes tipos de uniones, siendo las más habituales las siguientes:

Tabla 14.1. Tabla dimensiones (en mm) de los tubos de PRFV (UNE-EN-1796).

DN	Serie A			Serie B1	
	$ID_{min.}$	$ID_{máx.}$	Toler.	OD	Toler.
800	795	816	±4,2	820	±1,0/−2,4
900	895	918	±4,2	924	±1,0/−2,6
1.000	995	1.020	±5,0	1.026	±1,0/−2,6
1.200	1.195	1.220	±5,0	1.229	±1,0/−2,6
1.400	1.395	1.420	±5,0	1.434	±1,0/−2,8
1.600	1.595	1.620	±5,0	1.638	±1,0/−2,8
1.800	1.795	1.820	±5,0	1.842	±1,0/−3,0
2.000	1.995	2.020	±5,0	2.046	±1,0/−3,0

Tabla 14.2. Tabla PFA y PMA en función de PN en los tubos de PRFV (UNE-EN 1796 para la PFA y AWWA M45 para la PMA).

PN	PFA (N/mm^2)	PMA (N/mm^2)
16	1,60	2,24
20	2,00	2,80
25	2,50	3,50

Uniones rígidas: Junta que no permite el movimiento relativo entre los tubos a unir. Las juntas rígidas no resistentes a esfuerzos axiales no son resistentes a cargas axiales.

- Con bridas (fijas o móviles).
- Encoladas (o pegadas).
- Vendadas a tope (o laminadas).

Uniones flexibles: Junta que permite el movimiento relativo de los tubos a unir. Las juntas flexibles resistentes a esfuerzos axiales son resistentes a cargas axiales.

- De enchufe y extremo liso con anillo elastomérico (con uno o dos anillos).
- Con manguitos y elemento de estanquidad (con uno o dos anillos).
- Autotrabada, cuando se prevean esfuerzos de tracción.

Las piezas especiales de PRFV deberán cumplir con lo especificado en la Norma UNE-EN 1796 y/o con los ensayos de validación de la ISO 18851, además de lo indicado en la tabla siguiente:

Tabla 14.3. Tabla Normas de validación para los distintos tipos de accesorios.

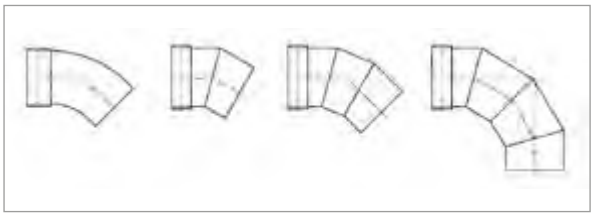
Tipo de accesorio	Norma de validación
Codo	ISO 8533 / ISO 18851
Derivación	ISO 18851
Reductor	ISO 18851
Conexión embriadada	ISO 8483 / ISO 18851

Las partes laminadas de estas piezas deberán tener un acabado con resina o “top coat” transparente, dejando visible el laminado inferior. La razón de que el acabado de las piezas especiales sea transparente es permitir la visualización de posibles defectos del laminado, como burbujas,

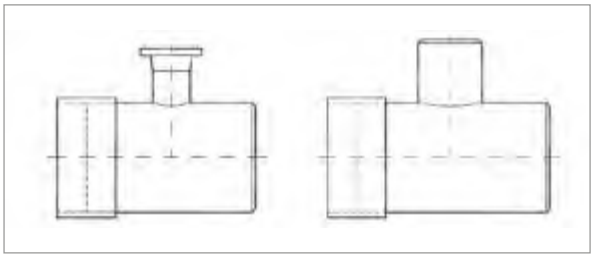
delaminaciones u otros defectos en el acabado, que pueden reducir la vida útil de la pieza.

Pueden ser de los siguientes tipos:

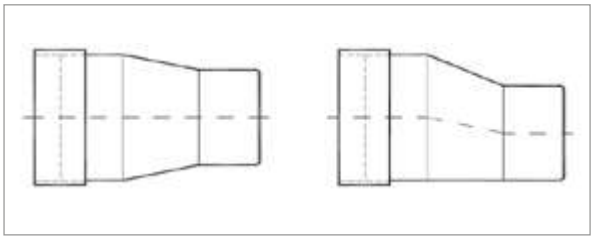
- **Codos.**



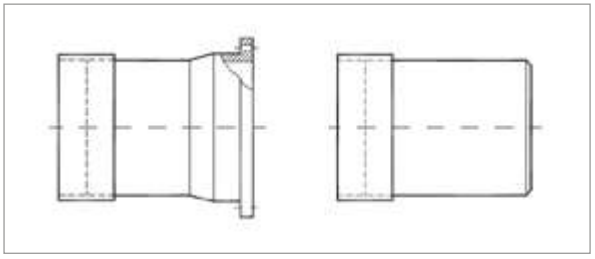
- **Derivación, entronque, te o tubo con acometida.**



- **Reductores o cono.**



- **Conector, empalme, adaptador, tubo corto o tubo de conexión.**



Las principales características de las tuberías de PRFV son:

- *Estructura ligera.* Menor coste debido a la **facilidad de transporte e instalación.**
- *Eficiencia.* **Mejor comportamiento hidráulico** por baja rugosidad a largo plazo.
- *Longevidad.* **Mayor vida útil** con menor necesidad de mantenimiento.
- *Versatilidad.* **Gran variedad de opciones de montaje y configuraciones complejas** gracias a la versatilidad de la Fibra de Vidrio para soportar altas presiones, elevadas temperaturas y altas cargas, así como parámetros intensos de resistencia en condiciones químicas adversas.
- *Sostenibilidad*. El interior de las tuberías tiene una superficie extra lisa, por eso **necesitan menos energía para que los fluidos circulen.**
- *Resistencia.* **Resistente a efectos combinados de oxidación, corrosión y ataque químico**.

Los productos de PRFV ofrecen:

- Resistencia a la corrosión.
- Bajo o ningún mantenimiento.
- Ligereza.
- Fácil instalación.
- Múltiples opciones de tipos unión.
- Bajo coste de operación debido a mejores propiedades hidráulicas.

14.2. Métodos de mantenimiento, rehabilitación/reparación

14.2.1. Generalidades

Para reducir los tiempos de reparación y agilizar la puesta en servicio de la canalización, se recomienda disponer siempre piezas de repuesto. En instalaciones con tubos de las series B, es importante disponer de tubos de ajuste de la misma serie y diámetro que los instalados como tubos de repuesto, puesto que se pueden cortar con la longitud deseada con la garantía de tener las dimensiones y tolerancias precisas en los extremos independientemente de donde se haya producido la avería.

Cuando haya que recurrir a unir tubos fabricados bajo series de diámetros diferentes, hay que prestar especial atención a las diferencias entre sus diámetros exteriores. Éste es un aspecto fundamental a la hora de seleccionar el sistema de unión a emplear. Los manguitos de PRFV requieren unas diferencias entre diámetros exteriores muy pequeñas, por lo que si éstas son mayores habrá que recurrir a juntas mecánicas que sean capaces de absorberlas. En los casos de que esas diferencias sean muy grandes, puede resultar complicado encontrar una solución técnicamente viable o, al menos, económicamente asequible.

Si una tubería tiene algún daño, o se aprecian fugas tras la instalación o durante el funcionamiento del sistema, debe repararse utilizando el método más apropiado. Los puntos de fuga en tubos suelen ser consecuencia de la caída de algún objeto pesado o de golpes recibidos durante la instalación. Se recomienda retirar y sustituir un tramo de tubo que incluya la parte dañada (de longitud P) más una distancia de al menos W/2 a cada lado de la misma o hasta alcanzar el extremo del tubo, en caso de que éste se encuentre más cerca. El valor de W dependerá del diámetro de la tubería según se indica en la Tabla adjunta. Por tanto, en el caso de que el daño no se ubique cerca de un extremo, la longitud total resultante a retirar será como mínimo de L = P + W.

ID (mm)	W (m)
80 - 600	1,0
700 - 1.200	1,5
> 1.200	3,0

La elección de un procedimiento u otro de reparación dependerá principalmente del sistema de unión con el que se encuentre instalado el tramo de tubería.

1.2.2. Corrosión y protección de piezas especiales de acero

Normalmente en la instalación de las tuberías enterradas de PRFV se precisan ciertas piezas especiales en puntos como codos, transiciones, etc., que en muchos casos suelen ser de acero pintado exteriormente o revestido de mortero.

Estas piezas de acero pueden sufrir procesos de corrosión externa y un modo de evitarlos o detenerlos puede ser complementar el efecto del recubrimiento con la aplicación local de protección catódica mediante ánodos de sacrificio.

14.3. Experiencias

Se exponen a continuación dos actuaciones de reparación efectuadas por el Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia en tuberías de PRFV.

14.3.1. Experiencia Nº 1 – Reparaciones puntuales

ROTURA TUBERÍA PRFV DN2000 EN VENTA ALTA (junio 2015)

Dentro del alcance del proyecto de "Los Nuevos Depósitos de Regulación de la ETAP de Venta Alta" ejecutado en 2002, se instaló una tubería PRFV DN2000 que unía los depósitos de referencia (60.000 m^3 y 80.000 m^3) con la conducción de bypass de 1ª Fase HAC DN2000 (1996).

Con esta configuración, tanto el agua tratada en 1ª Fase como de 2ª Fase, se almacena en los Depósitos Nuevos y salen mediante esta conducción PRFV hasta la Arqueta Renato, donde se derivan las conducciones a Margen Derecha y Margen Izquierda.

Esta tubería fue instalada a cielo abierto y posteriormente tapada.

Durante las pruebas de llenado en septiembre del 2001, antes de poner en servicio la tubería, se detectaron varias fugas. Una de ellas en la zona objeto de este punto, la cual se reparó, teniendo que abrirse una boca de hombre para acceder a su interior.

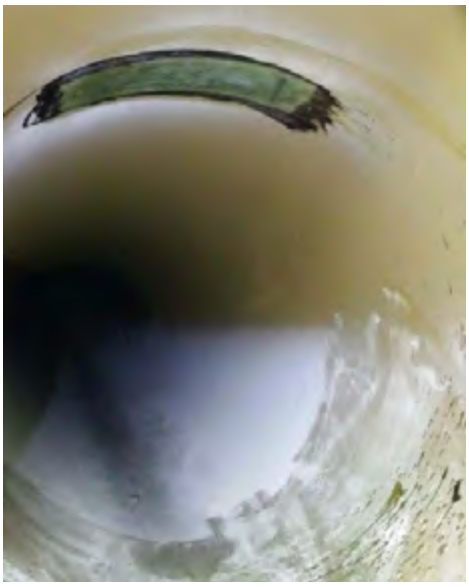
Tras las maniobras previas para dejar sin servicio la conducción, se acometieron los siguientes trabajos:

- Se abren las tapas y se monta ventilación forzada en una de las Bocas de Entrada.
- Se mete el Robot con la cámara por esa Boca de Entrada para ver la rotura.
  - Se comprueba punto y alcance de rotura, a 258 m de la Boca de Entrada.
  - Se localiza una Brida enterrada que coincide con el punto que se considera la Rotura.
  - Se comprueba pendiente la conducción y calidad del aire interior, mediante detector de gases acoplado al robot.
  - Con una sonda emisora acoplada al Robot se ubica en superficie, la rotura y la Boca enterrada.
- Excavación para localizar Brida y preparación de taludes para acceso (Máquina 8 Tn). Se localiza la brida a más de 6 metros de profundidad (Tapada técnica de proyecto en ese punto 1,45 m).
- Empresa especializada en prevención coloca sistema de acceso y extracción (900 m de cuerda). Se entra en la tubería desde la Boca de Entrada. A la vez se abre la brida enterrada. Se decide, dado que la brida recién encontrada está en la vertical de la rotura, hacer el acceso a la reparación desde esta, y mantener el rescate con camilla desde la Boca de Entrada, ya que la Boca encontrada es de DN 700 y no entra la camilla.
- Se localiza rotura vertical de la boca enterrada, donde en el año 2001 se había reparado una rotura por asentamiento y fabricado la boca de referencia.



- Se realiza reparación con fibra de vidrio.
- Tras consultar a la Confederación Hidrográfica, quien montó el tubo de PRFV en 1999 y al fabricante del tubo (Ollearis), se decide aligerar la carga sobre el tubo abriendo una trinchera sobre el trazado crítico y retirando el material a escombrera.
- Entra especialista del fabricante del tubo, Ollearis, para revisar estado de este. Confirma el mal estado del tubo en la zona crítica y recomienda aumentar el espesor de reparación de fibra a 15 mm y actuar en otros dos puntos (grieta a las 12 h a dos metros de la rotura) y picaje de asentamiento en la zona crítica.





- Se comienza a cargar la conducción para restablecer el servicio. En el proceso de llenado se observa que la fisura sigue rezumando agua y se contacta con Ollearis para contratar sus servicios en esta segunda reparación.





- Se aplica de nuevo otra capa de fibra en 2,5 m de largo, con un espesor total de 15 mm,



se refuerza el cuello y se tapan las grietas por la parte exterior. Además, se detecta otra fisura en el suelo, a 4 m aguas arriba de la boca, que también se repara de igual forma. Se deja curar el producto durante 24 h. Además, se mejora el secado mediante la aplicación de calor mediante dos calentadores eléctricos de radiación.

- Se pone en servicio de nuevo la conducción y se da por finalizada la reparación y mejora del tramo afectado aligerado de cargas.



Conclusiones:

Con independencia del criterio especializado necesario para valorar las causas y estado de esta conducción, se considera relevante destacar los siguientes factores presentes en esta incidencia:

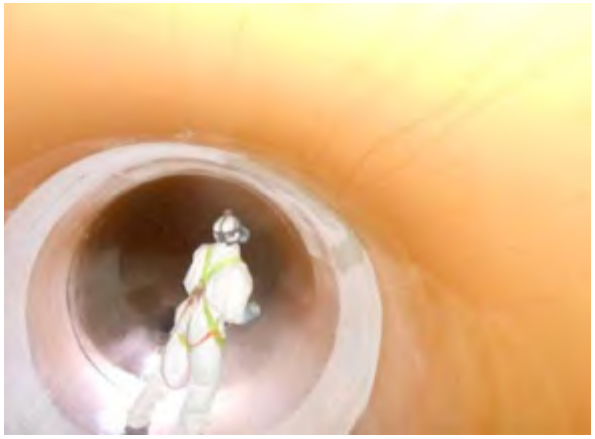
- La tubería ha roto en el mismo punto donde se reparó en el año 2001. Las conclusiones sobre el origen de la primera rotura fueron, que habían sido provocados por asentamientos del terreno. Aun así, en el momento de la reparación se consideró que estos asentamientos ya habían finalizado.

14.3.2. Experiencia Nº 2 – Reparaciones puntuales

REPARACIONES REALIZADAS EN TUBO PRFV DN2000 EN LA ETAP DE VENTA ALTA (junio 2016)

En primer lugar, se procedió a realizar inspección global de la tubería, observándose diversos pun-

tos en los que existían grietas, roturas y abombamientos manifiestos en la conducción. En este punto, se procedió al marcaje de dichas anomalías, para proceder a su reparación.



En una segunda fase, se procedió a la limpieza de las zonas afectadas, así como al pulido de dichas zonas, a fin de conseguir una unión óptima entre la fibra actual del tubo y la nueva fibra de reparación a instalar.



Una vez realizada la limpieza de la zona afectada por las roturas, se procedió a la instalación de las diferentes capas de fibra de vidrio y manta rowing, con unión mediante resina, para conseguir una correcta reparación de la zona afectada. En los puntos en los que existía rotura completa, o grieta, se procedió a la ejecución de anillo completo en el interior de la tubería, con un espesor mínimo de 12 mm, mientras que en dos de los puntos, en los que no existía rotura, sino que únicamente existía un posible punto de problemas futuro, se procedió a la instalación de fibra en media circunferencia de la tubería, con un espesor mínimo de 12 mm.

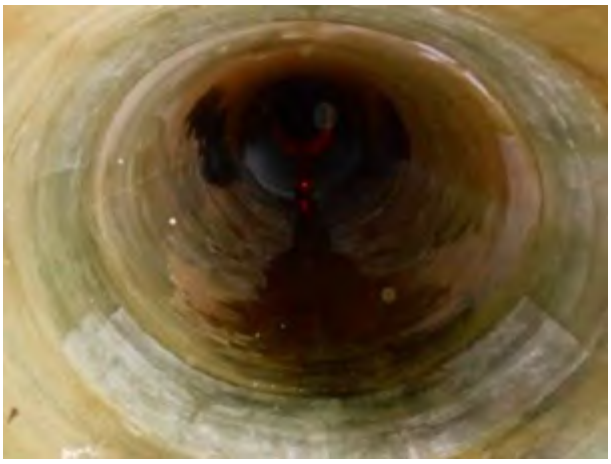




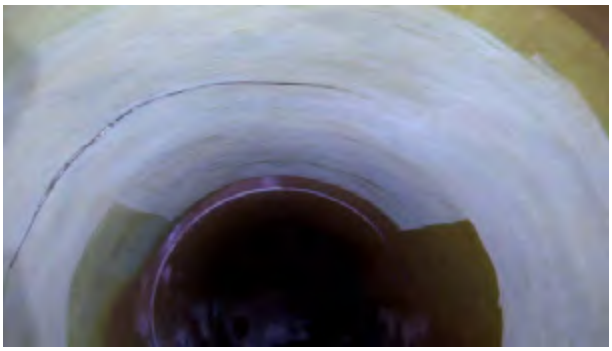
Por último, tras esperar durante 72 horas el secado de la fibra, se procedió a la inspección ocular de la situación de las reparaciones efectuadas, para que, tras darse el visto bueno, proceder al llenado y vaciado de la conducción, realizando la limpieza de la misma, y tras ello, poner en marcha la conducción en su régimen habitual de trabajo.

En cuanto al tubo de salida de los depósitos generales, tras vaciarse para realizar inspección ocular de la situación del mismo, se pudo observar que en una de las reparaciones realizadas, existía un pequeño defecto, que era necesario subsanar antes de su puesta en marcha. Esta subsanación, se resolvió instalado un anillo completo, tal y como se ha descrito anteriormente.



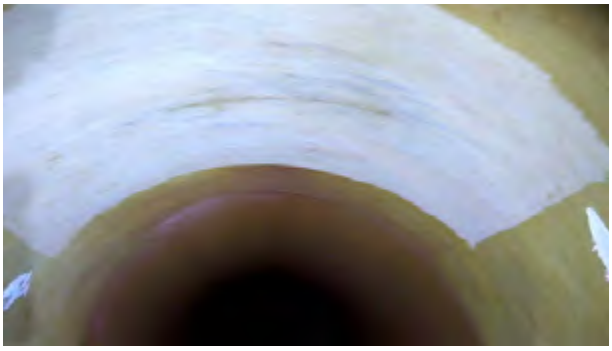


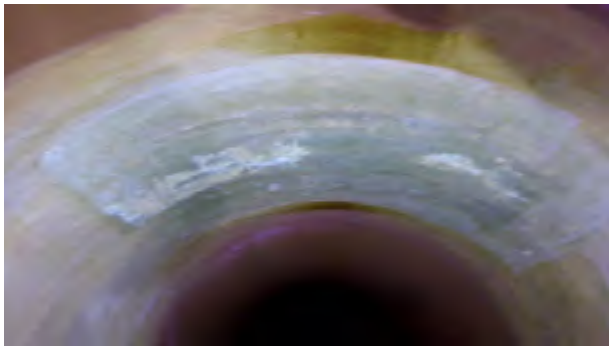
A continuación se adjuntan fotografías de los diferentes puntos donde se realizaron las intervenciones de reparación:



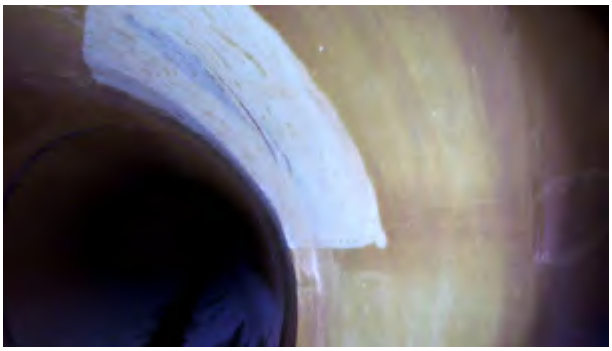
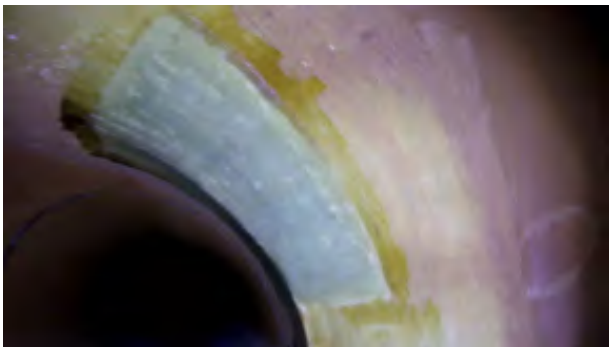


PUNTO Nº 1 A 75 METROS DE LA ENTRADA

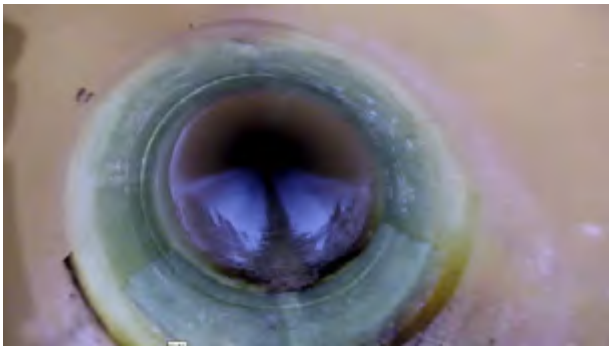




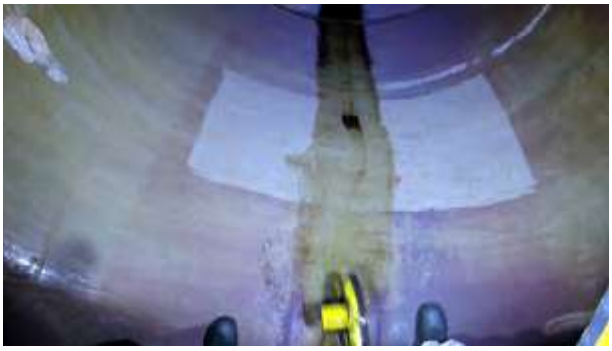
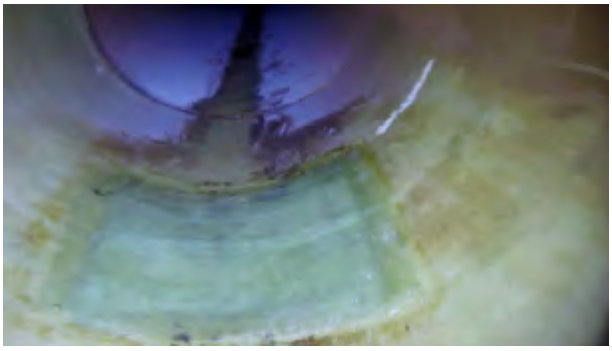
PUNTO Nº 2 A 82 METROS DE LA ENTRADA

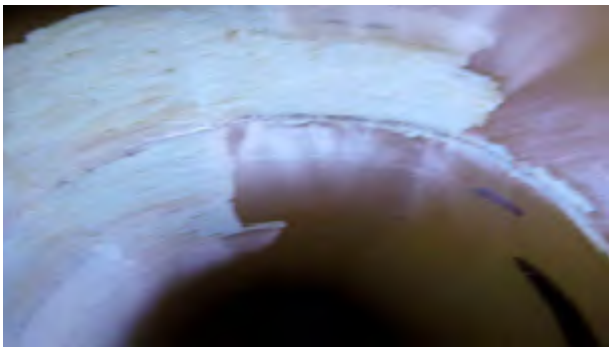
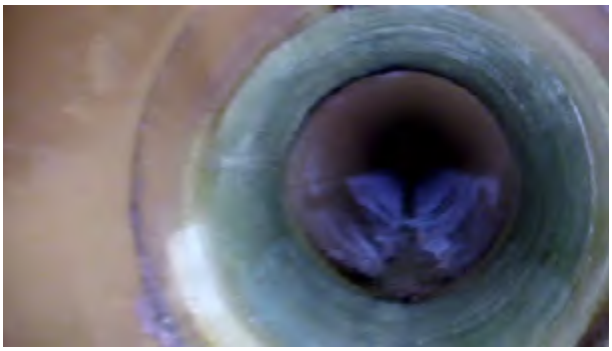
PUNTO Nº 3ª 119 METROS DE LA ENTRADA

PUNTO Nº 4ª 132 METROS DE LA ENTRADA

PUNTO Nº 5 A 154 METROS DE LA ENTRADA

PUNTO Nº 6 A 232 METROS DE LA ENTRADA

15 Monitorización

Las evaluaciones indirectas se definen como las que identifican las condiciones que pueden afectar negativamente los tubos de PCCP o identificar indicadores de tubos de PCCP deteriorados.

15.1. Monitorización de la presión y mitigación de los transitorios

Como sucede con la mayor parte de tipos de tubos, las PCCP suelen estar diseñadas con una tolerancia de sobrepresión. Nos obstante, los picos de sobrepresión recurrentes pueden provocar daños y reducir la vida útil de servicio prevista. Las sobrepresiones se han identificado como la manifestación inmediatamente anterior a la rotura del tubo de PCCP. De un modo similar, el tubo de PCCP en servicio con una presión por encima de la presión de diseño puede reducir también su vida útil de servicio prevista. Esta sección describe cómo la monitorización de la presión y la gestión de transitorios pueden usarse para extender la vida útil de los tubos de PCCP. Estos métodos se pueden aplicar también a otro tipo de tubos, especialmente a los que presentan características de fracturas por fragilización, como los de fundición gris, los de fibrocemento y los de PVC (cloruro de polivinilo).

Monitorización de la presión. Los tubos de PCCP que operan habitualmente en la presión de diseño o por encima de la misma son más susceptibles a desarrollar grietas en el núcleo de hormigón y en el revestimiento de hormigón externo, lo que puede desencadenar la corrosión y la posterior rotura de las espiras pretensadas. Una buena comprensión del funcionamiento del sistema utilizando los datos de diseño del tubo, así como sus datos de funcionamiento, puede permitir al gestor determinar qué tubos operan a la presión de diseño o por encima de la misma. El sistema de datos SCADA de supervisión, control y adquisición de datos es suficiente para determinar las tendencias de presión operativa en periodos de tiempo relativamente prolongados. Los datos de presión de SCADA deberán revisarse periódicamente en comparación con el diseño de tuberías para identificar los tubos que operan cerca de la presión de diseño o por encima de la misma. La presión de diseño del tubo siempre debe considerarse al realizar modificaciones en el sistema (por ejemplo, al sustituir o incorporar una estación de bombeo de refuerzo).

Monitorización y mitigación de transitorios. Los transitorios pueden producirse en tubos de cualquier tipo. Los transitorios tienen muchos orígenes posibles, pero suelen estar causados o verse intensificados por los ciclos de arranque/parada

de la bomba, el funcionamiento de las válvulas de control de la bomba, los cambios de elevación de la tubería y el funcionamiento de las válvulas en línea. Un monitor de transitorios habitualmente incluye un transductor de presión que se inserta en el tubo para medir la presión, una unidad de procesamiento de datos y comunicaciones y una fuente de alimentación. La selección de un monitor de transitorios se suele basar en varios factores:

- Frecuencia de muestreo de presión: la medida en la que un monitor puede detectar el pico real de transitorios depende de la frecuencia de muestreo de la unidad. Los sistemas de datos SCADA comunes no recopilan ni almacenan datos de presiones en frecuencias suficientes para entender si un tubo está experimentando transitorios o para medir los valores de picos mínimos y máximos. Suelen ser necesarios monitores de transitorios que miden y almacenan presiones al menos 100 veces por segundo.
- Adquisición y notificación de datos: los gestores suelen utilizar portales de datos a través de Internet para visualizar y descargar los datos. En algunos tipos de unidades, además, se pueden recibir notificaciones en tiempo real.
- Fuente de alimentación: los monitores de transitorios suelen tener un sistema de cableado o bien estar alimentados por baterías. La disponibilidad de una fuente de electricidad local influirá en la selección de la fuente de alimentación.
- Compatibilidad con SCADA: algunos monitores de transitorios pueden, además, enlazar con el sistema SCADA del gestor.
- Necesidad de otros sensores: se pueden conectar sensores adicionales de presión y flujo con algunos tipos de monitores de transitorios.

Los transitorios pueden propagarse en grandes distancias a lo largo de las tuberías, lo que simplifica la detección de la presencia de transitorios, pero complica la solución de problemas en el origen del transitorio. Localizar la causa de un transitorio puede requerir que se instalen varios monitores en el soporte o bien limitar la fuente de origen del transitorio.

15.2. Monitorización acústica de rotura de espiras

La supervisión acústica de una PCCP es una técnica para registrar y localizar roturas de espiras pretensadas en tubos en funcionamiento. La tecnología realiza una detección acústica de las espiras rotas en PCCP en funcionamiento a medida que se producen dichas roturas. La energía acústica asociada a una rotura de espira de una PCCP puede detectarse e identificarse. La adquisición de datos y el equipo y el software de procesamiento calculan la localización y el momento en el que se produjo la rotura de la espira. La detección acústica de roturas de espira se aplicó por primera vez a las PCCP a finales de los 90 utilizando sensores autónomos. Los sensores iniciales eran sensores acústicos tipo acelerómetros colocados sobre la superficie del tubo o bien hidrófonos instalados en la columna de agua a través de un grifo de pequeño diámetro o una llave de toma. Para ubicar la fuente de las roturas de las espiras se basaban en la categorización de la actividad acústica asociada a la rotura de la espira entre dos sensores. La localización de la rotura de la espira se calculaba en base a la potencia de la señal acústica detectada por cada sensor o hidrófono.

En 2006, se introdujo la supervisión acústica con una plataforma de fibra óptica distribuida. Un cable de fibra óptica es sensible acústicamente en toda su extensión. Como el sensor nunca está a una distancia superior a un diámetro de tubería de la rotura de la espira, la detección acústica, la resolución de la señal y la capacidad de detección de la rotura de la espira son mejores que sensores acoplados y autónomos.

a) **Utilización de plataformas para monitorización acústica de rotura de espiras.** La supervisión acústica de las PCCP para lo-

calizar espiras rotas actualmente está disponible en una plataforma de fibra óptica que se instala en toda la longitud de la tubería supervisada. Proporciona informes de datos basados en Internet.

b) **Requisitos de acceso para monitorización acústica de rotura de espiras**. Las plataformas de fibra óptica para supervisión acústica de rotura de espiras se pueden instalar mientras la tubería esté vacía (instalación en seco) o en condiciones de flujo y temperatura normales (instalación húmeda). La instalación en seco consiste en desenrollar el sensor de fibra óptica por toda la generatriz inferior de la tubería y fijar periódicamente la fibra a la tubería. Como alternativa, la fibra puede instalarse mientras la tubería se encuentra en funcionamiento. Para la instalación en seco, se puede desplegar un cable con sensor de fibra óptica en una tubería en funcionamiento con una velocidad de flujo limitada (<0,6 m/s). Una vez que el sensor de fibra óptica se ha asegurado a ambos lados del tubo, el equipo de adquisición de datos se conecta a un extremo de la fibra y se supervisa la tubería. La Figura 15.1 muestra ambos tipos de instalación.

Las limitaciones de la supervisión acústica de rotura de espiras incluyen las siguientes.

- Este sistema no detecta roturas de espiras que se hayan producido antes de que el sistema se haya instalado. Esta es conocida como la condición "de base", y deberá realizarse una inspección electromagnética justo antes de instalar el sistema para entender la condición de base.
- No se registran las roturas de espira que se produzcan cuando el sistema de detección se cierre por mantenimiento ni al producirse un apagón prolongado. Como el sistema suele estar equipado con un sistema de alimentación ininterrumpida, esta limitación prácticamente carece de relevancia.
- Este sistema supervisa la tubería para encontrar espiras pretensadas rotas, que es el mecanismo de rotura predominante de las PCCP. En algunos casos, las PCCP pueden producir roturas de maneras que no implican el deterioro progresivo de las espiras pretensadas. Este sistema ayudará a mitigar roturas no asociadas a roturas de espiras.

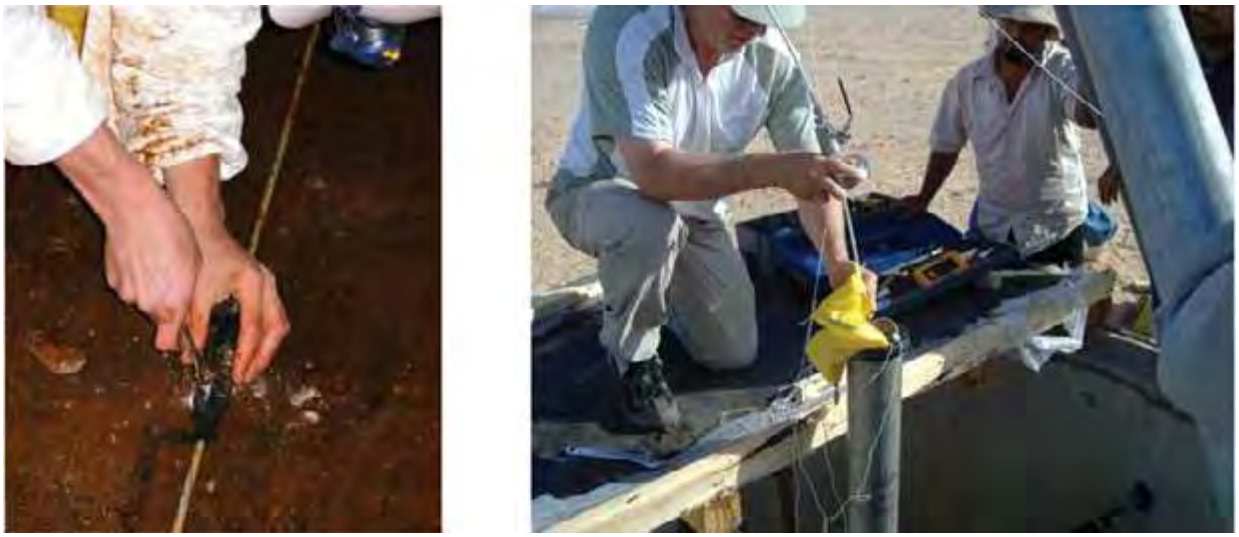


Figura 15.1. Cable de fibra óptica anclado a la tubería en instalación en seco (a la izquierda) e instalado en tubería en funcionamiento. Fuente: Xylem Assessment Services Fuente: Xylem Assessment Services.

- Las futuras modificaciones de las tuberías requerirán modificar la fibra. Por ejemplo, si una sección de tubo con rotura se retira y se sustituye, como suele ser común en la gestión de PCCP, el cable se deberá cortar al retirar la PCCP, protegerlo durante la instalación del nuevo tubo y empalmarlo antes de que el tubo vuelva a ponerse en servicio.
- La instalación en una tubería con obstrucciones requiere un diseño especializado. Por ejemplo, para instalar la fibra en una tubería con válvulas en línea suele ser necesario enrutar la fibra fuera de la tubería, alrededor de la válvula, y de nuevo de vuelta a la tubería en el otro lado de la válvula.
- Si bien la supervisión de la rotura de espiras es una tecnología acústica, actualmente no puede detectar fugas en la tubería.

c) **Sondeos de corrosividad.** Los sondeos de corrosividad se pueden usar para identificar el estado del suelo y de las aguas subterráneas que pueden ser nocivos para la PCCP y para identificar puntos de corrosión activa de la tubería.

d) **Detección acústica de fugas.** Como ocurre con cualquier tubería, en las PCCP se pueden producir fugas. La posibilidad de aplicación de la detección de fugas como herramienta de evaluación de viabilidad de condiciones depende de si la fuga es un modo característico de rotura o un indicador de un modo característico de rotura del tubo. En caso de las PCCP, los gestores por lo general describen roturas repentinas sin que se hayan notificado fugas inmediatamente antes de producirse la rotura. Este modo de rotura se ve corroborado por el hecho de que las espiras pretensadas son conocidas por ser el componente estructural primario de una PCCP, y la rotura de las espiras postesadas puede originar una rotura repentina del tubo sin una rotura de la camisa de chapa de acero o del núcleo de hormigón. Por lo general, debe existir una zona amplia de debilidad (es decir, con un gran número de espiras rotas) con carácter previo a la rotura del núcleo de hormigón y de la camisa de chapa de acero, de ahí el carácter catastrófico de las roturas de las PCCP.

Un ejemplo de monitorización en continuo de conducciones de redes de transporte es la tecnología denominada Pipeminder Acoustic One, que permite la monitorización en continuo de estas conducciones, facilitando información sobre la presencia de fugas de agua y sobre la posible aparición de fenómenos de transitorios de presión. Para ello, el equipo dispone de un sensor hidrófono más un transductor interno de presión capaz de registrar 128 datos de presión por segundo.

Los equipos se instalan mediante conexiones directas en las conducciones, bien empleando ventosas o desagües existentes, bien mediante la realización de tomas en carga de 1,5” de diámetro.



La distancia óptima entre los sensores depende de aspectos tales como el diámetro y material de la conducción, la presión de trabajo, la existencia de derivaciones, etc. Como valor medio recomendable se puede considerar 750 metros de distancia entre sensores.

Los equipos disponen de un registrador autónomo con registro y envío de datos mediante comunicaciones 4G/3G/2G.

Así mismo, disponen de una antena GPS que permite la sincronización horaria entre ellos y su geoposicionamiento.

Los datos registrados son enviados a una plataforma web en la cual son almacenados y procesados. En esta plataforma se incorpora el GIS de los sistemas monitorizados que es empleado tanto para la visualización como para la realización de precisas correlaciones que permiten confirmar y ubicar el origen de las posibles fugas y/o transitorios de presión.

Características de la tecnología

- Sistema autónomo de detección, localización y validación remota de fugas en conducciones de transporte con detección de transitorios hidráulicos.
- Registrador autónomo con registro y envío de datos y alarmas.
- Sensor hidrófono de altas prestaciones.
- Transductor de presión interno de altas prestaciones 128 Hz. 0-20 bares. +/– 0,25% de precisión.
- Funcionalidad de monitorización transitorios de presión con envío de datos/alarmas.
- Tarjeta SIM integrada 4G/3G/2G.
- Sincronización horaria y posicionamiento mediante antena GPS.
- Los equipos se instalarán en tomas de 1,5" (o de 2,5" empleando un adaptador).
- Batería recargable 22Ahr.
- Configuración de dispositivos de manera remota.
- Protección IP68 totalmente encapsulado.
- Plataforma online para gestión y análisis de datos con acceso configurable por tipo de usuario.
  - Posibilidad de realizar correlaciones online.
  - Integración de sistemas de información geográfica (GIS).
  - Visualización, tableros de control, mapas.
  - Información estadística y gráfica de históricos.
  - Seguimiento de ubicación de fugas u origen de transitorios.
  - Gestión avanzada de alertas provocadas por la aparición de transitorios de presión o roturas en las redes.

Ejemplos de instalaciones

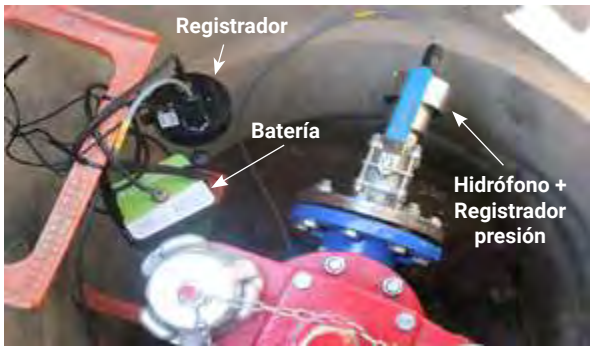


Figura 15.2. Fuente: Mejoras Energéticas.



Figura 15.3. Fuente: Mejoras Energéticas.

Ejemplos de imágenes del software de gestión

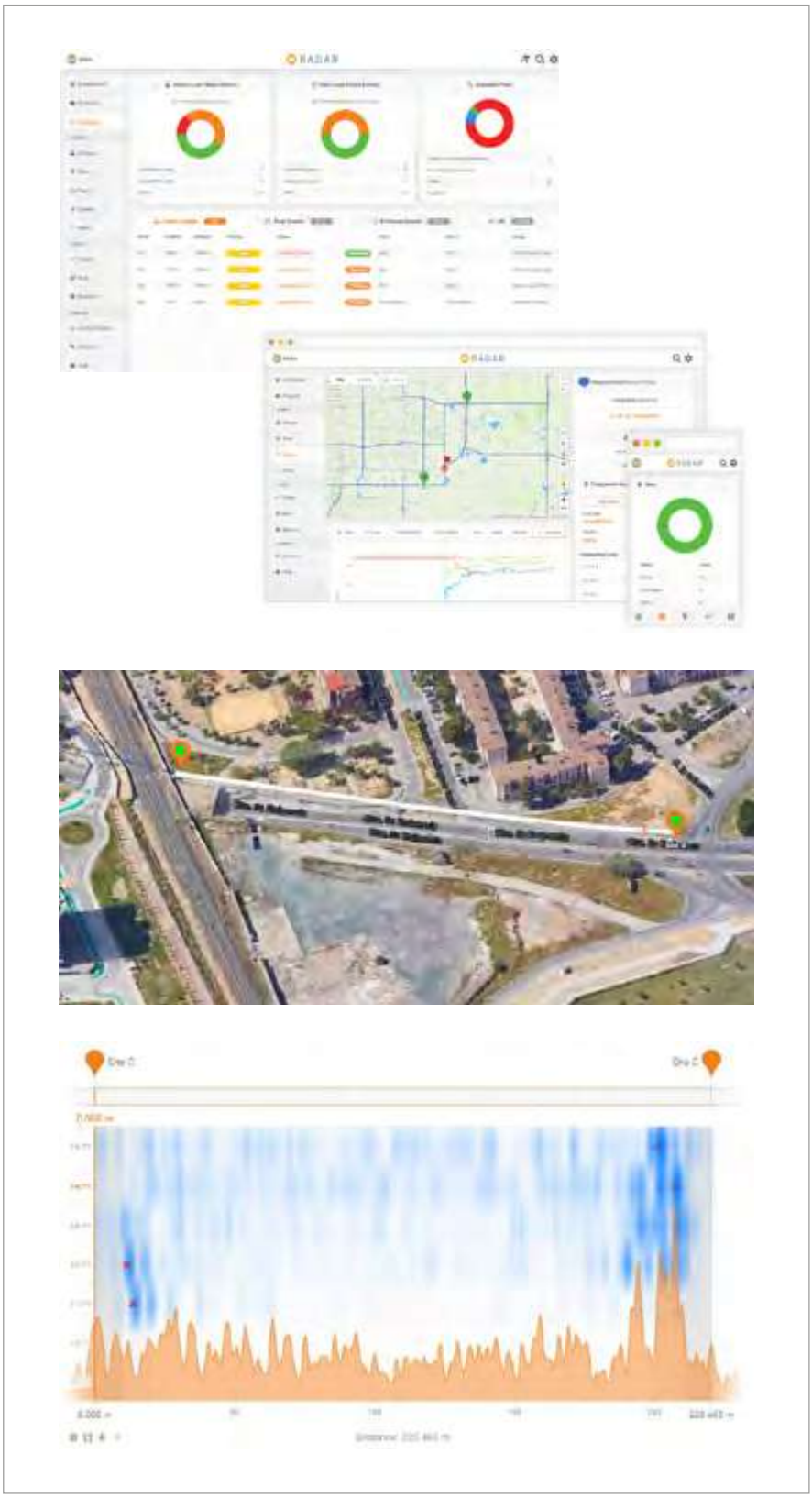


Figura 15.4. Ejemplo de correlación entre dos sensores hidrófonos. Fuente Mejoras Energéticas.

Bibliografía

Normas para redes de abastecimiento – Canal de Isabel II, S.A.

Guía técnica para el diseño, fabricación e instalacion de tuberías a presión de poliester reforzado con fibra de vidrio – CEDEX.

Trabajo Fin de Grado de D. Juan Román Corchado Mesa "*Tuberías de hormigón armado con camisa de chapa, la experiencia en Barcelona*". Aguas de Barcelona.

Artículo "*State of the Art Review of Inspection Technologies for Condition Assessment of Water Pipes*". Autores: Zheng Liu, Yehuda Kleiner.

Manual of water supply practices M77: Conditions assessment of water mains – AWWA.

Manual de corrosión y protección de tuberías- AEAS 1999.

Manual de mantenimiento de tuberías – AEAS 2013.


Aeas
Asociación Español
Abastecimientos de
Agua y Saneamiento

DAQUAS
Asociación Española del Agua Urbana



SENSORIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE ARTERIAS

CT 3 Redes de Abastecimiento

INDICE

1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN 4

1.1. PÁRAMETROS QUE SE PUEDEN MONITORIZAR, SENSORES Y OBJETIVO PERSEGUIDO 4

1.1.1. PARÁMETROS QUE AFECTAN A LA GARANTÍA DEL SUMINISTRO 5

1.1.1.1. CAUDAL 5

1.1.1.1.1. CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS DE INSERCIÓN 6

1.1.1.2. PRESIÓN DE SERVICIO 7

1.1.1.2.1. PRESIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA 7

1.1.1.2.2. EQUIPOS PARA LA REGULACIÓN ACTIVA DE PRESIONES 8

1.1.1.2.2.1. CASO PRÁCTICO DE ESTUDIO DE TRANSITORIOS EN LA RED POR EL CIERRE DE LA VÁLVULA DE LLENADO DE UN DEPÓSITO EN UN SISTEMA COMPLEJO. 9

1.1.1.3. CAPACIDAD ESTRUCTURAL 13

1.1.1.3.1. DETECCIÓN TEMPRANA DE FUGAS O LOCALIZACIÓN DE LAS MISMAS UNA VEZ PRODUCIDAS. 16

1.1.2. PARÁMETROS QUE AFECTAN A LA CALIDAD DEL AGUA SUMINISTRADA 18

1.1.2.1. TURBIDEZ 20

1.1.2.2. pH 23

1.1.2.3. CLORO LIBRE Y TOTAL 25

1.1.2.4. CONDUCTIVIDAD 26

1.1.2.5. NITRITOS 27

1.1.2.5.1. CASO PRÁCTICO DE MONITORIZACIÓN DE NITRITOS EN TIEMPO REAL. 29

1.1.2.5.2. CASO PRÁCTICO DE MONITORIZACIÓN DE LA FORMACIÓN DE MONOCLORAMINA EN TIEMPO REAL. 30

1.1.1.4. CRECIMIENTO BACTERIANO 31

1.1.1.4.1. CASO PRÁCTICO DE MONITORIZACIÓN DEL SENSOR ALVIM: 33

1.2. CAPTURA DEL DATO 34

1.2.1. CAPTURA ONLINE O MEDIANTE DATALOGGER EN ORIGEN 34

2. TECNOLOGÍAS DE SENSORIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN 36

2.1. TECNOLOGÍAS BASADAS EN FIBRA ÓPTICA 36

2.1.1. DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS BASADAS EN FIBRA ÓPTICA 36

2.1.2. APLICACIONES DE LA FIBRA ÓPTICA EN LA MONITORIZACIÓN DE ARTERIAS. 39

2.1.3. INSTALACIÓN DE FIBRA ÓPTICA PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE FUGAS. 44

2.1.4. TECNOLOGÍA SOUNDPRINT AFO PARA LA MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL DE ARTERIAS DE HORMIGÓN PRESTENSADO CON CAMISA DE CHAPA. 45

2.1.5. EXPERIENCIAS/CASOS PRÁCTICOS 54

2.1.5.1. SENSADO DISTRIBUIDO SOBRE FIBRA ÓPTICA (DFOS) MEDIANTE TECNOLOGÍA DAS/HDAS E IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS POR APRENDIZAJE SUPERVISADO (MACHINE LEARNING). 54

2.1.5.1.1. PRUEBA PILOTO PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS, AMENAZAS E INTERFERENCIAS MEDIANTE TECNOLOGÍA OPTASENSE EN CANAL DE ISABEL II. 57

2.1.5.2. SISTEMA MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL CON FIBRA ÓPTICA. SOUNDPRINT AFO. 60

2.2. SENSORES INSTALADOS EN ELEMENTOS DE LAS CONDUCCIONES 67

2.2.1. MONITORIZACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN CONDUCCIONES. 67

2.2.1.1. CASO PRÁCTICO: SISTEMA INTEGRAL DE TELEVIGILANCIA PARA PROTECCIÓN CATÓDICA RAMAL ESTE DEL SISTEMA TORRELAGUNA, TRAMO VALDEOLMOS-AJALVIR. CANAL DE ISABEL II. 69

2.2.2. MONITORIZACIÓN EN CONTINUO DE LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS 75

2.2.3. CASO PRÁCTICO: INSTALACIÓN DE SENSORES ACÚSTICOS EN LA ARTERIA PRINCIPAL DEL ESTE (CANAL DE ISABEL II) 77

2.2.4. CASO PRÁCTICO: INSTALACIÓN DE EQUIPOS DE MONITORIZACIÓN EN CONTINUO EN LA ARTERIA DE MIRAFLORES A SOTO DEL REAL (CANAL DE ISABEL II). 81

2.2.5. CASO PRÁCTICO: EXPERIENCIA DE EMASA EN LA MONITORIZACIÓN DE REDES ENFOCADO A LA DETECCIÓN DE FUGAS. 85

3. OTRAS TECNOLOGÍAS 99

3.1. DESCRIPCIÓN DE OTRAS TECNOLOGÍAS 99

3.1.1. VENTOSAS DIGITALES 99

4. BIBLIOGRAFÍA 101

ANEXO I. SOLUCIONES COMERCIALES PARA EL CONTROL EN CONTINUO DE LA CALIDAD DEL AGUA. 102

1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

1.1. PÁRAMETROS QUE SE PUEDEN MONITORIZAR, SENSORES Y OBJETIVO PERSEGUIDO

Los parámetros de interés a monitorizar en las arterias pueden clasificarse desde el punto de vista del objetivo perseguido en dos grandes grupos:

a) Aquellos que afectan a la **garantía del suministro**.
b) Aquellos que afectan a la **calidad del agua suministrada**.

Dentro del primer grupo encontraríamos aquellos **parámetros que influyen de una manera directa o indirecta, tanto en el suministro del volumen del agua requerido como en la capacidad estructural y estado de la conducción** para evitar roturas o fugas, así por ejemplo podríamos hablar de sensores o medidores capaces de controlar:

- Caudal que discurre por las conducciones en arterias principales y ramales.
- Detección temprana de fugas o localización de las mismas una vez producidas.
- Presión estática y dinámica para la detección preventiva de transitorios hidráulicos o equipos para la regulación activa de presión en función de consignas.
- Estado estructural de la conducción (espesor, geometría, revestimiento, deformaciones, huecos o irregularidades del material, etc.).

Un segundo grupo serían aquellos sensores capaces de monitorizar el **estado de la calidad del agua**. En este caso, estaríamos hablando de medidores (puntuales o en continuo) que permitirían controlar los valores paramétricos químicos, indicadores de calidad y de crecimiento bacteriano. Estos sensores estarían enfocados al cumplimiento de los parámetros de calidad en el agua suministrada fijados por el operador o en su defecto **cumplimiento de normativas legales relativas al agua de consumo** (Enlace a Real Decreto 3/2023).

A lo largo de los siguientes apartados, se describen las principales tecnologías disponible en monitorización de arterias, recogiendo en algunos casos experiencias reales de su instalación en redes de abastecimiento.

Agradecer la inestimable colaboración de otras empresas abastecedoras, de sus ingenieros, y de DAQUAS que ha promovido la redacción de esta Guía sin cuyo apoyo no podría haber visto la luz. Han intervenido de forma directa en la elaboración de este documento los siguientes profesionales:

David Hervás Jorge	Canal de Isabel II, S.A. M.P.
Diego V. Limones González	Canal de Isabel II, S.A. M.P.
Patricia Gómez Martínez	Canal de Isabel II, S.A. M.P.
Carlos García García	MEJORAS ENERGÉTICAS, S.A.
Antonio García Zorrilla	XYLEM
Jesús Domene Navas	EMASA

Manuel Rodríguez Arjona	EMASA
Pablo Duran Zafrilla	Global Omnium
María Torrecilla Llamas	LACROIX Sofrel

1.1.1. PARÁMETROS QUE AFECTAN A LA GARANTÍA DEL SUMINISTRO

1.1.1.1. CAUDAL

Un caudalímetro es un instrumento de medida para la medición de caudal o gasto volumétrico de un fluido o para la medición del gasto másico y suele colocarse en línea con la tubería que transporta el fluido. Se distinguen varios **tipos de caudalímetros de agua** en función de qué tipo de señal conviertan en señal de caudal:

Caudalímetro de Ultrasonidos: resulta la solución más económica para grandes diámetros. Se subdividen en:

De tiempo de tránsito: utiliza la variación de la velocidad absoluta de propagación del sonido en el agua.

De efecto Doppler: su principio de funcionamiento aprovecha la variación que experimenta la frecuencia de un haz de sonido entre la emisión y recepción después de que dicho haz haya sido reflejado por un elemento con cierta velocidad relativa respecto a los puntos de emisión y recepción.

Caudalímetro Electromagnéticos: su principio de funcionamiento se basa en la inducción de una tensión entre los extremos de un conductor que atraviese un campo magnético. Esta tensión es proporcional a la velocidad, a la longitud del conductor y a la intensidad del campo magnético. El agua actúa de conductor entre los dos electrodos.



Imagen 1.1.1.1.1. Ejemplo de caudalímetro electromagnético. Fotografía propiedad de Hidroconta.

Caudalímetro de inserción: se conectan a través de una toma en una tubería para estimar la velocidad local del fluido y, a partir de esta, obtener una aproximación del caudal circulante. Existen tres tipos según su funcionamiento:

Sondas electromagnéticas: obtiene la velocidad local del fluido en las proximidades de la sonda.

Sondas de turbina: determina la velocidad local del fluido a partir de la velocidad de rotación de una turbina.

Sondas de presión diferencial: estima el caudal circulante en una sección de la conducción como diferencia entre la presión entre dos puntos.



Imagen 1.1.1.1.2. Ejemplo de caudalímetro de inserción. Fotografía propiedad de Grupo Mejoras Energéticas.

1.1.1.1.1. CAUDALÍMETROS ELECTROMAGNÉTICOS DE INSERCIÓN

Cabe destacar que los **caudalímetros electromagnéticos de inserción** tienen una precisión equivalente a los tradicionales caudalímetros de ultrasonidos, que se habían impuesto como la mejor solución para la medición de caudal en grandes conducciones, pero con la ventaja frente a estos de su **facilidad y reducido coste de instalación**, sin necesidad además de interrumpir durante un número de horas determinado el suministro. Los sensores de inserción pueden disponer de un único sensor o varios distribuidos de forma predeterminada en la longitud del vástago insertado en función del diámetro de la conducción (de esta forma, teniendo en cuenta la variabilidad del caudal circulante y del diámetro, será suficiente con un único sensor o será conveniente disponer de varios con el fin de obtener medidas con la precisión deseada).

Para valores de caudal circulante con poca variabilidad (por ejemplo, en conducciones cuya función es la alimentación de depósitos de distribución con carreras de llenado amplias) y diámetros inferiores a 700 mm, podría ser suficiente con un sensor. Sin embargo, si el caudal circulante oscila entre valores bajos, con velocidad reducida y valores elevados con incremento significativo de la velocidad, el perfil de velocidad será muy variable a lo largo de la sección, siendo por tanto necesario recurrir a caudalímetros con varios (desde 2 hasta 16 sensores). Adicionalmente a este aspecto de la variación de velocidad, hay que considerar el diámetro de la tubería, siendo más precisa la medición con varios sensores a partir de 500 mm que con un único sensor, aunque el perfil de velocidad sea bastante homogéneo.

Estos equipos, también permiten la versatilidad de ser integrados con registradores con amplia capacidad de almacenamiento y transmisión de datos mediante comunicaciones IoT a plataformas de gestión donde se dispone de información integral y continua para la toma de decisiones.

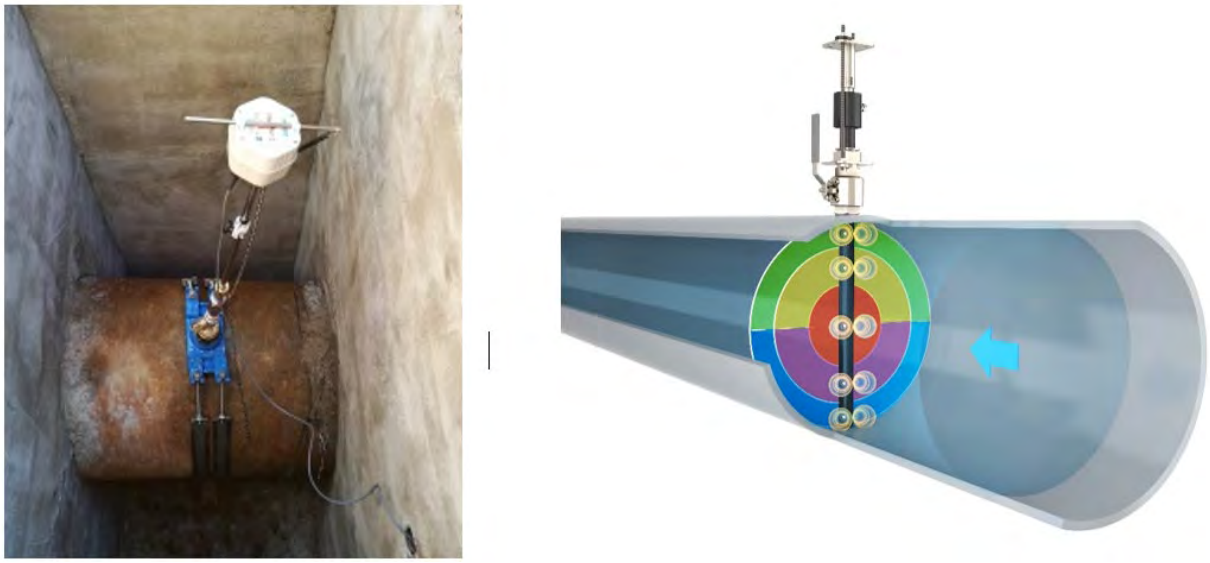


Imagen 1.1.1.1.1.1. A la izquierda, caudalímetro de inserción HYDRINS® con un único sensor. A la derecha caudalímetro de inserción TorpeeMag®, con multisensor. Ambos equipos son ofrecidos por la empresa Mejoras energéticas, S.A. En ambos casos, son caudalímetros bidireccionales, autónomos y con medición integrada de temperatura.

1.1.1.2. PRESIÓN DE SERVICIO

1.1.1.2.1. PRESIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA

Monitorizar la presión estática en continuo puede aportar información de gran interés sobre el estado de operación del sistema permitiendo, por ejemplo, detectar **aparición de roturas o válvulas de desagüe parcialmente abiertas** (caudal de entrada a depósitos nulos y sin embargo pérdida de carga significativa en puntos monitorizados de la red). Otro tipo de información que pueden aportar es la referida al funcionamiento de las impulsiones si se detectaran valores anómalos, diferentes a los esperados.

Complementariamente a la monitorización de la presión en puntos críticos o estratégicos, las redes de transporte son susceptibles de sufrir **transitorios hidráulicos**, cuyos efectos a corto o medio plazo pueden provocar roturas bruscas, con los impactos que suponen, tanto a efectos del suministro de agua como posibles afecciones a bienes públicos o privados e incluso desde el punto de vista de riesgo de accidentes.

En este sentido, es interesante **la monitorización continua con medición de la presión con alta frecuencia** (hasta 100 Hz), de tal forma que se puedan detectar y medir estos transientes de presión, identificar el foco que origina los mismos (arranque y parada de grupos de impulsión, manipulación brusca de válvulas de cierre, mal funcionamiento de válvulas de llenado de depósito, ventosas con funcionamiento o dimensionamiento inadecuado, válvulas reguladoras, etc.) y ejecutar las actuaciones correctivas para suprimir o atenuar los mismos.

Con objeto de disponer de información completa, con una frecuencia que permita conocer el funcionamiento real de las redes, y sin penalizar el consumo energético (prolongando así la vida útil de las baterías), es necesario que los registradores dispongan de la posibilidad de registros avanzados en todos sus canales.

Entre estas características es recomendable disponer de las siguientes funcionalidades:

- Registros secundarios a partir de 1 segundo.
- Alarmas específicas sobre valores máximo, mínimo, medios, tasa de cambio, diferencia de variables y valores instantáneos con filtros de persistencia, histéresis y ocurrencia.
- Registro de alta frecuencia para entradas analógicas (5, 10, 15, 25 o 100Hz.).
- Representación de gráfica envolvente y bloque de memoria rodante (cola) para el análisis continuo de transitorios.
- Registro PIT (evento) para emisores con bajas frecuencias de pulsos.

Estas características ofrecidas por los registros secundarios salvan la limitación de los registros principales para comprender (y analizar) lo que está sucediendo dentro del período de registro, que en muchos casos se extiende a períodos quinceminutales.



Imagen 1.1.1.2.1.1. Registrador avanzado Marca MultiLog 2. Imagen cedida por Mejoras Energéticas, S.A.

1.1.1.2.2. EQUIPOS PARA LA REGULACIÓN ACTIVA DE PRESIONES

Es habitual en las redes de transporte que las presiones medias y máximas alcancen valores muy elevados, siendo necesario la construcción de arquetas de rotura de carga y/o la instalación de válvulas reductoras de presión.

En este último caso, además de la monitorización en continuo de la presión aguas arriba y aguas debajo de la válvula reguladora, se ha demostrado en numerosas instalaciones la conveniencia de contar con equipos para que actúen sobre la válvula, **regulando la presión según consignas predefinidas o directamente en función del caudal circulante en cada momento**.

Este tipo de regulación activa aporta grandes beneficios, tales como la **disminución del número de averías por fatiga o sobrepresiones en la red y la extensión de la vida útil de las conducciones**. Adicionalmente, el ajuste de la presión reduce el agua fugada por las fugas no detectadas que pudieran existir en la red. Estos equipos, permiten, por tanto, mantener en "calma" las redes, evitando variaciones bruscas en la presión con sus nocivos efectos sore las infraestructuras.

La **regulación de la presión** se puede realizar según diferentes **estrategias**:

- Tiempo – tramos horarios adecuados a la demanda.
- Caudal – mediante tabla ratio caudal / presión.
- Tiempo/Caudal – atendiendo a la máxima presión correspondiente a las configuraciones anteriores.
- Punto Crítico – regulación de la presión teniendo en cuenta hasta 3 puntos representativos monitorizados con registradores de presión.

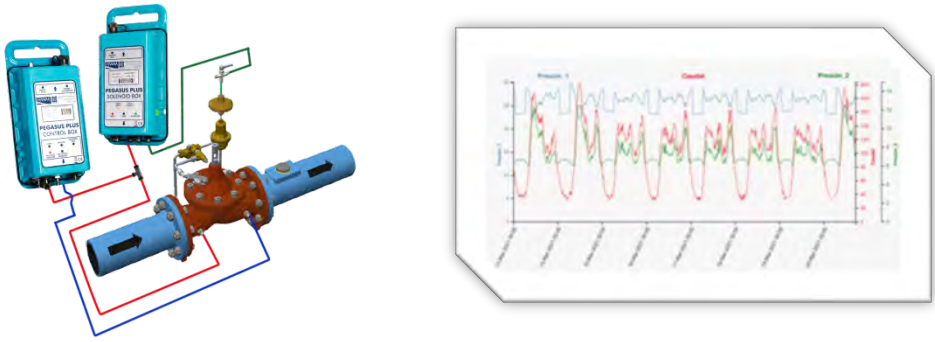


Imagen 1.1.1.2.2.1. Ejemplo de equipo de regulación activa de presión. Sistema PEGASUS, ofrecido por Mejoras Energéticas, S.A. El sistema PEGASUS mencionado dispone, además de la placa electrónica para la gestión del sistema, de un módulo hidráulico autoalimentado para el incremento o disminución de la presión de forma suave y precisa, actuando sobre la válvula reguladora mediante un actuador hidráulico con cruceta de reparto y un sistema latch para la apertura de la válvula (vaciado de la cámara). Asimismo, este mismo equipo dispone de dos transductores de presión de altas prestaciones a 25Hz con funcionalidad de detección y monitorización de transitorios y un canal para la entrada de caudal. Finalmente, el controlador electrónico tiene capacidad para almacenamiento de un número muy elevado de registros y para el envío de datos mediante comunicaciones IoT.

1.1.1.2.2.1. CASO PRÁCTICO DE ESTUDIO DE TRANSITORIOS EN LA RED POR EL CIERRE DE LA VÁLVULA DE LLENADO DE UN DEPÓSITO EN UN SISTEMA COMPLEJO.

Canal de Isabel II ha trabajado en el estudio de la propagación de los transitorios generados por una válvula de llenado a lo largo de una arteria que cuenta con 10 km de tuberías de 200 mm y fundición dúctil. La zona de estudio pertenece a un sistema complejo suministrado por gravedad desde un depósito principal en cabecera y 29 depósitos conectados a través de más de 170 km de red con tuberías de diámetros comprendidos entre los 100 y los 1500 mm y material predominante fundición dúctil. Del depósito de cabecera parten dos ramales, el norte y el este, siendo este último desde el que se suministra la zona de análisis.

El sistema principal y la situación en planta de los registradores colocados se observa en la figura 1.1.1.2.2.1.1. En esta red todos los equipos se instalaron conectados a ventosas (figura 1.1.1.2.2.1.2).

La importancia de este caso de estudio radica en que la maniobra analizada tiene lugar varias veces al día en la operación normal de la red.

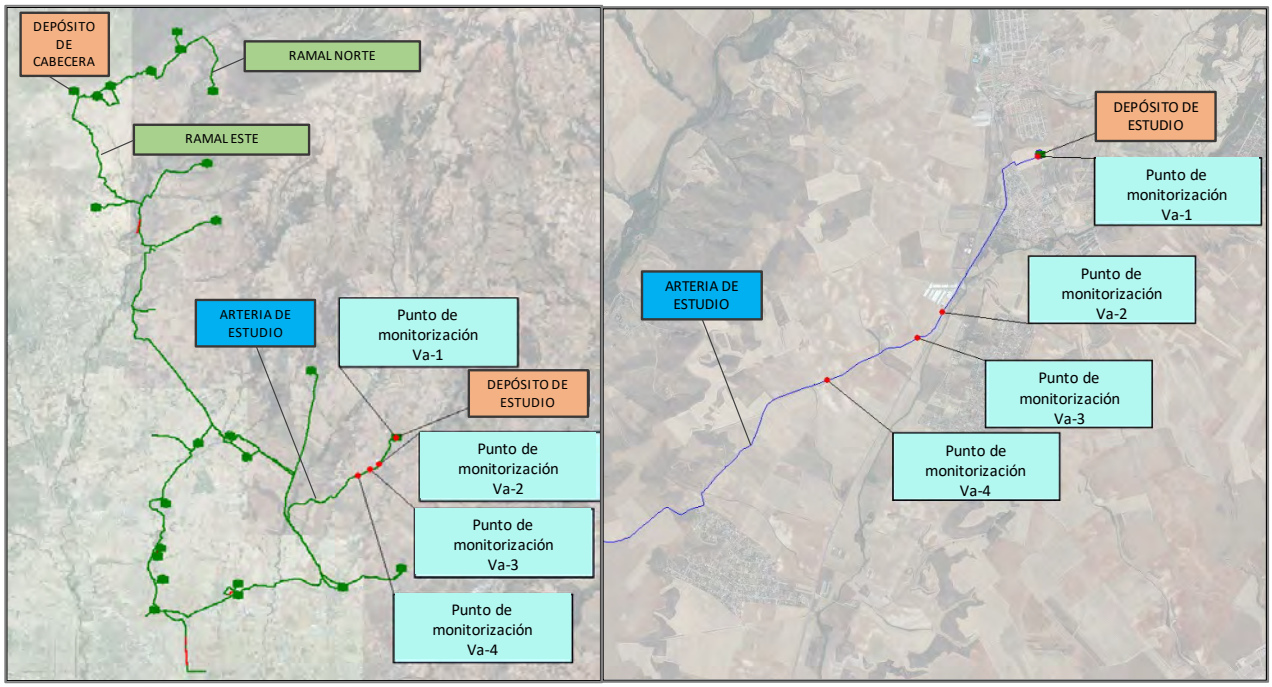


Figura 1.1.1.2.2.1.1: Zona de estudio y situación en planta de los equipos de monitorización.



Figura 1.1.1.2.2.1.2. Instalación de un sensor en la arqueta de una ventosa de la red.

A través de los gráficos dos-minutales se pudo comprobar que todas las maniobras de cierre de la válvula de llenado (momento en que sube la presión de la arteria) originaba transitorios en todos los puntos de monitorización. Esto se representa gráficamente en la figura 1.1.1.2.2.1.3, y en detalle en la figura 1.1.1.2.2.1.4. Los gráficos muestran la presión máxima, media y mínima de los registros de 100 Hz para cada intervalo de 2 minutos,

representándose en un color distinto para cada punto de monitorización indicados anteriormente. La línea central, destacada en color más fuerte, representa la presión media y las líneas más claras, por encima y por debajo de la media, representan la presión máxima y mínima respectivamente. La región sombreada rellena el rango de presiones entre la máxima y la mínima registrada.

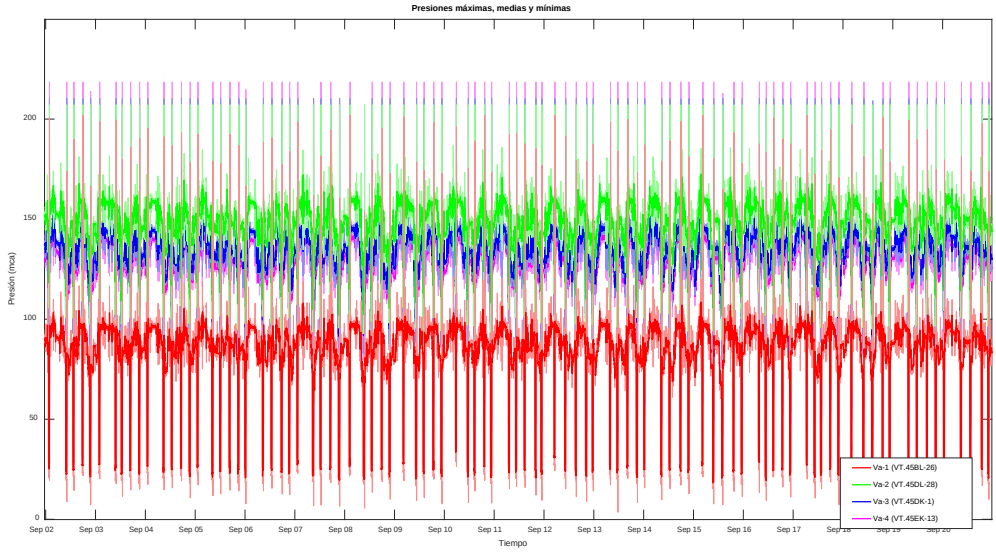


Figura 1.1.1.2.2.1.3. Presiones dos-minutales máximas, medias y mínimas registradas por los equipos instalados en la arteria de estudio

Los aumentos bruscos en la diferencia entre la presión máxima y mínima dieron indicios de la presencia de eventos transitorios, que fueron estudiados en detalle con los datos de 100 Hz de la presión registrados durante el intervalo. De los primeros datos recogidos se observó que la amplitud de este transitorio a la entrada del depósito se encontraba en el rango de los 155-185 m.c.a. Dicha amplitud está directamente relacionada con la presión registrada tras la maniobra de cierre, dada la dependencia del transitorio con el caudal circulante por el ramal (a mayor presión, mayor será el caudal y por tanto la amplitud del transitorio).

Además, se detectó otro tipo de transitorio de menor amplitud y mayor periodo. Estos eventos se observan en la figura 1.1.1.2.2.1.3, en torno a las 3 h del día 17 de septiembre. Las amplitudes máximas de dichos eventos se encuentran entre los 40 y 50 m.c.a. El periodo de dichas oscilaciones es muy superior a las originadas por el cierre de la válvula de llenado, lo que sugiere que su origen pudiese ser distinto. Las comparaciones realizadas con los caudales circulantes y los calados de varios depósitos sugieren que existe una correlación entre el fin del ciclo de llenado y la aparición de transitorios, lo que apunta a que existirían varios depósitos que están causando transitorios y cuyas amplitudes en el origen podrían ser similares a las observadas en el ramal de estudio.

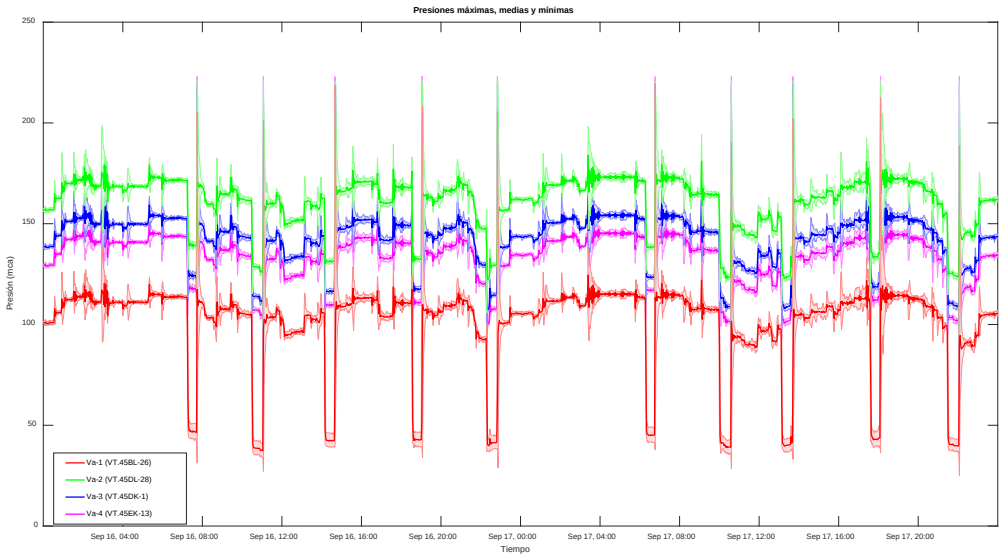


Figura 1.1.1.2.2.1.4. Detalle de presiones dos-minutales máximas, medias y mínimas registradas por los equipos instalados en la arteria de estudio

Monitorización de evento transitorio

El evento que se muestra a continuación corresponde a uno de los de mayor amplitud que se detectaron asociados al cierre de la válvula de llenado del depósito. La amplitud máxima llegó a alcanzar 197 m.c.a. en 16 segundos, como se aprecia en las figuras 5xx y 6xx. Los datos registrados en cada uno de los sensores se resumen en la tabla 1, donde se muestra la distancia al origen de los transitorios (válvula de llenado del depósito) de cada uno de los puntos de monitorización, así como las presiones máximas, mínimas, la amplitud máxima registrada, el tiempo en que se produce dicha amplitud, así como la duración total del evento transitorio registrado en cada uno de los sensores instalados.

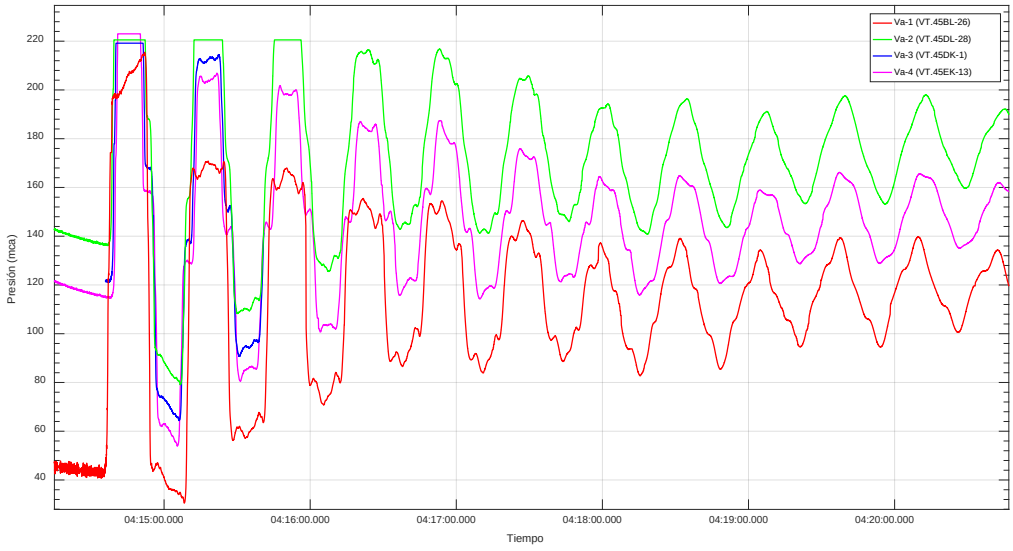


Figura 1.1.1.2.2.1.5. Transitorio asociado al cierre de la válvula de llenado del depósito de estudio.

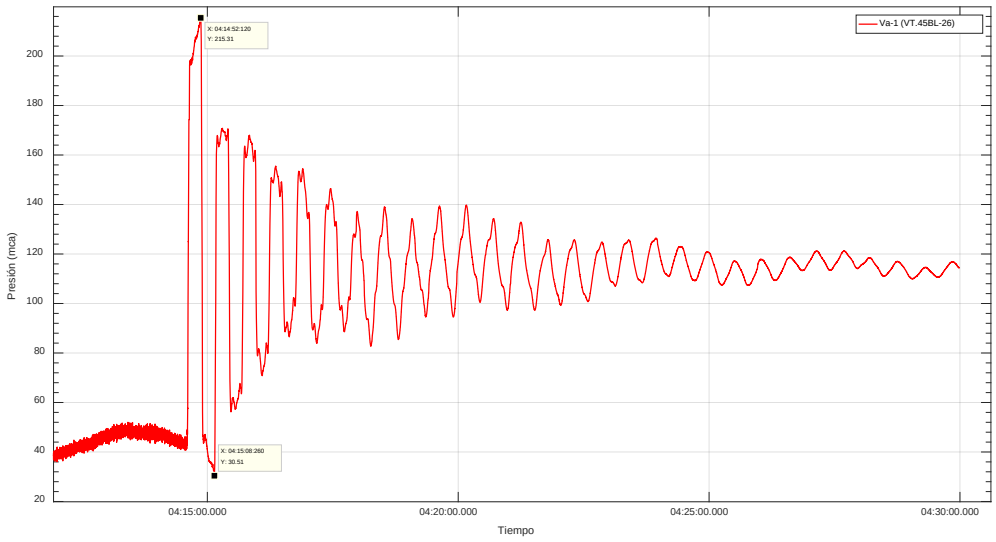


Figura 1.1.1.2.2.1.6. Detalle del transitorio originado por cierre de válvula de llenado del depósito en el registrador Va-1.

A pesar de que no se pudieran registrar las presiones máximas exactas alcanzadas en los puntos de monitorización (Va-2, Va-3 y Va-4), las estimaciones realizadas sugieren que las amplitudes serían mayores que en el origen del transitorio. De acuerdo con las estimaciones realizadas, y dado que se detecta una leve amplificación del transitorio en los sensores más alejados (ubicados hasta a 3,7 km del origen del transitorio), las presiones máximas de este evento superarían el timbraje de las tuberías (PN25) y el de la válvula de llenado (PN16).

Como conclusión, a través de la monitorización de este caso de estudio se han confirmado la existencia de transitorios con amplitudes elevadas que ocurren en escasos segundos y presiones máximas que superan el timbraje de las tuberías y de los componentes del sistema. Esto cobra especial relevancia si se tiene en cuenta que la maniobra estudiada tiene lugar varias veces al día en la operación normal de la red.

1.1.1.3. CAPACIDAD ESTRUCTURAL

En los últimos años, se han demostrado los **beneficios de una monitorización precisa de las infraestructuras** de tuberías enterradas, hasta el punto de haberse vuelto cada vez más evidente para los propietarios de estos activos. Estos activos envejecen y son propensos al deterior y a fallos en muchas ocasiones no predecibles. Hasta hace tiempo, las tareas de monitorización se basaban principalmente en inspecciones poco frecuentes en un solo lugar, lo que resultaba costoso y además lento.

El deterioro de las conducciones y sus elementos asociados provoca fugas, tiene un **impacto negativo en el funcionamiento de zonas urbanas** por los inconvenientes que conlleva la realización de obras de urgencia de reparación o renovación. Teniendo en cuenta, además, que el **agua es un recurso escaso y muy valioso**, los operadores de estos sistemas no pueden permitirse el lujo de no detectar fallos en sus infraestructuras con las consecuencias que ello conlleva. Las estadísticas dejan claro que poseer conocimiento sobre el estado de infraestructuras tiene beneficios de ahorro de dinero y puede conducir en última instancia a establecer un

programa de mantenimiento y renovación económico mucho más proactivo, dando como resultado una gran reducción del número de fallos inesperados.

La EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) define la evaluación del estado de las tuberías como "la recopilación de datos e información mediante inspección, observación e investigación directas y monitoreo e informes indirectos y el análisis de los datos y la información para tomar una determinación del estado estructura, operativo y de desempeño de los activos de infraestructura de capital".

A continuación, se resumen algunos métodos de inspección de tuberías tradicionales:

a) Métodos directos:
   a. **Inspección visual:** esta categoría incluye la inspección por circuito cerrado de televisión (**CCTV)** y métodos de escaneo láser del interior de la tubería. La unidad de inspección CCTV consta de una cámara y un dispositivo de iluminación instalados en un soporte móvil que puede moverse a través de tuberías. Los datos registrados se examinan manualmente. El escaneo láser adquiere información sobre el perfil interior para posterior análisis y determinación de diámetro, perímetro y sección transversal. La precisión de estos métodos depende de la rugosidad y color de la tubería, pero existen opciones comerciales que lo hacen con altas velocidades de escaneo y alta resolución. El principal inconveniente de estos métodos es que requieren el vaciado de la tubería, con los problemas de explotación y corte de suministro que conlleva en caso de no tener duplicadas o malladas las redes.
   b. **Métodos acústicos y ultrasonidos**: existen una amplia variedad de técnicas y dispositivos, destacando a continuación sólo algunos de ellos. Por ejemplo, el **método del eco de impacto** que es una prueba común para determinar espesor y geometría de la tubería. Se basa en golpear una superficie de prueba con un martillo de impacto y registrar su respuesta con un acelerómetro colocado cerca del impacto. El método es versátil puesto que se puede utilizar en diversos materiales y diámetros, pero siempre requiere el acceso a la pared de la tubería de forma externa o interna. Por otra parte, tenemos los **acelerómetros o hidrófonos** usados de forma más habitual para la detección de fugas y que se comentan en capítulo posterior. Estos dispositivos detectan la fuga mediante la conexión en dos puntos de contacto de la tubería y determinando el desfase de tiempo entre dos señales generadas por fuga. Son muy precisos en el caso de fugas pequeñas y ruido de fondo elevado. También cabe destacar la tecnología **SmartBall**, que hace uso de un sensor pasivo que viaja con el flujo de agua y detecta presencia, ubicación y tamaño de fugas. **Sewerbatt** es otra tecnología que mediante la colocación de instrucción a la entrada de una tubería a través de un acceso permite detectar daños en paredes, conexiones laterales o bloqueos mediante el análisis de la onda acústica que genera la instrumentación instalada. Los métodos ultrasónicos incluyen **ultrasonido de onda guiada**, donde la señal se propaga a lo largo de la tubería y detecta ubicación y tamaño de defectos, ultrasonido que utiliza transductor puntual para estimar espesor de la pared de tubería y así detectar corrosión. Existen también otras tecnologías que emplean haces de sonido con diferentes formas y direcciones, para interpretar defectos complejos como pérdida de metal o grietas en las paredes de conducciones.
   c. **Métodos electromagnéticos**: La mayoría de los métodos electromagnéticos emplean corrientes parásitas. El sistema de **corrientes parásitas de campo remoto (RFEC)** utiliza una bobina excitadora impulsada por corriente alterna de baja frecuencia y una o más bobinas detectoras que se colocan dentro de una tubería. Un campo electromagnético entre estas bobinas se propaga libremente a través de la tubería y cualquier cambio en su magnitud o

fase puede atribuirse a discontinuidades en la tubería. La **técnica electromagnética de banda ancha (BEM)** es similar a RFEC, pero utiliza una señal de banda ancha en lugar de una frecuencia única. La **prueba de corrientes parásitas pulsadas (PEC)** permite estimar el espesor de la pared de una tubería de acero midiendo la fuerza del campo magnético a una distancia de la superficie de la tubería y relacionándola con el espesor de la tubería. Los métodos sin corrientes parásitas incluyen el **radar de penetración terrestre (GPR),** que se basa en la transmisión de señales electromagnéticas al suelo y relaciona la señal reflejada con eventos subterráneos, como huecos causados por fugas o profundidad anormal de la tubería causada por cambios en la velocidad de propagación de la señal como viaja a través de suelo saturado de agua. El método de **fuga de flujo magnético (MFL)** crea campos magnéticos en la pared de una tubería ferrosa utilizando imanes grandes, donde las anomalías darán como resultado un cambio en la distribución del flujo magnético. Sólo se puede utilizar en el exterior de una tubería y en tuberías limpias y sin revestimiento.

d. **Métodos radiográficos**: Estos métodos utilizan señales gamma (para tuberías ferrosas y de hormigón) y rayos X (para tuberías de plástico) para mapear huecos o irregularidades del material en una tubería enviando la señal a través del material a una placa fotográfica o una cámara digital. El método de rayos X tiene la limitación de que las tuberías con un diámetro de 381 mm o mayor deben vaciarse antes de la inspección.
e. **Métodos de termografía**: Las pruebas termográficas utilizan una fuente externa de calor para calentar una tubería que se va a inspeccionar y una cámara infrarroja (IR) para monitorear el enfriamiento de la tubería. Al examinar sus características de enfriamiento, es posible determinar si la tubería tiene algún daño. Los métodos radiográficos y termográficos son relativamente caros y se utilizan principalmente para inspeccionar infraestructuras de tuberías críticas en las industrias petroquímica y nuclear.

b) Métodos indirectos:

a. **Caracterización del suelo**: Este método explora parámetros del suelo que pueden ser indicativos del deterioro de tuberías enterradas. Así, por ejemplo, la resistividad del suelo (una resistividad mayor está relacionada con mayor corrosión), el pH (valores por debajo de 4 o por encima de 8 está relacionado con corrosión de tuberías ferrosas) y el contenido de sulfatos (su variación puede afectar a la lixiviación del cemento y provocar adelgazamiento de las paredes de la tubería).
b. **Resistencia a la polarización lineal (LRP) del suelo**: La corrosión de las tuberías a menudo ocurre debido a la exposición a tierra saturada que actúa como electrolito. Uno de los métodos para deducir la tasa de corrosión de una tubería es medir una corriente eléctrica que se induce como resultado de una débil diferencia de potencial aplicada entre dos electrodos. Esta corriente será directamente proporcional a la corriente que provoca la corrosión y posteriormente a la velocidad de corrosión de la tubería.
c. **Estudio de potencial de tubería a suelo**: Este método se puede aplicar para determinar espacios en el revestimiento protector de una tubería ferrosa o su tasa de corrosión. Para la primera aplicación, se puede utilizar el método de gradiente de voltaje de corriente continua (DCVG), donde se aplica una corriente continua a la tubería y se mueven dos electrodos a lo largo de la superficie, buscando anomalías en el voltaje medido. Para este último, se utiliza un electrodo para determinar el potencial tubería-suelo alrededor de la tubería.

Sin embargo, estos métodos en general son lentos, requieren contacto directo con la superficie de la tubería e implican intervención humana. Los problemas descritos con los métodos de vigilancia de tuberías existentes significan que existe la necesidad de técnicas de monitorización novedosas que puedan aplicarse a una variedad

de tuberías y puedan detectar defectos con alta precisión y durante un periodo de tiempo prolongado. Uno de los métodos potenciales que cumple estos criterios son los **sensores basados en tecnología de cable de fibra óptica**. Se ha dedicado un capítulo específico en este documento para la descripción de este tipo de tecnología (vínculo).

1.1.1.3.1. DETECCIÓN TEMPRANA DE FUGAS O LOCALIZACIÓN DE LAS MISMAS UNA VEZ PRODUCIDAS.

La criticidad en el suministro de agua de las redes en arterias hace recomendable su control continuo con el objeto de poder detectar de forma temprana las posibles anomalías que pudieran aparecer. En este sentido, además de las tecnologías mencionadas previamente para la medición de caudales, presiones y la detección de posibles transitorios, se dispone de **sensores tipo hidrófono**, los cuáles, instalados a lo largo de las conducciones con una separación entre 500 y 1.000 metros aproximadamente, auscultan permanentemente los ruidos que se producen en dichas tuberías, pudiendo así detectar las **posibles fugas en su fase más incipiente**. La instalación de los hidrófonos se realiza sobre tomas directas en las conducciones a auscultar (ventosas, hidrantes, desagües o tomas en carga), mediante una rosca 1 1/2 " de fácil instalación. Los hidrófonos se conectan con un registrador de datos con capacidad de envío a plataformas específicas para tratamiento y análisis de los datos, incluyendo la correlación automática entre los sonidos captados por los sensores.

Esta detección temprana permite anticipar futuros problemas que en muchos casos tienen consecuencias no deseables en la operación del sistema de abastecimiento.





Imagen 1.1.1.3.1.1. Dos de las tecnologías más avanzadas presentes actualmente en el mercado son los hidrófonos Permanet HY (Imagen izquierda) y Pipeminder Acoustic One (imagen derecha). Ambas tecnologías, además de sensores de ruido de alta sensibilidad, disponen de un transductor de presión interno de altas prestaciones para la detección de transitorios y antena GPS para la sincronización horaria entre las unidades. Equipos ofrecidos por la empresa Mejoras Energéticas, S.A.

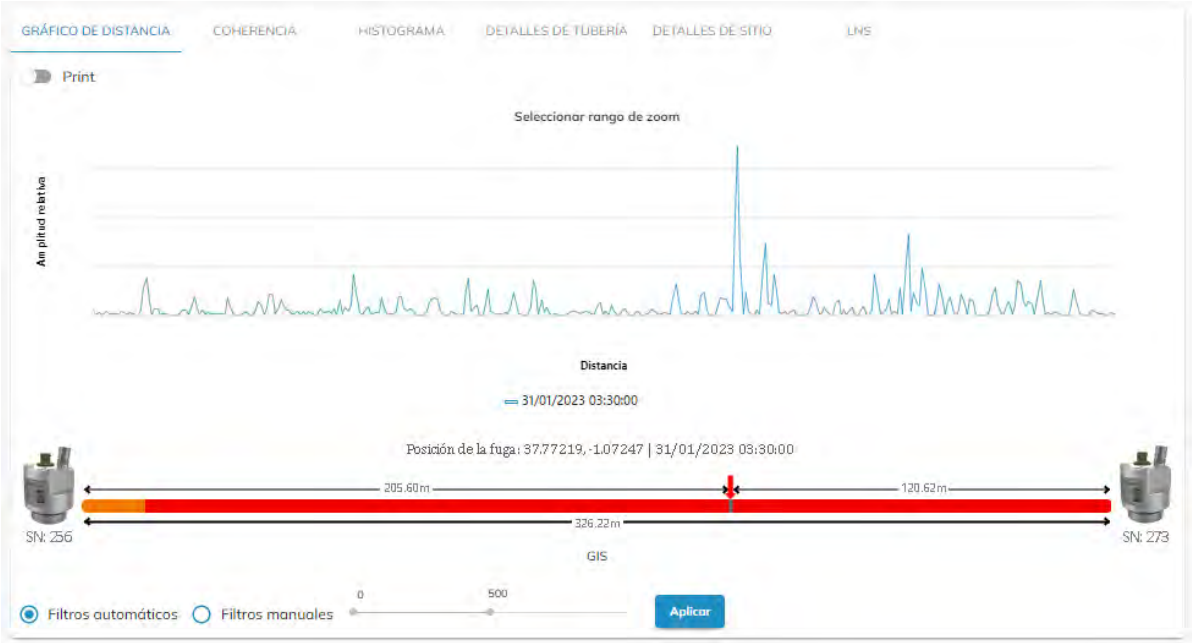


Imagen 1.1.1.3.1.2. Gráficas de correlación obtenidas por la plataforma Permanet WEB. En el caso del equipo Permanet HY, además de las funcionalidades mencionadas de detección de fugas y transitorios, el registrador puede ser utilizado para gestionar los analizadores de diferentes parámetros de calidad del (solución Akwametric®).

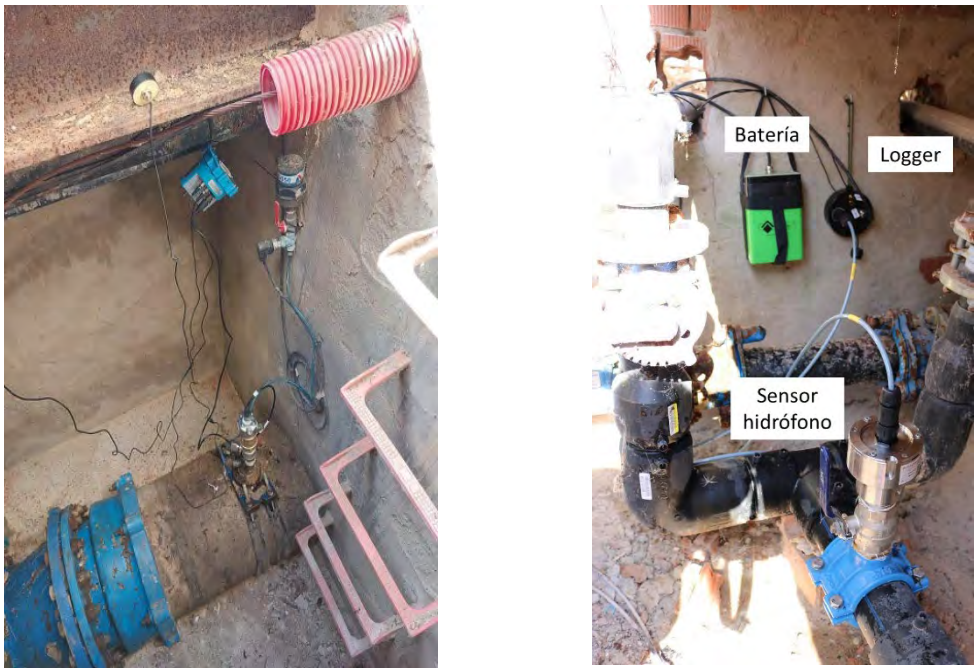


Imagen 1.1.1.3.1.3. A la izquierda hidrófono Pemanet HY instalado en conducción. A la derecha, hidrófono Piperminder Acoustic One instalado en conducción.

1.1.2. PARÁMETROS QUE AFECTAN A LA CALIDAD DEL AGUA SUMINISTRADA

El objetivo del control de la calidad del agua es primordialmente satisfacer el **cumplimiento de normativas legales relativas al agua de consumo** (Enlace a Real Decreto 3/2023). Pero debe hacerse notar, que tal y como establece el citado Real Decreto, los puntos de muestreo quedan determinados en las zonas de abastecimiento en puntos representativos de las mismas (toma de captación, salida de ETAP o depósitos cabecera, distribución o regulación, puntos de entrega entre operadores y red de distribución). Si bien, las arterias o grandes conducciones no están sujetas a priori a estos controles, resulta fundamental, poder **anticiparse** a los fenómenos que pudieran darse de manera puntual o prolongada en el tiempo, entre otros:

- Fenómenos de crecimiento bacteriano en el interior de las conducciones y elementos de regulación y control.
- Estabilidad del método de desinfección. Estabilidad de monocloramina a lo largo de conducciones y su efecto estacional debido a variación en la temperatura del fluido.
- Fenómenos de nitrosación y nitratación que derivan en formación de nitritos en la red.
- Posibles transferencias de material de la conducción al agua suministrada.
- Turbidez producida por fenómenos de sedimentación en las conducciones, variaciones de velocidad en el flujo o sectorización.

Por ello, resulta fundamental, **identificar los puntos críticos del sistema y elegir el parámetro a monitorizar más adecuado** al fenómeno que se quiere controlar.

De forma histórica el control de calidad se abordaba desde dos puntos de vista:

a) toma de muestra, traslado a laboratorio, análisis y resultados. Algunos métodos de ensayo requieren varios días para la obtención de resultados, como puede ser el caso de parámetros microbiológicos.
b) Toma de muestra y análisis con medidores portátiles in situ tipo óptico o espectrofotométrico, que ofrece la posibilidad de valorar un cumplimiento puntual en una localización determinada de la red.

Se impone, cada vez más el uso de **medidores en continuo** como la alternativa para poder no sólo **detectar incumplimientos puntuales de manera automática** sino también como **herramienta para analizar tendencias y establecer protocolos de actuación en base al análisis** de estos datos. Así, por ejemplo, la monitorización de los parámetros de desinfección del agua (cloro libre o cloro total), permiten detectar la presencia de fenómenos como crecimientos bacterianos inesperados, la monitorización del crecimiento bacteriano permite programar pautas de desinfección adicionales o la monitorización de amonio libre y total en la red es un marcador para detectar procesos en los que se están formando dicloraminas o tricloraminas no deseados en el agua de consumo.

Aunque existen diversas configuraciones y es posible la inserción de ciertos sensores dentro de la propia tubería (como turbidez, crecimiento bacteriano, etc.), parece que **la solución comercial y técnica más ventajosa** es la instalación de by-pass en la conducción sobre la que se quieren obtener datos e instalar un panel de medición con la configuración de sensores elegida para cada ubicación.

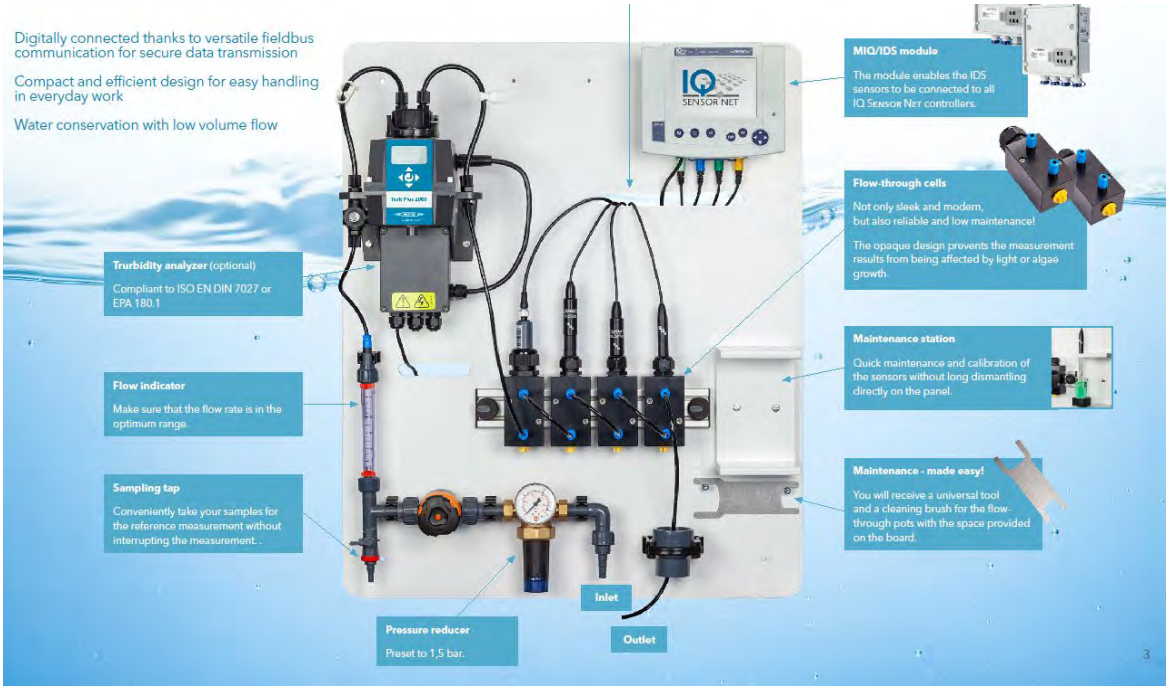


Imagen 1.1.2.1. Ejemplo de configuración de panel de control de calidad instalado en línea (imagen cedida por Xylem).

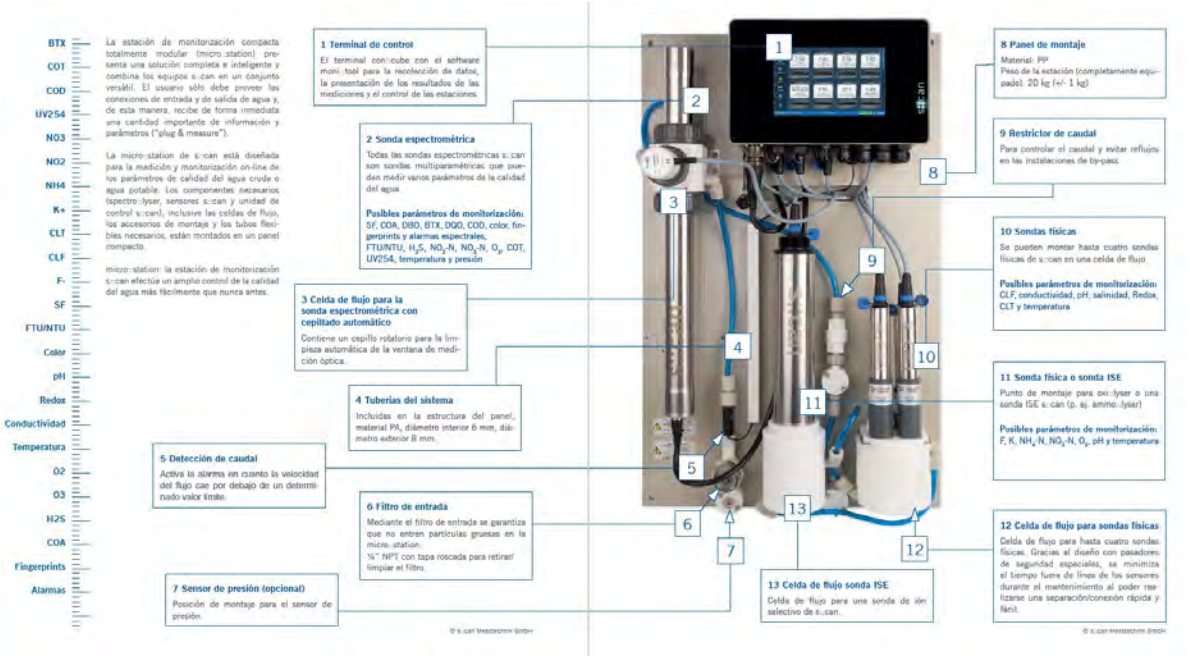


Imagen 1.1.2.2. Esquema de ejemplo y configuración de estación de control de calidad instalado en línea (imagen cedida por SCAN).

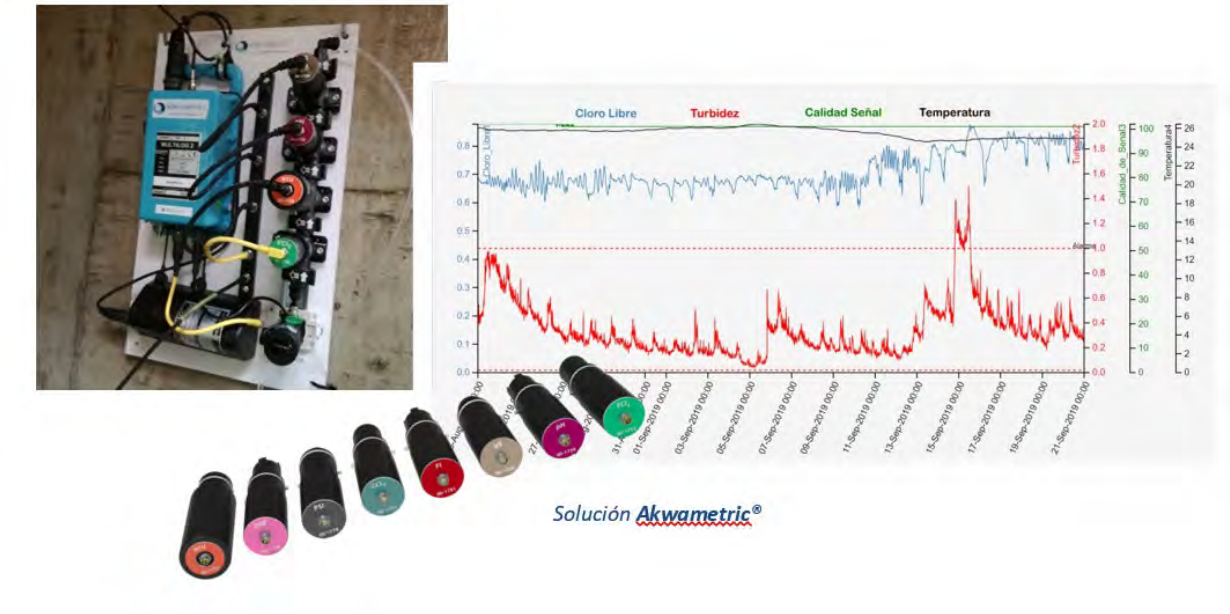


Imagen 1.1.2.3. Ejemplo de configuración de panel de control de calidad instalado en línea (imagen cedida por Mejoras Energéticas, S.A.)

En los siguientes apartados y en el **Anexo 1** de este documento, se presentan distintas alternativas comerciales existentes para la monitorización en continuo de algunos de los parámetros de calidad del agua más destacados:

1.1.2.1. TURBIDEZ

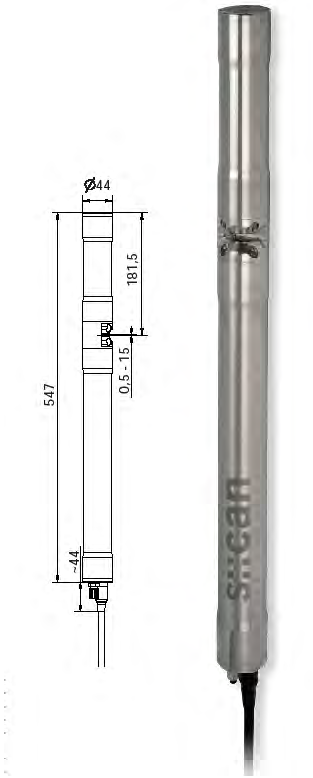
La turbidez es uno de los parámetros que más se controlan en la calidad del agua, por ser un indicativo de contaminación. Así lo establece el RD 3/2023 (Enlace a Real Decreto 3/2023) incluyéndolo en la lista de "valores paramétricos indicadores de calidad" y aunque el valor de incidencia se ha marcado en este Real Decreto en 4 UNF, sólo por encima de 6 UNF se consideraría un valor no apto para el consumo. Los límites de turbidez legalmente establecidos están pensados para garantizar un agua visual e higiénicamente perfecta.

El **control de la turbidez** del agua está **estrechamente relacionado con la eficacia de los procesos de desinfección**, tanto químicos (cloro u otros biocidas) como físicos (radiaciones UV). A mayor turbiedad, mayor cantidad de sólidos en suspensión en el agua, lo que aumenta la posibilidad de desarrollo de bacterias, virus y protozoos patógenos en los micro huecos de las partículas en suspensión, y la disminución de la eficacia de los desinfectantes.

Además de partículas inertes en suspensión, el agua turbia puede contener también materia orgánica en suspensión, lo que inhibe el efecto del biocida, que se oxida y se pierde al reaccionar con la materia orgánica. Esta reacción puede dar lugar a la formación de subproductos de la desinfección, como los **trihalometanos** y las **tricloraminas**, nocivos para la salud humana.

Por tanto, aunque no es común un incumplimiento de turbidez en agua tratada, a menos que sea debido a cambios en la explotación de los sistemas de distribución, sí es muy aconsejable el **análisis de tendencias que puedan alertar sobre cambios de comportamiento del fluido**.

Los sensores de turbidez presentan la gran ventaja de ser muy robustos y permiten la inserción de los mismos en la propia tubería. La mayoría de las fabricantes, ofrecen esta alternativa para el análisis en continuo de turbidez para tuberías superiores a DN80, con el inconveniente de la limitación de presión (en función del fabricante la presión máxima admitida varía entre 6 a 11 bar). Sin embargo, **si el explotador está interesado en controlar no sólo la turbidez sino también otros parámetros adicionale**s como cloro, amonio o nitritos, **la solución óptima puede ser realizar la medida en by-pass.**



- s::can “plug & measure”
- principio de medición: espectrometría UV-Vis a lo largo de todo el rango (190-750nm)
- sonda multiparamétrica con paso óptico abierto ajustable
- ideal para aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas potables y aguas residuales
- estable a largo plazo y libre de mantenimiento durante la operación
- precalibrado en fábrica, calibración local multi-punto posible
- limpieza automática con aire comprimido
- montaje y monitorización directamente en el medio (InSitu) o en una celda de flujo (estación de monitorización)
- funcionamiento vía terminales & software s::can
- posible adaptación robusta y precisa del paso óptico a 35 mm, 15 mm o 5 mm
- de fácil montaje

agua potable

		rangos de concentración y tipo de sensor/sonda para esta aplicación					
		turbidez [NTU/FTU]	NO_3-N [mg/l]	COT [mg/l]	COD [mg/l]	UV254 [Abs/m]	UV254 f [Abs/m]
multi::lyser™ II (NO_3-N, DOC)	mín.	0	0		0		
	máx.	170	20		15		
multi::lyser™ II (NO_3-N, TOC)	mín.	0	0	0			
	máx.	170	20	20			
multi::lyser™ II (NO_3-N, UV254)	mín.	0	0			0	
	máx.	170	20			70	
multi::lyser™ II (NO_3-N, UV254f)	mín.	0	0				0
	máx.	170	20				55
multi::lyser™ III (turbidez, NO_3-N, COD)	mín.	0	0		0		
	máx.	170	20		15		
multi::lyser™ III (turbidez, NO_3-N, COT)	mín.	0	0	0			
	máx.	170	20	20			
multi::lyser™ III (turbidez, NO_3-N, UV254)	mín.	0	0			0	
	máx.	170	20			70	
multi::lyser™ III (turbidez, NO_3-N, UV254f)	mín.	0	0				0
	máx.	170	20				55

Imagen 1.1.2.1.1. Características del sensor multi-lyser de SCAN, que puede ser montado directamente en el medio o en celda de flujo. Además, presenta la ventaja de ser un sensor multiparamétrico con diferentes configuraciones posibles.



- s::can “plug & measure”
- turbidez: medición según método EPA 180.1 e ISO 7027, 90°
- nueva tecnología LED
- no hay consumibles ni partes movibles
- material de ventana óptica especial, no ensuciable
- bajo consumo de potencia (menos de 1W típicamente)
- ópticos de doble haz compensados
- limpieza automática con aire comprimido opcional (InSitu, sólo para versión -075 con cable fijo) o cepillo automático
- parámetros filtrados (DOC, color_tru, UV254_f) y transmisión (T10, T100) disponibles
- estable a largo plazo, 100% libre de corrosión
- enchufe o cable fijo
- 5000 horas de operación libre de mantenimiento
- montaje y monitorización directamente en el medio (In Situ) o en una celda de flujo (estación de monitorización)
- se puede montar directamente en una cañería/tubería de presión
- funcionamiento vía terminales & software s::can



Imagen 1.1.2.1.2. Características del sensor I-scan de SCAN. que puede ser montado directamente en el medio o en celda de flujo. A la derecha puede verse la configuración del sensor montado en panel.

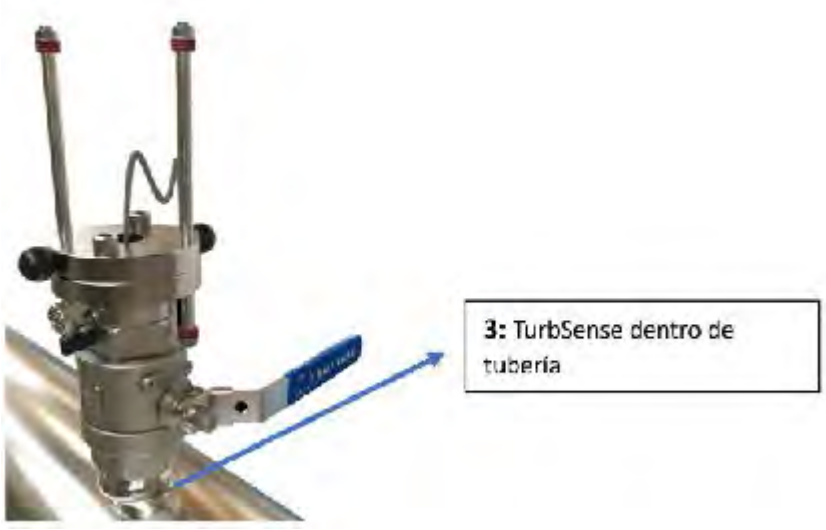


Imagen 1.1.2.1.3. Sensor TurbSense de la empresa IZASA instalado mediante inserción en tubería. En ese caso el diámetro mínimo recomendado es de 300 mm debido a posibles interferencias de las reflexiones del emisor led con las paredes internas de la tubería. Soporta una presión máxima de 10 bar. Está diseñado para un funcionamiento continuo. En funcionamiento normal no requiere de ningún mantenimiento gracias a la tecnología patentada Mutolux en combinación con el sistema de lavado automático.

1.1.2.2. pH

El pH es un indicador que muestra el **grado de acidez o alcalinidad, en este caso del agua.** Está relacionado con la concentración de iones de hidrógeno en el agua, de ahí su nombre, pH, que significa potencial de hidrógeno.

El pH es otro de los parámetros que más se controlan en la calidad del agua, dado que muchas reacciones químicas se activan o inactivan en función del pH del medio. Así lo establece el RD 3/2023 (Enlace a Real Decreto 3/2023) incluyéndolo en la lista de "valores paramétricos indicadores de calidad". Como norma general las aguas de consumo estarán comprendidas en pH entre 6,5 y 9,5 unidades de pH, aunque tal y como advierte el propio Real Decreto **el agua en ningún momento podrá ser ni agresiva ni incrustante**. (El resultado de calcular el Índice de Langelier debería estar comprendido entre +0,5 y –0,5. Se sugiere, también, la utilización del Índice de Ryznar). Los valores de pH deberán estar siempre en concordancia con el sistema de desinfección utilizado para que sea eficaz. Los **valores de no aptitud** se han fijado para **pH menores de 4,5 y mayores de 10 unidades de pH**.

Hablamos de **aguas corrosivas**, cuando tienen tendencia a disolver metales y de **aguas incrustantes** a aquellas que forman precipitados insolubles que se adhieren a las paredes interiores de las conducciones y elementos instalados en las mismas. En ambos casos, esto provocara el deterioro prematuro de las conducciones y de las instalaciones interiores de clientes, con mayores costes de explotación y una necesidad de inversión por renovación de conducciones sin llegar a agotar la vida útil de las mismas.

Las aguas con elevada concentración de cloruros y sulfatos cuentan con pH bajos (ácidos) y su capacidad de corrosión aumenta con la temperatura. En estos casos, el operador o explotador deberá poner énfasis en el control del pH y temperatura.

Las aguas con altas concentraciones de sales como Calcio, Magnesio o Selenio y en presencia de aguas incrustantes generan precipitados en las paredes de tuberías. Por tanto, es crucial a la hora de elaborar un buen plan de mantenimiento controlar el pH, que en estos casos será alto (básico) debido a la concentración de estas sales.

Mantener el **pH del agua estable garantiza la seguridad de su consumo** y evita posibles problemas graves. La alteración del pH del agua **puede cambiar la concentración de otras sustancias que la hagan tóxica** como, por ejemplo, un descenso del pH puede aumentar la cantidad de mercurio soluble en agua.

El **Índice de Langelier** es uno de los indicadores clave y más sencillos de usar para determinar si un agua es corrosiva o incrustante y en qué grado para poder hacer los tratamientos necesarios. Este índice, que no tiene unidades, se obtiene al combinar varios parámetros físico-químicos del agua. Podría definirse como la indicación del grado de saturación del carbonato de calcio en el agua, el cual se basa en el pH, la alcalinidad y la dureza de la misma. El valor del agua equilibrada es 0 y el rango ideal para el índice de Langelier está entre -0.5 y +0.5:

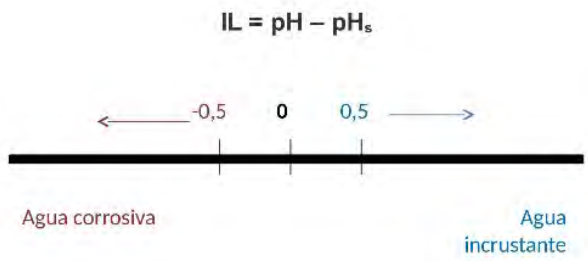
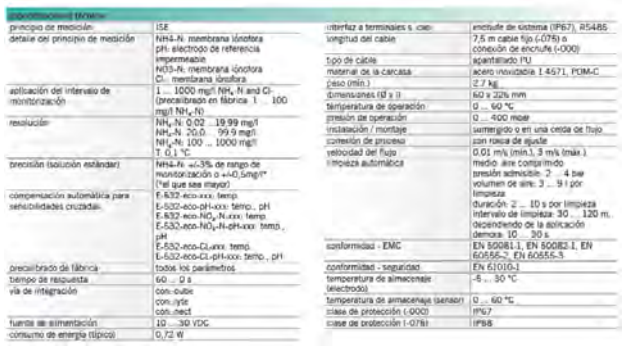


Imagen 1.1.2.2.1. Índice de Langelier. pHs es el valor del pH calculado para el agua saturada de carbonato de calcio. Su valor varía en función de la temperatura, la dureza, la alcalinidad y los sólidos totales disueltos.

Si el índice es positivo y superior a 0.5, se trata de un agua incrustante y el carbonato de calcio podría precipitar y formar placas calcáreas. Si el valor es negativo e inferior a -0.5 debe interpretarse que el agua es corrosiva y podría atacar a los equipos. En ambos casos, se deben tomar medidas para ajustar el pH, la alcalinidad total o la dureza.

Existen muchas alternativas comerciales para la medición de pH en continuo, incluso algunas sondas para medir otros parámetros como el amonio o nitritos que a su vez miden pH, temperatura y otros parámetros con la finalidad de compensar posibles interferencias que se producen especialmente cuando la matriz del agua no es estable (concentraciones bajas del elemento a detectar). A continuación, se presenta un ejemplo de solución comercial, que se puede instalar en el medio o en by-pass (estación de monitorización) para multiparámetros:





principio de medición	ISE			interfaz a terminales s::can	enchufe de sistema (IP67), RS485	
detalle del principio de medición	NH_4-N: membrana ionófora pH: electrodo de referencia impermeable NO_3-N: membrana ionófora Cl-: membrana ionófora			longitud del cable	7,5 m cable fijo (-076) o conexión de enchufe (-000)	
				tipo de cable	apantallado PU	
aplicación del intervalo de monitorización	1 ... 1000 mg/l NH_4-N and Cl- (precalibrado en fábrica: 1 ... 100 mg/l NH_4-N)			material de la carcasa	acero inoxidable 1.4571, POM-C	
				peso (min.)	2.7 kg	
resolución	NH_4-N: 0.02 ... 19.99 mg/l NH_4-N: 20.0 ... 99.9 mg/l NH_4-N: 100 ... 1000 mg/l T: 0.1 °C			dimensiones (Ø x l)	60 x 226 mm	
				temperatura de operación	0 ... 60 °C	
				presión de operación	0 ... 400 mbar	
				instalación / montaje	sumergido o en una celda de flujo	
precisión (solución estándar)	NH_4-N: +/-3% de rango de monitorización o +/-0,5mg/l* (*el que sea mayor)			conexión de proceso	con rosca de ajuste	
				velocidad del flujo	0.01 m/s (min.), 3 m/s (máx.)	
compensación automática para sensibilidades cruzadas	E-532-eco-xxx: temp. E-532-eco-pH-xxx: temp., pH E-532-eco-NO_3-N-xxx: temp. E-532-eco-NO_3-N-pH-xxx: temp., pH E-532-eco-Cl-xxx: temp. E-532-eco-Cl-pH-xxx: temp., pH			limpieza automática	medio: aire comprimido presión admisible: 2 ... 4 bar volumen de aire: 3 ... 9 l por limpieza duración: 2 ... 10 s por limpieza intervalo de limpieza: 30 ... 120 m, dependiendo de la aplicación demora: 10 ... 20 s	
				conformidad - EMC	EN 50081-1, EN 50082-1, EN 60556-2, EN 60555-3	
precalibrado de fábrica	todos los parámetros			conformidad - seguridad	EN 61010-1	
tiempo de respuesta	60 ... 0 s			temperatura de almacenaje (electrodo)	-5 ... 50 °C	
vía de integración	con::cube con::lyte con::nect			temperatura de almacenaje (sensor)	0 ... 60 °C	
				clase de protección (-000)	IP67	
fuente de alimentación	10 ... 30 VDC			clase de protección (-076)	IP68	
consumo de energía (típico)	0,72 W					

agua potable

		rangos de concentración y tipo de sensor/sonda para esta aplicación				
		NH_4-N [mg/l]	NO_3-N [mg/l]	pH [pH]	Cl- [mg/l]	temperatura [°C]
ammo::lyser™ II eco (NH_4-N, temp.)	mín.	0,02				0
	máx.	2				30
ammo::lyser™ III eco+Cl- (NH_4-N, temp., Cl-)	mín.	0,02			0,1	0
	máx.	2			100	30
ammo::lyser™ III eco+NO_3-N (NH_4-N, temp., NO_3-N)	mín.	0,02	0,1			0
	máx.	2	200			30
ammo::lyser™ III eco+pH (NH_4-N, temp., pH)	mín.	0,02		4		0
	máx.	2		10		30
ammo::lyser™ IV eco+Cl- (NH_4-N, temp., Cl-, pH)	mín.	0,02		4	0	0
	máx.	2		10	100	30
ammo::lyser™ IV eco+NO_3-N+pH (NH_4-N, temp., NO_3-N, pH)	mín.	0,02	0,1	4		0
	máx.	2	200	10		30

Imagen 1.1.2.2.23. Ejemplo de sensor "Ammo-lyser" de SCAN para medida combinada de pH combinado con medición de nitritos, cloruros o amonio.

1.1.2.3. CLORO LIBRE Y TOTAL

La monitorización del cloro bien sea como cloro libre o cloro total, es fundamental para asegurar los criterios de desinfección del agua de consumo. Así se define en el Real Decreto 3/2023 por el que se establecen los criterios técnicos-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro, incluyendo como parámetros indicadores de calidad tanto el cloro combinado residual como el cloro libre residual y marcado un valor paramétrico máximo e incluso un valor de no aptitud del agua de consumo. Aunque el valor mínimo, no aparece como tal reflejado en la citada legislación, sí se debe asegurar una concentración mínima del desinfectante para evitar la aparición de otros parámetros indeseables que están íntimamente relacionados con este.

Cada operador del sistema puede optar por estrategias de desinfección distintas, pero es innegable que el análisis en continuo de estos parámetros aporta información muy valiosa para el explotador o mantenedor del sistema.

Dentro de los sistemas de monitorización en continuo para el cloro, cabe destacar que existen dos métodos de análisis, en los que merece la pena detenerse por la repercusión que tiene la elección de uno u otro:

a) **Método amperométrico**: tiene como ventajas que no requiere el consumo de reactivos, el coste de mantenimiento es bajo y tiene respuesta instantánea a variaciones. Sin embargo, aunque la tecnología amperométrica tiene muchas ventajas, es muy sensible a variaciones de pH, temperatura y caudal de agua en la celda de medida, así como al estado de electrodos y contaminación de membranas, lo que requiere una verificación y calibración muy frecuentes.
b) **Método óptico** (DPD): el método óptico requiere el consumo de reactivo y el agua usada en la medida en la celda queda contaminada por el mismo, por lo que debe tratarse adecuadamente. Así mismo los métodos ópticos tienen un tiempo de respuesta de medida aproximada de 2,5 minutos. El agua muestreada que queda “contaminada” depende del fabricante, pero existen alternativas en el mercado con consumos de agua muy bajos (2 ml/medida).

Hay fabricantes que ofrecen métodos híbridos que mejoran la sensibilidad de la medida mediante la combinación de varios sensores con diferentes tecnologías.

En cuanto a los **rangos de medida** y teniendo en cuenta que hablamos de agua potable para el consumo humano, los rangos de medida bajos (de 0a 2 ppm o de 0 a 5 ppm) son los más adecuados para la selección del sensor.

Por último, debe tenerse en cuenta que para rangos de pH por debajo de 4 o por encima de 9 los sensores de cloro libre pierden precisión.

En el Anexo 1, se presentan varias alternativas comerciales

1.1.2.4. CONDUCTIVIDAD

La conductividad es la capacidad que tiene el agua para conducir la corriente eléctrica y está **estrechamente relacionada con la presencia de sales (calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos,** etc.) disueltas en el agua, que se han incorporado de forma natural desde el medio ambiente durante el ciclo del agua. La mayoría de los sólidos que permanecen en el agua después del proceso de filtración son iones disueltos, por ejemplo, el cloruro de sodio se encuentra como Na+ y Cl-. La cantidad total de estos sólidos disueltos en el agua incide sobre el valor de la conductividad del agua. Cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica.

Según el Real Decreto 3/2023 por el que se establecen los criterios técnicos-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro, se fija un valor paramétrico para la conductividad de 2500 µS/cm a 20 ºC. El valor de no aptitud será 4.000. µS/cm a 20 ºC. Se considera un parámetro de confort, pero la superación de valores paramétricos de conductividad puede afectar negativamente al sabor del agua y potenciar problema en instalación asociados a aguas duras, corrosivas e incrustantes. Mantener la conductividad dentro de los **valores paramétricos establecidos por la normativa ayudará a mantener unas características organolépticas del agua adecuadas.**

Otro problema que puede indicar la conductividad es una **excesiva dureza del agua**. El agua dura o agua calcárea es aquella que contiene un alto nivel de minerales disueltos, especialmente sales de calcio y magnesio por litro de agua. Las aguas duras se comportan como incrustantes, al precipitar carbonato cálcico y otras sustancias que se adhieren a las paredes internas de equipos e instalaciones, dificultando el mantenimiento de los equipos de tratamiento de aguas y por otra parte de las instalaciones interiores de clientes (por ejemplo, depósitos en electrodomésticos).

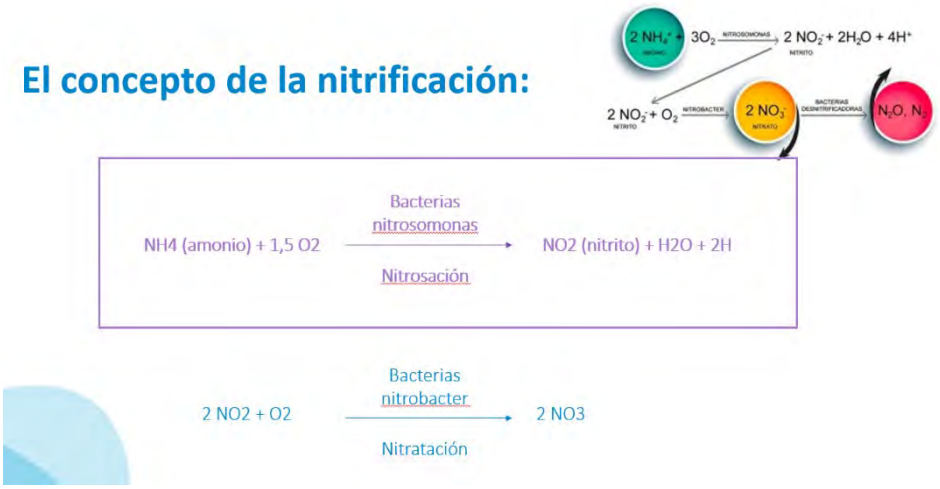
Aunque el carácter incrustante del agua no es directamente un problema para la salud de los consumidores, las incrustaciones pueden dar cobijo a bacterias u otros microorganismos y a la formación de biofilms, que pueden dispersarse por la red de distribución y equipos, y llegar a causar enfermedades, como la legionelosis.

El control de la conductividad en continuo no suele ser necesaria en el caso de arterias y grandes conducciones, si bien queda restringido más al ámbito de la captación y tratamiento. Existen soluciones comerciales para la medición en continuo de la conductividad, por lo que debe ser el explotador de la red el que valore si la observancia de este parámetro y su tendencia en el agua de conducciones aporta información que ayude a la toma de decisiones.

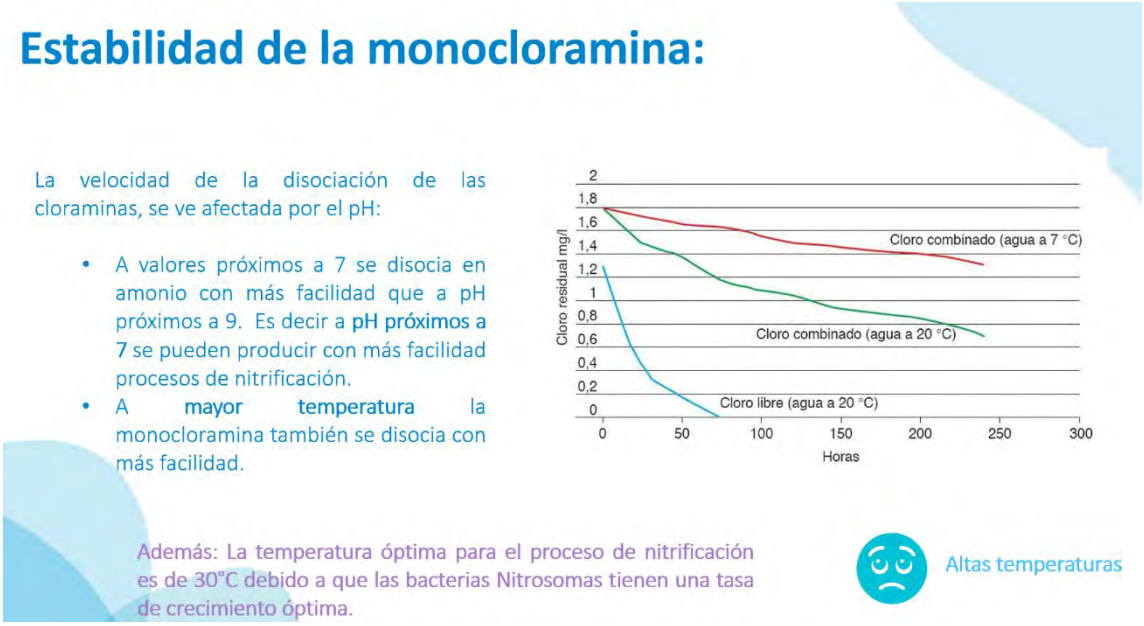
1.1.2.5. NITRITOS

Los nitritos son controlados en el agua potable y exigido mediante legislación según Real Decreto 3/2023 por el que se establecen los criterios técnicos-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. El valor paramétrico máximo establecido es de 0,5 mg/l. El control de este parámetro resulta, si cabe más importante en aquellas redes donde la estrategia de desinfección sea la formación de monocloraminas.

En un sistema ideal de desinfección se añadiría amonio y cloro para formar monocloraminas en proporción exacta para que no quedase amonio libre en el agua potable. Sin embargo, la presencia de amonio libre, en presencia de bacterias nitrosomonas provocan la formación de nitritos:

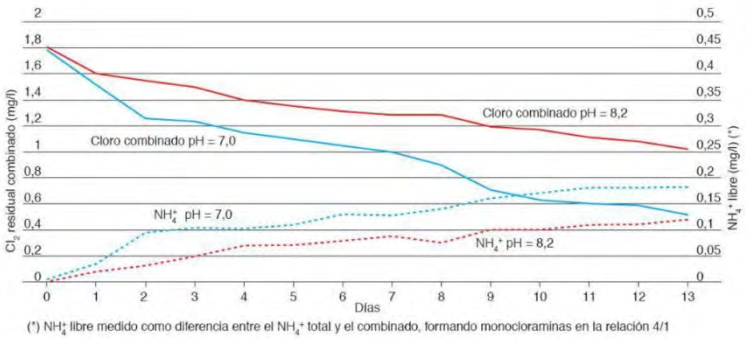


Además, la propia estabilidad de la monocloramina provoca la disociación en cloro y amonio, por lo que la cantidad de amonio disponible para ser convertida en nitrito aumenta a medida que se aumenta el tiempo que pasa entre la desinfección y el consumo:



Estabilidad de la monocloramina:

- A medida que la cloramina se va degradando, mayor es la concentración de amonio libre, que puede ser transformada en nitritos en presencia de bacterias nitrificantes (nitrosomonas). En el hipotético caso, de que toda la cloramina, en su hidrólisis, quedara como amoniaco, se podría volver a formar monocloramina añadiendo cloro, pero este proceso prácticamente no se da.



(*) NH_4^+ libre medido como diferencia entre el NH_4^+ total y el combinado, formando monocloraminas en la relación 4/1

Alcalinidad y pH: La tasa máxima de nitrificación se encuentra entre pH 7,2 y 9,0.
La alcalinidad disminuye durante el proceso de nitrificación debido a que la oxidación del amonio produce ácido nitroso y porque se generan iones hidrógeno e iones nitrito.



pH próximos a 7

La concentración de nitritos aumenta por lo general a bajas concentraciones del desinfectante, cuando sube la temperatura, el pH se encuentra en valores paramétricos de cumplimiento, pero próximos a 7 o superiores a 9 y cuando existe amonio libre en presencia de bacterias nitrosomonas.

En redes de distribución donde se opta por una estrategia de desinfección de cloraminación y, o bien los puntos de consumo se encuentran alejados del tratamiento o bien los tiempos de residencia en depósitos intermedios son altos, es conveniente controlar los nitritos en continuo en la red, siendo una estrategia óptima para adelantarse en la toma de decisiones sobre una posible recloración.

En el Anexo 1, se presenta información ampliada sobre sensores disponibles en el mercado.

1.1.2.5.1. CASO PRÁCTICO DE MONITORIZACIÓN DE NITRITOS EN TIEMPO REAL.

Canal de Isabel II utiliza cloraminas como desinfectante final. La cloramina, una combinación de cloro y amoníaco, puede descomponerse bajo ciertas condiciones. La acción de bacterias nitrificantes puede producir la oxidación del amoniaco presente en el agua y la formación de nitritos como intermediarios. En España, el límite legal máximo para la concentración de nitritos en el agua potable está establecido en 0,5 mg/L según el Real Decreto 140/2003.

Canal, no solo garantizando el cumplimiento legal, sino atendiendo además a su compromiso de ofrecer agua en la mejor calidad posible a sus consumidores, desarrolla varios proyectos orientados a evitar la aparición de nitritos en red.

Por un lado, se han desarrollado diversos proyectos orientados a la detección y disminución del biofilm en la red de abastecimiento. Por otro lado, se han desarrollado proyectos para conseguir disponer de sensores de nitritos in situ y en tiempo real.

En este contexto, se ha validado la tecnología de el sensor Aquamonitrix® en la red de Canal de Isabel II para monitorizar nitritos en tiempo real.

Este sensor permite la monitorización de nitritos y nitratos en diferentes matrices de agua (aguas subterráneas, aguas superficiales, efluentes y aguas de proceso tanto en potabilización como en depuración). Su principio de funcionamiento está basado en la cromatografía iónica seguida de la detección óptica por UV a 235 nm. La muestra pasa a través de una columna de separación de intercambio aniónico que permite la detección selectiva del nitrito y el nitrato.

En Canal se testó la tecnología con aguas reales, haciendo comparativa con resultados de análisis de laboratorio.



Figura 1.1.2.5.1.1 Plano general del sensor Aquamonitrix®

La prueba duró un mes y en este periodo el sensor funcionó adecuadamente y sin incidencias. No se observaron grandes fluctuaciones en la detección de nitritos durante el periodo de estudio, se observó que las gráficas de nitritos obtenidas con el sensor Aquamonitrix®, eran aproximadamente paralelas a las obtenidas con los

analizadores de laboratorio, concluyendo que la capacidad de detección del sensor es buena y los resultados del sensor son aceptables.

1.1.2.5.2. CASO PRÁCTICO DE MONITORIZACIÓN DE LA FORMACIÓN DE MONOCLORAMINA EN TIEMPO REAL.

El cloro, a pesar de ser el principal desinfectante usado en las plantas de tratamiento, reacciona con compuestos presentes en el agua pudiendo generar subproductos de desinfección (DBPs) que deben controlarse. En este contexto y con el fin de asegurar la calidad del agua potable, Canal está participando en la actualidad en el proyecto HE intoDBP, financiado por el programa Horizonte Europa, cuyo objetivo es ampliar el conocimiento sobre la formación de DBPs y su impacto en la salud humana. El consorcio del proyecto reúne a 16 socios de 10 países y aborda cuatro casos de estudio en Irlanda, Chipre y España, específicamente en Madrid y Barcelona.

Canal lidera el caso de estudio de Madrid, que se está desarrollado en la planta piloto de la ETAP de Valmayor. En la Comunidad de Madrid se emplea monocloramina como desinfectante final en lugar de cloro, pero se ha comprobado que una incorrecta formación de monocloramina también puede generar DBPs como el NDMA. Con este proyecto se busca optimizar el proceso de generación de monocloramina para mejorar la dosificación de reactivos y reducir la formación de subproductos indeseados.

El objetivo para Canal es desarrollar un enfoque integral para la vigilancia del agua potable, desde la fuente hasta el punto de consumo, utilizando tecnologías avanzadas con metodologías y algoritmos basados en inteligencia artificial que permitirán monitorizar la red de distribución.

En el marco de este proyecto, Canal ha colaborado en el diseño un innovador sistema de mezcla de cloro y amoniaco, denominado MITO3X® que ha sido instalado en la planta piloto de Valmayor (figura 1.1.2.5.2.1).

Esta plataforma diseñada para la generación de la monocloramina cuenta con un sistema de dosificación y mezcla de reactivos basado en bombas centrífugas, junto con sensores spectro::lyser® UV-VIS espectrofotométricos en línea para la detección de DBPs a la salida de la planta. Todo ello permite monitorizar el proceso de generación, y unido a un complejo proceso de machine learning, es capaz de generar alertas tempranas, incluso permitirá actuar para corregir la situación en caso necesario. Así se logra reducir la formación de subproductos sin comprometer la eficacia de la desinfección.



Figura 1.1.2.5.2.1. Plataforma tecnológica MITO3X® instalada en el Interior de la planta piloto de la ETAP de Valmayor (Madrid)

1.1.1.4. CRECIMIENTO BACTERIANO

Existen en el mercado algunas alternativas para la **detección de biopelícula depositada en la superficie de las conducciones**. El depósito de este biofilm puede originar la obstrucción puntual de la conducción o sus elementos, pero también el crecimiento de colonias de bacterias que pueden ser precursoras de elementos no deseados en el agua de consumo. Así, por ejemplo, las bacterias Nitrosomas y Nitrobacter son las causantes de procesos de nitrosación y nitratación, favoreciendo la presencia de nitritos en el agua de consumo. Sin embargo, cabe aclarar que **los métodos disponibles en el mercado hoy en día para la detección en continuo no determinan qué colonia o en qué cantidad está presente en el agua**, para lo que hay que recurrir a los métodos tradicionales en laboratorio mediante cultivo. Lo que sí ofrecen es la posibilidad de realizar una **detección temprana del crecimiento del biofilm**.

Las **ventajas** de los sistemas existentes actualmente es que son fáciles de instalar y operar, ya que quedan insertados en la tubería e incluso en depósitos. Su **mantenimiento es prácticamente nulo** y tienen una **alta sensibilidad**. Por la contra, debe elegirse bien la localización de estos sensores, para evitar situarlos aguas debajo de puntos de desinfección de red o próximos a fuentes de distorsión como nodos en los que se realicen maniobras que impliquen cambios de velocidad brusca en el flujo. El número de sensores a instalar dependerá de la línea de agua, su homogeneidad y estructura, dándose situaciones en las que un número muy limitado de sensores pueden proporcionar información suficiente sobre el desarrollo de biopelículas.

Por otra parte, cabe destacar que la medición de concentración bacteriana en un líquido (en este caso el agua) puede resultar no fiable en algunos casos, puesto que algunas bacterias tienden a forma flóculo, por lo que si la recogida de muestras contiene un mayor número de flóculos dará una medición superior a la real o viceversa. Además, **los depósitos de biofilm resultan significativamente más resistentes a los tratamientos desinfectantes respecto a las bacterias libres en el agua**. Por tanto, la manera más efectiva de controlar el crecimiento bacteriano es mediante la medición en continuo del depósito de biofilm en conjunto con las tomas de muestra para análisis microbiológico en laboratorio.

A continuación, se presentan la ficha de características técnicas e imágenes cedidas de la empresa EIGIDION, con una propuesta para monitorización de biofilm en arterias:

Características técnicas	
Tipo de técnica usada	Señal bioelectroquímica producida por las bacterias. Esta señal está directamente relacionada con la actividad biológica de las bacterias y es proporcional al área de superficie cubierta por la biopelícula. Por tanto, el sistema monitoriza sólo bacterias vivas y no otros tipos de contaminación como depósitos minerales, grasas, proteínas, etc.
Dimensión mínima tubería	Cualquier diámetro, teniendo en cuenta que el sensor queda insertado en la tubería 3,7 cm (se adjunta fotografía)
Presión admisible	10 bar
¿Consumo de reactivo?	Ninguno
Rango de medida	No aplica
Calibración exigida	No
Mantenimiento necesario	No

Características técnicas	
Condiciones de temperatura, humedad, etc.	De -10 a 60ºC. Humedad: no aplica
Consumo energético	Batería de 12V para toma de datos cada 2 horas y transmisión 2 veces al día. Se puede dimensionar en función de necesidades.
Transmisión de datos en remoto/ tiempo real o diferido	Recomendado cada 2 horas con 2 transmisiones al día. Exige cobertura al menos 3G. Almacena datos en caso de falta de cobertura puntual y luego transmite.
Tamaño de la estación y requerimientos técnicos que se precisen	Pequeña caja estanca IP-67 donde va ubicado el transmisor y la batería (se adjunta fotografía)
Ubicación del sensor (arriba o abajo)	Recomendado lateral. Hay que evitar cambios en el flujo, velocidad del agua. Si hubiera burbujas de agua, existe interferencia en la medida.
Concentración máxima de Cloro total admitida (ppm)	No hay restricciones.
Sensor	Existen distintos tipos, pero recomendado el A001S3
Ubicación del sensor	Existen distintas configuraciones, se adjuntan alternativas a continuación.
Origen	Spin-off de la Universidad de Génova (Grupo de trabajo ALVIM)

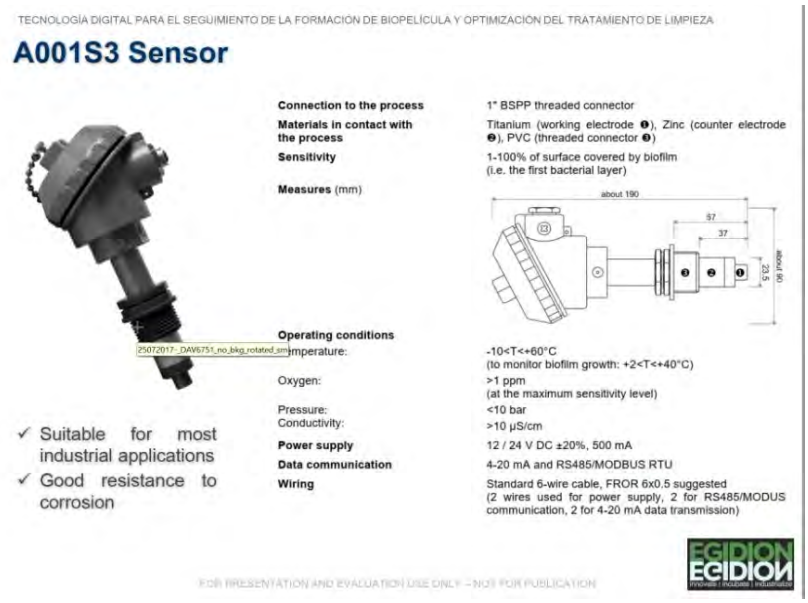


Imagen 1.1.1.4.1. Sensor de detección de biofilm A001S3



Imagen 1.1.1.4.2. Caja estanca IP-67 que alberga la batería y equipamiento para transmisión de datos.

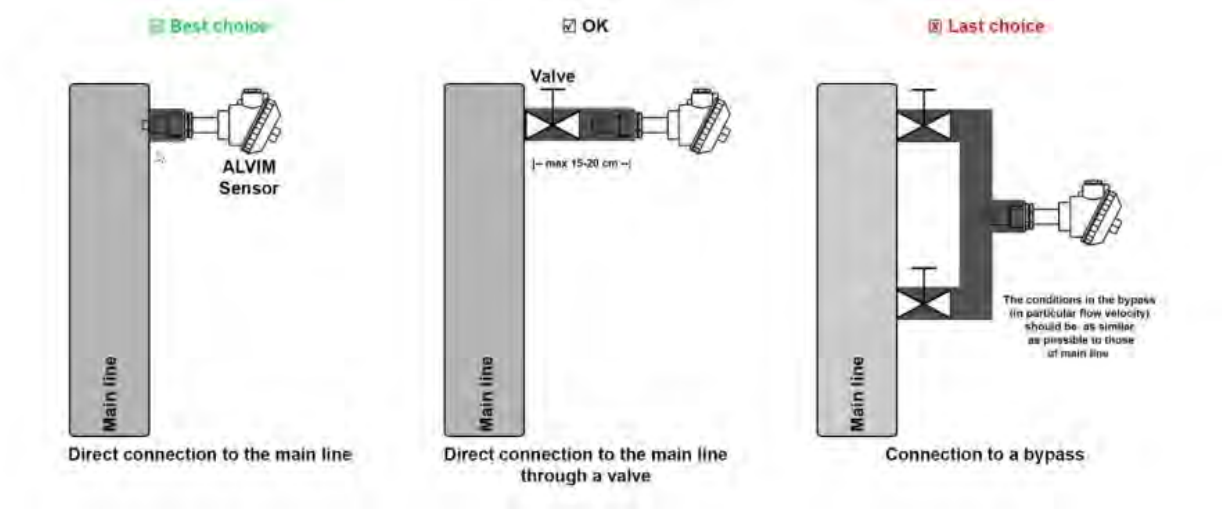


Imagen 1.1.1.4.3. Posible ubicación de sensor en conducciones.

1.1.1.4.1. CASO PRÁCTICO DE MONITORIZACIÓN DEL SENSOR ALVIM:

Se instaló el Sensor ALVIM en una arteria. En este caso, el crecimiento de biofilm ya se detectó después de algunos días (véase gráfico). Esto no es inusual ya que, como se mencionó anteriormente, la cloración del agua potable no siempre es suficiente para eliminar el biofilm. Es interesante observar cómo, a medida que crece el biofilm, disminuye la concentración de cloro, como indican los valores de ORP (detectados por una sonda adecuada). De hecho, el cloro es “consumido” por la materia orgánica (incluido el biofilm) presente en las tuberías. Cuanto mayor es la presencia de biofilm, menor será la concentración de cloro residual.



Gráfico 1.1.1.4.1.1. Resultados obtenidos en prueba real. (ORP: Potencial de oxidación-reducción del agua medido en mV).

Se ve así, la capacidad del sensor de detectar en fases tempranas el crecimiento bacteriano, así como resultar un instrumento eficaz para verificar y optimizar los tratamientos de desinfección aportando datos en línea y en tiempo real.

1.2. CAPTURA DEL DATO

1.2.1. CAPTURA ONLINE O MEDIANTE DATALOGGER EN ORIGEN

Para la monitorización en continuo de las redes se puede hacer uso de

- Data loggers que registran los diferentes valores, realizan sus cálculos y envían periódicamente, alertando de cualquier alarma que se produzca en la red.
- Data loggers capaces de gobernar un elemento por ejemplo una válvula para realizar la gestión dinámica de la presión.

El data logger es un **producto compacto**, que debe estar equipado con una pila de litio para ser autónomo en energía durante varios años. Con objeto de responder a los requisitos relacionados con el medio en el que se instala generalmente arquetas y en ambientes húmedos, los data loggers estarán específicamente desarrollados para responder a:

- los requisitos encontrados en las instalaciones: robustez, estanqueidad y autonomía en energía,
- las exigencias de los usuarios en términos de explotación: sencillez de puesta en aplicación y de utilización.

Las características principales que deben de tener son:

Estanqueidad: Las arquetas donde están ubicados se pueden inundar o incluso que persista una humedad permanente. Por tanto, el data logger deberá ser estanco en inmersión prolongada. El IP68 siempre se completará con características relacionadas con la inmersión como, por ejemplo 2 m de agua durante 100 días, o 4 m de agua durante 30 días.

Autonomía en energía: En el medio en el que se instalan, los data loggers están a veces muy alejados de la red eléctrica y aun encontrándose en un medio urbano, muchas veces no es viable llevar la energía hasta ellos. Así pues, una de las características fundamentales de los data loggers es su autonomía en energía. En consecuencia, la alimentación de los data loggers se deberá realizar mediante una pila de tecnología de Litio. Esta pila de altas prestaciones, dotada de una capacidad consecuente, deberá garantizar la alimentación durante varios años (5 años como mínimo con una transmisión diaria al puesto central). Así mismo en los casos en los que el consumo sea elevado, se deberá poder alimentar el data logger externamente con pack de baterías, panel solar…etc.

Acceso a la batería y a la tarjeta sim: Con objeto de facilitar el mantenimiento, el data logger deberá permitir que el usuario acceda a la batería y a la tarjeta SIM. Este acceso deberá poder realizarse fácilmente, sin herramientas complejas y garantizar una perfecta preservación de la estanqueidad del producto.

Adquisición de las informaciones físicas: Los data loggers estarán equipados con **entradas digitales** para la conexión de contadores impulsionales, señalizaciones tipo intrusismo, etc. y **entradas analógicas** para la conexión con sensores de presión, caudalímetros y/u otros sensores. Además, deberá ser posible la comunicación con los sensores de mercado (caudalímetros, calidad, etc.) vía **protocolo estándar como MODBUS**, lo cual permitirá también la adquisición de las informaciones de diagnóstico de estos sensores para poder hacer un mantenimiento en remoto.

Antena integrada y externa: Los data loggers se suelen instalar bajo tierra, en ubicaciones donde el nivel de recepción de las redes de comunicación es habitualmente bastante débil. A veces por la ubicación de la instalación es muy complicado instalar antenas externas, por ello existen dos opciones:

- Antena integrada dentro de la envolvente del equipo y solidaria a la electrónica especialmente diseñada para su uso en arqueta enterrada disponiendo de una gran sensibilidad para la recepción 2G y 4G M2M (LTE-M y NB-IoT), y a la que no le afecten los planos de masa de las arquetas de hormigón armado.
- Pero, a veces el nivel de recepción es tan débil porque el data logger se instala a mucha profundidad, que la única solución consiste en deportar la antena fuera de la arqueta. Para estos casos más difíciles, el data logger deberá disponer de conexión con antena externa.

Transmisión de informaciones: Los data loggers adquirirán y tratarán la información, después, la transmiten regularmente y, cuando ocurra un evento particular, emiten alarmas según consignas. Con objeto de responder a las diferentes necesidades de explotación, a los requisitos de recepción (arquetas enterradas) y a los costes de los soportes de comunicación, los data loggers se comunicarán para el traslado de **alarmas** en SMS (según activación por el operador de telecomunicaciones), 2G o en 4G M2M (LTE-M y NB-IoT).

Los data loggers también podrán comunicarse con el usuario mediante mensajes de texto. Esta función permitirá la consulta de las informaciones instantáneas y también el envío de parámetros como la puesta al índice de los contadores, etc. Por supuesto, la respuesta a una petición de consulta o la toma en cuenta de los parámetros dependerá de la activación del data logger.

Integración SCADAS: Los explotadores de agua utilizan diversos scadas y plataformas de centralización, por lo que es esencial que el data logger se pueda integrar fácilmente mediante protocolo estándar OPC UA.

2. TECNOLOGÍAS DE SENSORIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN

2.1. TECNOLOGÍAS BASADAS EN FIBRA ÓPTICA

2.1.1. DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS BASADAS EN FIBRA ÓPTICA

Las fibras ópticas se han utilizado ampliamente para comunicaciones y sensores remotos o distribuidos desde la década de 1970. Las ventajas de los sensores basados en fibras ópticas son numerosas. Sobre todo, los sensores de fibra óptica **no requieren energía eléctrica y combinan bajas pérdidas de transmisión óptica y un escaso deterioro de la señal, lo que les permite transmitir enormes volúmenes de información de forma rápida y a largas distancias**. La geometría del sensor lo hace compacto, flexible y ligero. Los sensores de fibra óptica son inmunes a perturbaciones eléctricas y magnéticas y pueden soportar entornos hostiles, como altas temperaturas y corrosión. Al mismo tiempo, son muy sensibles a perturbaciones físicas como el esfuerzo, la temperatura y la presión, entre otras. Finalmente, el uso de un sensor de fibra óptica elimina la necesidad de fibras adicionales ya que la misma fibra se puede utilizar para detectar y transmitir información. Esto es especialmente beneficioso cuando se utiliza detección distribuida, ya que una fibra puede actuar como múltiples sensores y sólo requiere un cable para conectarla a un sistema de adquisición de datos.

Los sensores de fibra óptica se han utilizado ampliamente en una variedad de aplicaciones de ingeniería civil relacionadas con la monitorización del estado estructural, incluidas algunas aplicaciones hidráulicas, principalmente en la industria del petróleo y gas. Son **capaces de detectar pequeñas fugas con una precisión de 1 o 2 metros dentro de los 10 segundos posteriores a que se produzca una fuga**. Los sensores de fibra óptica también son muy **duraderos**, soportando 30 años de servicio con un **mantenimiento mínimo**. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones anteriores se implementan en tuberías presurizadas. Esto revela un **vacío de investigación sobre el uso de sensores de fibra óptica en tuberías parcialmente llenas**, a pesar de la importante longitud de red de tuberías sin presión.

Fundamentos de la fibra óptica:

La propagación de la luz en una fibra óptica se basa en fenómenos ópticos. El principio de refacción establece que la luz se desvía de su trayectoria original cuando pasa oblicuamente entre dos medios con diferentes densidades (o índices de refracción). Un rayo de luz incide en el interfaz entre el aire y el vidrio cuando ingresa al núcleo de la fibra óptica, lo que provoca su refracción al ingresar. A medida que se propaga a través del núcleo, se refleja completamente en su pared, sin que la luz se refracte en un revestimiento, que tiene un índice de refracción más bajo. La diferencia entre los índices de refracción del núcleo y el revestimiento se denomina apertura numérica (NA) y determina la capacidad de aceptación de la luz de una fibra óptica. Un NA mayor permite que la fibra óptica acepte rayos de luz incidentes en ángulos de incidencia más altos.

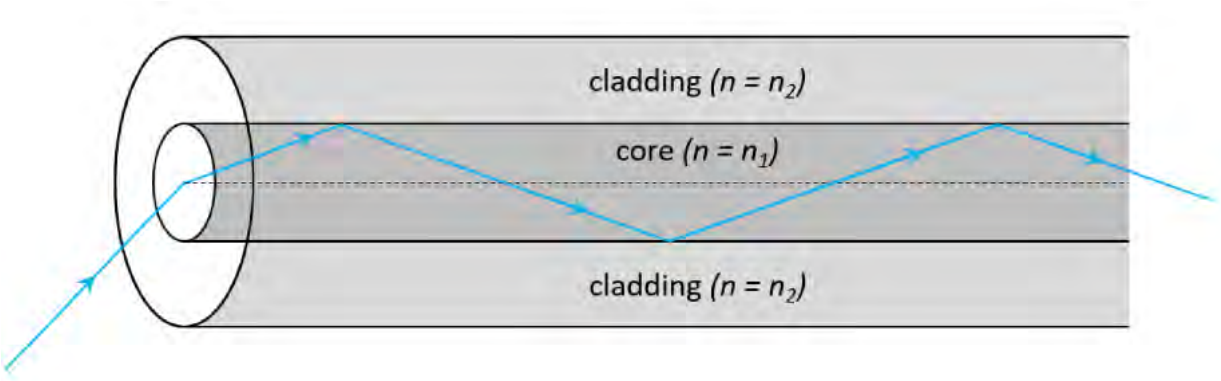


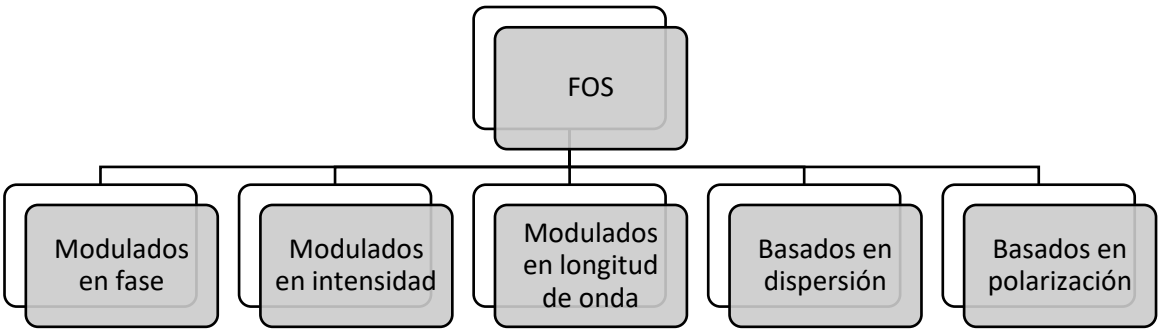
Ilustración 2.1.1.1. Geometría de una fibra óptica. Imagen de Uso de sensores de fibra óptica para tuberías. Prisutova, J.; Krynkin, A.; Tait, S.; Horoshenkov, K.

Los dos **tipos de fibras ópticas** son monomodo y multimodo, en función de la geometría de la fibra. En la monomodo, el diámetro del núcleo es mucho más pequeño que el de la fibra multimodo, lo que da como resultado una menor dispersión asociada a la propagación de la luz por trayectos múltiples. A su vez las fibras pueden ser de índice escalonado (monomodo o multimodo) o índice graduado (sólo multimodo). En las fibras de índice escalonado, el índice de refracción que es constante en todo el núcleo sufre un cambio escalonado en la interfaz a un valor diferente del índice de refracción en el revestimiento. En una fibra de índice graduado, el índice de refracción del núcleo disminuye gradualmente al aumentar la distancia desde el eje de la fibra. Las fibras de índice gradual se utilizan principalmente para permitir la transmisión de grandes cantidades de información y no son de gran utilidad en sensores de fibra óptica.

La cantidad de luz que se propaga en una fibra óptica depende de las pérdidas o atenuación de la fibra. La atenuación normalmente se mide en términos de pérdida en dB por unidad de longitud (dB/km). Existen numerosas causas para la atenuación y estas incluyen impurezas o imperfecciones dentro del núcleo de la fibra que pueden causar dispersión o absorción, micro o macroflexión y pérdida del extremo de fibra debido a defectos en el extremo. Sin embargo, algunas de estas pérdidas actúan como mecanismos subyacentes a la detección de fibra óptica.

Para que una fibra óptica se pueda usar como **sensor de fibra óptica (FOS)**, **tiene que cambiar sus propiedades ópticas en respuesta a perturbaciones externas**. Los FOS modernos pueden detectar una amplia variedad de perturbaciones como temperatura, tensión, presión, vibraciones acústicas, flujo y otras. **Un FOS opera mediante perturbaciones externas que afectan una o más de las características de un sistema óptico, por ejemplo, intensidad de luz, longitud de onda o fase**. El cambio en una perturbación de interés se correlaciona con el cambio en las características ópticas.

Hay varias formas de caracterizar los FOS, pero se pueden subdividir en cinco categorías:



La elección más común de **FOS en aplicaciones hidráulicas** son los **basados en dispersión (dispersión Rayleigh y dispersión Brillouin)** y los **modulados en longitud de onda (rejilla de fibra de Bragg o FBG**, por sus siglas en inglés). Esta preferencia podría deberse al hecho de que **estos métodos de detección pueden actuar como sistemas de sensores distribuidos**, lo que significa que, en lugar de medir una perturbación en un solo punto, estos FOS **pueden detectar y cuantificar perturbaciones en toda su longitud**.

Los **sensores modulados en longitud de onda** correlacionan el cambio en la longitud de onda de la luz con una cantidad física que resulta en una perturbación. El tipo más común de sensor es el de **rejilla de Bragg (FBG)**. Una FBG se produce sometiendo el núcleo de la fibra óptica a un patrón de interferencia óptica que da como resultado una variación periódica del índice de refracción a lo largo de la fibra. Esto lleva a que la rejilla sea resonante en una longitud de onda óptica específica. Si una longitud de onda no coincide con el periodo de la rejilla de Bragg, la señal luminosa se transmite a través de la rejilla sin verse afectada. Sin embargo, la señal luminosa emitida en una longitud de onda resonante (o longitud de onda de Bragg) se refleja. Si se aplica una perturbación externa (ej. Un camio de tensión o temperatura) al FBG, la luz reflejada en estará sujeta a un cambio en la longitud de onda que se correlaciona con la magnitud de la perturbación. Los perfiles de rejilla de fibra de Bragg pueden ser uniformes y no uniformes en términos del periodo de rejilla y el cambio del índice de refracción, lo que da como resultado propiedades de detección únicas. Una de las principales ventajas de los sensores FBG es su capacidad para actuar como sensores puntuales o de múltiples ubicaciones.

La **dispersión** puede ocurrir por diversas razones, como faltas de homogeneidad o impurezas en el núcleo de una fibra óptica o fotones que interactúan con vibraciones moleculares. Para aplicaciones hidráulicas los sensores basados en dispersión Rayleigh o Brillouin son los más populares. La **dispersión Rayleigh** se produce cuando la luz incidente encuentra imperfecciones aleatorias en el núcleo de la fibra, como variaciones de densidad, huecos o impurezas, lo que provoca cambios microscópicos en el índice de refracción. El tamaño de estas imperfecciones debe ser mucho menor (10% o menos) que la longitud de onda incidente. La dispersión de Rayleigh es un tipo de dispersión elástica, ya que los fotones retro dispersados no sufren transferencia de energía y conservan su longitud de onda original. La **dispersión espontánea de Brillouin** es causada por vibraciones moleculares inducidas térmicamente. Estos producen una onda acústica viajera en el núcleo de una fibra óptica que da como resultado variaciones del índice de refracción en el núcleo de la fibra con el que interactúan los fotones incidentes. Las variaciones del índice de refracción son periódicas, lo que hace que actúen como una rejilla de Bragg y reflejen la luz de una determinada longitud de onda. Debido a la propagación de la onda acústica se produce también un desplazamiento Doppler entre las ondas luminosas incidentes y dispersas. Se producen dos componentes de un haz de luz dispersa, un componente de Stokes con una longitud de onda más larga que la del haz de luz incidente

y un componente anti-Stokes con una longitud de onda más corta. **Los sensores basados en dispersión Brillouin y Rayleigh son sensibles tanto a perturbaciones de tensión como de temperatura.**

Geometría los sensores de la fibra óptica:

Existen multitud de enfoques cuando se trata de instalar un sensor de fibra óptica en una tubería. Sin embargo, tres configuraciones parecen ser las más comunes:

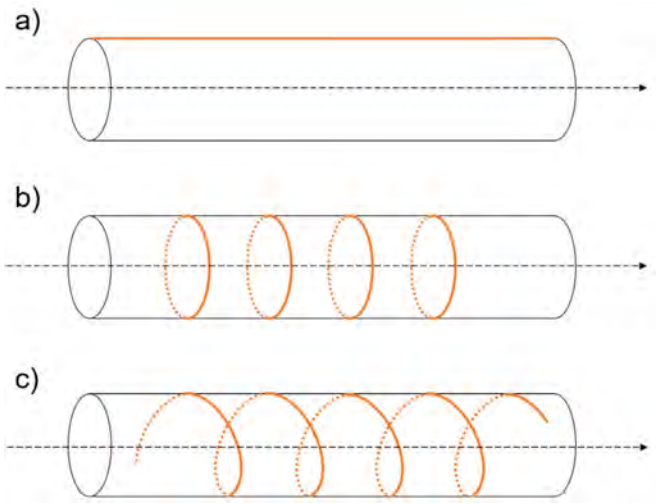


Ilustración 2.1.1.2. Geometría de una fibra óptica. Imagen de Uso de sensores de fibra óptica para tuberías. Prisutova, J.; Krynkin, A.; Tait, S.; Horoshenkov, K.

La a) es una configuración axial, cuando se instala una FOS en la superficie de una tubería a lo largo del eje principal de tubería. Esta configuración es la más común para aplicaciones de monitorización del estado de las tuberías. La configuración b) es la de tipo aro o bucle que se suele usar para controlar la presión interna de tuberías presurizadas y es herramienta común para la detección de fugas. Por último, la configuración c) es helicoidal que se diferencia de la b) en que los bucles no son cerrados.

2.1.2. APLICACIONES DE LA FIBRA ÓPTICA EN LA MONITORIZACIÓN DE ARTERIAS[1].

La instalación de fibra óptica es uno de los sistemas más novedosos para la monitorización de conducciones de agua potable. La tecnología fotónica permite tener un mayor control sobre lo que ocurre en el interior de las conducciones, presentando ventajas como ya se comentaban en apartados anteriores como:

- Gran sensibilidad y fiabilidad
- Pasividad eléctrica, evitando problemas catódicos.

[1] El grueso de este apartado proviene del paper elaborado por Optasense (INDUSTRIAL VALIDATION AND VERIFICATION APPROACH FOR EXTERNAL FIBER OPTIC BASED LEAK DETECTION. Chris Minto1, Alastair Godfrey, Paul Clarkson, Alasdair Murray, Dominic Graham. OptaSense Ltd. Se ha considerado muy relevante incluirlo en este apartado, para dar visibilidad a la complejidad que supone la validación de los usos propuestos para la monitorización de eventos en tuberías y cómo resulta fundamental escalar la validación a entornos reales.

- Elevada sensibilidad y fiabilidad.
- Inmunidad frente a interferencias magnéticas y corrosión.
- Vida útil en torno a 30 años y de bajo mantenimiento.
- La propia fibra óptica es el sensor, evitando gran cantidad de dispositivos para analizar grandes superficies.
- Pequeñas dimensiones que facilitan su instalación en entornos de difícil acceso.
- Bajo consumo energético.
- Transmisión de información a largas distancias y gran velocidad.

Una fuga en una tubería puede ser un incidente ambiental y económico importante. En caso de que ocurra una fuga, la capacidad de detectarla y reaccionar lo más rápido posible es de gran importancia. La detección distribuida por fibra óptica (DFOS) es una tecnología que permite la monitorización continua de activos de gran tamaño, como tuberías, mediante el envío de pulsos de luz láser a lo largo de cables de fibra óptica ubicados junto al activo. Una unidad interrogadora envía un pulso de luz láser. La luz pasa a través de una fibra y detecta cambios en la pequeña fracción de luz que se dispersa a lo largo de la fibra. Actualmente, muchos sistemas DFOS se instalan principalmente para la detección de intrusiones de terceros. Sin embargo, los sistemas DFOS tienen muchas más aplicaciones y tienen el potencial de proporcionar un cambio radical en el rendimiento de los sistemas de detección de fugas.

Los sensores de fibra óptica que funcionan en paralelo a las tuberías tienen ventajas sobre los métodos de detección de fugas convencionales debido principalmente a la proximidad de un elemento sensor externo a la ubicación de la fuga, lo que genera una expectativa de detectar fugas más pequeñas más rápido y con mayor precisión sobre su ubicación. Sin embargo, existen aún desafíos tanto en la validación de los fundamentos del rendimiento de la detección de fugas de fibra óptica como en la verificación del estado operativo de un sistema una vez instalado.

Para identificar eventos mediante la instalación de sistemas DFOS en la proximidad de una tubería, existen los siguientes modos de detección:

- Ruido de orificio (OFN): el ruido acústico que se produce cuando un producto contenido se filtra a través de un orificio e interactúa con el medio de enterramiento local o la pared de la tubería; se experimenta como vibración y ruido. Las ondas sonoras son captadas por la fibra inmediatamente después de su generación.
- Pulso de presión negativa/onda de presión: la señal NPP se produce cuando un fluido restringido a alta presión y alta densidad se libera repentinamente a una densidad/presión más baja en escalas de tiempo muy breves. El pulso de presión es captado por la fibra colocada fuera de la tubería a grandes distancias de la fuga, moviéndose a la velocidad del sonido en el fluido.
- Cambios de tensión locales: el fluido que se filtra de la tubería altera el suelo localmente por una combinación de inflación y erosión. Esto da como resultado una tensión local del cable de fibra óptica, aunque en una cantidad muy pequeña. Se puede configurar un sistema DFOS para que sea sensible a las señales de baja frecuencia resultantes.
- Cambio de temperatura: el fluido (líquido o gas) afectará el medio ambiente y producirá cambios sutiles en la temperatura local. Cuando estos se propagan a la fibra óptica (lo que puede llevar algún tiempo), estos cambios pueden detectarse como contenido espectral de frecuencia muy baja, generalmente denominado detección de gradiente de temperatura distribuida (DTGS). Las versiones anteriores de DFOS explotaban un cambio de temperatura absoluto (DTS: detección de temperatura distribuida) y se implementaron con éxito en tuberías de LN2 sobre el suelo con una gran caída de temperatura esperada. Dichos sistemas se utilizan menos en tuberías enterradas,

ya que la caída de temperatura que se puede medir prácticamente en una fibra desplazada equivale a fugas muy grandes.

De los modos disponibles, NPP[2] es el más sensible (en un contexto de probabilidad de detección / tasa de alarmas molestas alcanzables) y, por lo tanto, las técnicas están segmentadas en su enfoque. NPP por sí solo es suficiente para declarar la existencia de un evento de fuga repentina hasta 15 l/min y se utiliza una combinación de modos para cualquier tipo de fuga hasta 150 l/min. Esto representa aproximadamente una reducción de un orden de magnitud en el tiempo de detección de fugas inferiores a 200 l/min en comparación con los sistemas existentes, mientras que la NPP ofrece el potencial de detectar fugas muy pequeñas casi instantáneamente.

LA DIFICULTAD DE LA VALIDACIÓN Y LA VERIFICACIÓN:

Los sistemas tradicionales de balance de masas detectan fugas buscando el fluido faltante. Para detectar este fluido faltante, se mide el caudal másico en varios puntos a lo largo de la tubería. El método es de naturaleza estadística e implica un promedio a lo largo del tiempo y, por lo general, produce una sensibilidad máxima del 1 % del caudal, que se desarrolla a lo largo de decenas de minutos de monitoreo. La industria desea medidas de detección más rápidas y sensibles. La complejidad se suma a la variación de la presión, la temperatura y las velocidades de caudal a lo largo de la tubería. Esto significa que, para obtener una sensibilidad de fuga suficiente y una precisión posicional, se debe comparar un modelo de caudal complejo con la salida de los sensores. El rendimiento de los sensores individuales se puede probar fácilmente y se puede observar la validez de los modelos modificando o quitando sensores del conjunto. Normalmente, se adoptan diversos métodos para la verificación, desde pruebas de parámetros funcionales simples hasta modelos de simulación de fugas más complejos y, en última instancia (pero rara vez), para una confianza total, pruebas de extracción de fluido, que son complicadas y requieren mucho tiempo.

DFOS tiene algunas complejidades de validación y verificación que son diferentes a las de los sistemas de balance de masas. DFOS no requiere calibración de sensores individuales después de la instalación, sin embargo, la señal observada por los sensores depende de las condiciones locales. Esta señal depende principalmente de dos factores:

1) La firma de la fuga (dependiendo del tipo de fluido, presión, temperatura, tamaño del orificio, etc.).

2) Acoplamiento de la firma de la fuga al cable (separación de la fibra y la fuga, condiciones del suelo, metodología de instalación de la fibra, etc.)

Estas características únicas de la señal llevan al investigador a través de una serie de mediciones a escala de laboratorio y despliegues simples para aislar los componentes individuales y comprender la física. En última instancia, las limitaciones en cada enfoque llevan a la conclusión de que la única forma de validar verdaderamente la tecnología es tomar una tubería fluida a escala real, hacer agujeros en ella y observar qué sucede.

Durante muchos años, OptaSense ha realizado y ayudado a desarrollar muchas de estas pruebas básicas de validación de detección de fugas, pero finalmente se dio cuenta de que, si querían hacer avanzar la industria, necesitaban realizar pruebas de validación a escala real[3].

[2] Pulso de presión negativa/onda de presión

[3] En 2019, OPTASENSE realizó los ensayos más realistas hasta la fecha en el circuito de flujo de CTDUT en Brasil y en 2018 en tuberías sobre el suelo en el sitio SINTEF en Noruega. Los detalles de estos ensayos se pueden encontrar en los artículos citados en el PAPER INDUSTRIAL

En la actualidad, existen esencialmente dos enfoques para la verificación de sistemas de detección de fugas DFOS instalados en un sistema cliente, que se describen en esta sección:

Replicación de una señal de fuga en la fibra: estimular físicamente una región localizada de fibra por medio de un tensor de fibra accionado electrónicamente e inducir en la fibra la misma señal que se observa en un evento de fuga real (rastreable hasta la prueba de validación). Este sistema se conoce como Unidad de Simulación de Fugas (LSU, por sus siglas en inglés

Replicación física de una fuga: No es deseable inducir fugas en un sistema cliente para verificar el rendimiento de la detección de fugas. Sin embargo, después de haber realizado el ejercicio de validación, aún podemos intentar generar las características físicas de un evento de fuga cerca de la tubería y verificar que el sistema emita alertas.

En términos de los cuatro modos de fuga, la generación de una señal de NPP es difícil sin acceso directo al fluido dentro de la tubería. Esto se debe simplemente a que el pulso de presión en sí viaja a través del fluido. Para este modo de detección, debe ocurrir una replicación física y la instalación utilizada debe representar al menos 500 m de tubería para permitir la propagación adecuada de la señal. Se requiere equipo para crear una "ruptura" artificial muy corta y pequeña en la tubería, que causa la caída repentina de presión que hace que una onda de presión negativa viaje tanto aguas arriba como aguas abajo.

Con respecto a la generación de NPP hubo dos hallazgos claros:

1) Se determinó que el uso de válvulas en lugar de un disco de ruptura era inaceptable para la replicación de una caída repentina de presión y la generación de una NPP significativa debido al tiempo de apertura prolongado.

2) La presión en la tubería cuando se probó con gas fue insuficiente para generar una NPP. Esto se debe, al menos en parte, a que la velocidad de escape del gas está limitada por la condición sónica y, como tal, la velocidad a la que cae la presión es considerablemente más lenta que para un líquido.

Los tres modos restantes (OFN, Strain y DTGS) son más simples de replicar con configuraciones confinadas debido a la localización de los efectos. Los efectos de cada modo son externos a la tubería y el desempeño de una liberación de producto representativa, en términos de presión y caudal, es un método adecuado para simular eventos de fugas de gas y líquido. La OFN y la deformación son considerablemente más fáciles de replicar que el DTGS, ya que los efectos se pueden observar en un corto período de tiempo. El DTGS se basa en la permeación de fluido, a una temperatura diferente a la del entorno, que llega a la fibra. Esto puede tardar mucho más tiempo en tener un efecto detectable y depende de que el sistema haya estado en un estado de equilibrio durante un período de tiempo significativo antes de la prueba. Las dificultades aquí incluyen sostener una inyección de fluido presurizado durante un período de tiempo prolongado y hacer frente a la erosión del suelo.

No se requieren pruebas a gran escala para verificar la detección de estos tres modos.

SISTEMAS CUANTITATIVOS

Hasta ahora, la mayoría de las detecciones de fugas DFOS se han realizado utilizando sistemas cualitativos. Esto se debe principalmente a la capacidad de largo alcance de este diseño y la diferencia de costos entre los sistemas. Sin

VALIDATION AND VERIFICATION APPROACH FOR EXTERNAL FIBER OPTIC BASED LEAK DETECTION. Chris Minto1, Alastair Godfrey, Paul Clarkson, Alasdair Murray, Dominic Graham. OptaSense Ltd.

embargo, existen ciertas ventajas que se pueden obtener al utilizar DFOS cuantitativo. OptaSense ha recopilado datos de todos los experimentos clave en formatos tanto cualitativos como cuantitativos y está en condiciones de comprender estos beneficios en detalle. Aquí detallamos brevemente los beneficios que puede brindar un sistema cuantitativo a los diferentes modos de detección.

Temperatura y tensión: los sistemas cuantitativos que utilizan una sola fibra actualmente no pueden separar la temperatura y la tensión directamente, pero el rango dinámico aumenta enormemente la de los sistemas cualitativos. También se puede determinar la dirección del cambio de temperatura o deformación, lo que puede ser útil para la detección. Por ejemplo, si el fluido que se filtra está caliente, esperaríamos que la fase de la señal DFOS aumente en una escala de tiempo de minutos, lo que nos ayudará a distinguir, por ejemplo, de una lluvia fría.

NPP: conocemos la forma esperada de la señal de NPP y, en un sistema cuantitativo, debería tener la misma forma en todos los canales. Esto debería facilitar la discriminación entre una NPP y un impacto en la tubería, que generará una señal que viaja a la velocidad correcta, pero con una forma diferente. Además, la coherencia de fase de la medición significa que la velocidad de viaje de la onda se puede determinar con mayor precisión.

OFN: los sistemas cuantitativos generarán menos distorsión de la señal acústica que los sistemas cualitativos. Como tal, OFN generará señales con más características tonales en lugar de aparecer con un amplio contenido espectral. Los tonos generados dependerán de la presión en la tubería y de la forma del orificio, lo que significa que debería ser posible estimar el tamaño de la fuga en función de los tonos generados.

En última instancia, los DFOS cuantitativos pueden proporcionar los medios para mejorar los sistemas de detección de fugas existentes, aunque los sistemas DFOS cualitativos aún tienen ventajas, en particular en términos de costo y alcance. Sin duda, si bien los DFOS cualitativos siguen siendo comunes, será necesario realizar una verificación de la detección de fugas en estos sistemas. Será necesario utilizar datos cuantitativos adquiridos a partir de pruebas de fugas representativas para sintetizar datos de fugas típicos.

Además, los sistemas DFOS cuantitativos tienen el potencial de proporcionar un monitoreo de condiciones que un sistema cualitativo no puede. Por ejemplo, la capacidad de medir la tensión absoluta en una fibra se puede implementar para monitorear la tensión en una tubería. Esto tiene el potencial de detectar problemas potenciales antes de que ocurra un incidente costoso.

Conclusiones:

• Los requisitos de validación para DFOS difieren considerablemente de los necesarios para el monitoreo computacional de tuberías (CPM). El único método a prueba de fallos implica la creación de fugas a gran escala en un sitio de prueba representativo que involucra una tubería a gran escala.

• Un sistema de detección de sistemas cuantitativos es esencial para comprender los mecanismos de señal en uso.

• Los enfoques de verificación difieren de manera similar y, al igual que CPM, hay una variedad de métodos de verificación disponibles para DFOS que cubren los requisitos de flexibilidad del cliente.

• La detección y verificación se pueden mejorar mediante el uso de sistemas DFOS cuantitativos.

• Se están realizando más desarrollos para la verificación, especialmente en la generación de datos sintéticos de fugas que está diseñado a medida para la instalación de tubería en examen.

2.1.3. INSTALACIÓN DE FIBRA ÓPTICA PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE FUGAS.

Además de las técnicas para la monitorización y detección temprana de fugas mediante sensores acústicos, existen en el mercado alternativas mediante el uso de fibra óptica, lo que puede paliar el condicionante existente actualmente con la tecnología mediante correlación, que requieren que la distancia máxima entre elementos donde se instalen sea inferior a 200 metros.

Con el sistema de detección de fugas (**DAS**[4]) se aprovecha la inserción de fibra óptica en el interior de la tubería, aprovechando que las ondas acústicas y elásticas producidas por la interferencia de terceros se propagan a lo largo del conducto y se registran en las estaciones de vigilancia. El procesamiento de señales recogidas permite la detección, localización y clasificación de la fuga o evento producido.

El sistema de **instalación de la fibra** consiste en la introducción de un carro robotizado u otro sistema similar por el interior de la tubería que consigue el arrastre de una guía pasacables a través de la misma. Se deberá considerar la pendiente por tramos de la canalización existente para un recorrido del equipo de manera efectiva, evitando pendientes ascendentes elevadas. En tuberías ya instaladas, la introducción de este equipo se realiza prioritariamente a través de las bocas de las ventosas existentes. Para ello previamente se tendrá que realizar el desmontaje y posterior montaje de dicho elemento hidráulico. Posteriormente, se realiza el tendido del cable de fibra óptica por el interior de la tubería con ayuda de un cabestrante horizontal de acero donde se dispone la bobina de cable de fibra para su arrastre. Se deberá tener en cuenta aquellas arquetas que dispongan de zona de paso de una válvula, caudalímetro o elemento hidráulico que pueda obstaculizar en el interior de la tubería para que ejerza su cometido debidamente. En estos casos, se realiza un puente de fibra que salve dicho nudo. La conexión de ambos extremos del puente de fibra se realiza mediante un sistema de unión por fusión con arco eléctrico, de cada uno de los filamentos que conforman el cable de fibra, además se deberá instalar un manguito para proteger empalme. Todas las conexiones o empalmes quedan ubicados en el interior de las arquetas existentes.

Se deberá disponer de un equipo de medición interrogador que emite los pulsos en la fibra óptica, para monitorizar las fugas en la conducción durante el periodo de observación y análisis. Además, este análisis se apoyará de un software de monitorización e interpretación de los resultados. Una vez instalada y fusionada totalmente la fibra óptica, se realiza un control de calidad de la instalación por medio de las medidas de reflectometría para la longitud de onda específica de trabajo de cada fibra. Estas medidas permiten evaluar la continuidad de la fibra, detectar defectos de atenuación o roturas de la fibra y comprobar que los empalmes y conectores están debidamente ejecutados.

[4] Distributed acoustic sensing

A continuación, se indican las características de las conducciones en las que resulta de aplicación:

CARACTERÍSTICAS DE LAS TUBERÍAS	
DN tubería requerido	-
Material tubería requerido	Efectivo en cualquier material
Estado de la red durante su instalación	Posibilidad de tubería en carga. Se utilizan herramientas que perforen la tubería manteniendo su estanqueidad
Longitud de red afectiva	Sin limitaciones
Caudal de uso en la red	Hasta 1,8 m/s
Otras consideraciones	Pendiente de los tramos de la canalización

2.1.4. TECNOLOGÍA SOUNDPRINT AFO PARA LA MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL DE ARTERIAS DE HORMIGÓN PRESTENSADO CON CAMISA DE CHAPA.

La tecnología AFO (cable de fibra óptica) es una tecnología de monitorización que registra los eventos acústicos ligados a roturas de espiras pretensadas en tuberías de hormigón pretensado. Se implantación posibilita la monitorización estructural de estas arterias y la generación de gemelos digitales que permiten la gestión de la línea en cuanto a labores de mantenimiento y reparación.

Los **tubos de hormigón pretensado con camisa de chapa (PCCP)**[5] se han utilizado y utilizan habitualmente en conducciones de agua de gran diámetro. Las principales características que han avalado su implementación son su elevada resistencia a los daños físicos y a la corrosión, su facilidad de instalación y el hecho de resultar un material económicamente interesante para infraestructuras donde suelen ser requeridas prestaciones para altas presiones de trabajo y cargas externas elevadas.

Cabe destacar que, pese a los escenarios de elevadas solicitaciones estructurales, internas y externas, y pese al prolongado historial de uso con el que cuentan estas tuberías, la experiencia extraída de sus inspecciones muestra que entorno al 97% de los PCCP existentes en la actualidad no presentan roturas en las espiras de cable pretensado, que como veremos resulta ser el elemento estructural principal. Las tuberías de PCCP presentan ratios de fugas muy reducidos, menos de 0,2 fugas/km, uno de los índices de fugas más bajos en comparación con otros materiales de tuberías. Por todo ello, puede concluirse, que pese a la elevada exigencia a la que suelen someterse este tipo de tubos, en la mayoría de los casos, han demostrado tener un índice de averías muy bajo. A pesar de su fiabilidad, el PCCP ha resultado ser un material problemático para algunas empresas gestoras de agua. En ocasiones, el PCCP puede fallar sin previo aviso. Su uso en grandes arterias provoca que los fallos de estas tuberías generen la liberación de una gran cantidad de energía y agua que pueden dañar las viviendas, empresas e infraestructuras cercanas. Los fallos de los tubos de PCCP suelen deberse a diseños o instalaciones deficientes o a un funcionamiento inadecuado. **El factor principal y determinante de la prestación mecánica, tanto frente a cargas**

[5] Los tubos de hormigón pretensado con camisa de chapa tienen por configuración básica la presencia de un núcleo de hormigón que contiene una camisa cilíndrica de chapa, cuya principal función es la de conferir estanqueidad al sistema y un alambre de acero de alta resistencia que se enrolla helicoidalmente alrededor del núcleo, postensado a una tensión previamente fijada, que se designa tensión de zunchado, además de un revestimiento exterior de hormigón, cuya misión principal es la protección del alambre. Al núcleo zunchado, sin el revestimiento exterior, se denomina primario. En función de si la camisa de acero se encuentra en el interior del primario, es decir, revestida de hormigón del núcleo por ambos lados, o en la parte exterior, se denominan tubos de camisa embebida o de camisa revestida, respectivamente.

internas como externas, de las tuberías PCCP, independientemente de su tipología, es el conjunto de espiras de acero pretensados.

Las espiras de acero de pretensado son, por tanto, el principal componente estructural del PCCP. Estas producen una compresión uniforme que compensa las tensiones de tracción en el tubo. Los **principales procesos de degradación** que afectan a las espiras de acero pretensado son la corrosión y la fragilización por hidrógeno:

- **Corrosión**, suele producirse cuando se daña el revestimiento protector de mortero de la tubería. Un diseño e instalación inadecuados, así como los ambientes agresivos, pueden ser el origen de este efecto. Otros posibles factores son derivados de un incorrecto dimensionamiento frente a las condiciones reales de trabajo, por ejemplo, la presencia de transitorios puede dañar las paredes de hormigón de forma prematura, si estas no han sido correctamente diseñadas. El agrietamiento del mortero abre la posibilidad a la afección de las estructuras de acero por agentes externos, tales como sulfuros, que generan y aceleran el proceso de corrosión.
- **Fragilización por hidrógeno**, puede provocar la rotura de las espiras de alambre de pretensado debido a la reducción de la resistencia a la tracción. La fragilización por hidrógeno es el resultado de prácticas de fabricación inadecuadas y diversas fuentes de patologías del metal.

Las diversas tecnologías de inspección y evaluación estructural para estas tuberías están orientadas a la determinación de la degradación de las espiras de alambre pretensado, siendo su principal objetivo la detección, localización y cuantificación de espiras pretensadas rotas. De entre las tecnologías existentes para tal fin destacan:

- Inspecciones visuales y sonoras, que permiten verificar zonas de pérdida de compresión del núcleo de hormigón y degradación de los revestimientos.
- Inspecciones electromagnéticas, que identifican y cuantifican espiras rotas.
- Inspecciones sónicas y ultrasónicas, que identifican zonas de daño mediante la identificación de zonas de hormigón degradadas por análisis de onda acústica.
- Detección acústica mediante fibra, que permite localizar y cuantificar espiras rotas.

De entre las mencionadas tecnologías, es la detección acústica mediante uso de fibra, la única capaz de producir una monitorización en continuo, y es por ello que se desarrolla a continuación en este apartado.

Introducción y descripción general de SoundPrint AFO:

El proceso habitual indica que la mayoría de los fallos estructurales en los tubos de hormigón pretensado con camisa de chapa (PCCP) comienzan con la **degradación del revestimiento exterior de mortero, agrietamiento, que provoca la aparición de corrosión, normalmente por despasivación del acero, o la fragilización por hidrógeno de las espiras de alambre pretensado**. Esta rotura provoca un **daño progresivo en la rotura del alambre** que continúa creciendo hasta que la tubería finalmente falla, normalmente de forma catastrófica.

El sistema de monitorización SoundPrint® AFO detecta y localiza estas roturas de cables. Si bien se trata de una tecnología innovadora, cuenta con una experiencia de implementación de más de 15 años. Con este avanzado sistema de alerta y un equipo de asistencia especializado, las empresas de servicios públicos pueden determinar el estado de las tuberías críticas y tomar medidas preventivas para evitar averías a gran escala.

El sistema de monitorización **acústica SoundPrint® AFO consiste en un sistema de adquisición de datos (DAQ) conectado a fibras ópticas monomodo que se agrupan en un "cable AFO" reforzado. Se utilizan láseres para**

proyectar luz por las fibras y el sistema DAQ supervisa las reflexiones generadas por la actividad acústica en una tubería.

El cable SoundPrint® AFO, acústicamente sensible, actúa como sensor en toda su longitud de despliegue. El principio de funcionamiento se basa en la identificación de las zonas donde se ha producido un evento acústico generado por la rotura de espiras del cable pretensado. Este evento genera una vibración en el cable SoundPrint® AFO, que puede ser captada y localizada. Gracias a la característica firma de ruido de alta frecuencia generada por una rotura de espira pretensada y a la proximidad del sensor, el sistema SoundPrint® AFO detecta de forma fiable las roturas de cable a medida que se producen, prácticamente en tiempo real. Se pueden supervisar hasta 20 km de tuberías desde una única ubicación DAQ y 40 km desde una ubicación DAQ doble.

Los eventos de rotura de cables se localizan a lo largo del cable de fibra óptica provocando un análisis de señales y datos que permiten la determinación de la ubicación del evento en la tubería. Tras la clasificación, el operador de la tubería recibe una alerta por correo electrónico del incidente y los detalles quedan disponibles en un sitio web con una base en sistema de información geográfica (GIS). Este conocimiento preciso y rápido del deterioro de las tuberías individuales dentro de una arteria o canalización permite a los operadores optimizar su presupuesto de capital y maximizar la vida útil de sus activos. La recopilación de datos casi en tiempo real permite a los propietarios de las tuberías gestionar de forma proactiva sus activos con mayor confianza, reduciendo el riesgo de averías peligrosas y costosas y los gastos operativos imprevistos.

Componentes del sistema:

Los sistemas AFO pueden dividirse en cuatro categorías principales:

- el DAQ (sistema de adquisición de datos)
- el cable de fibra óptica
- los elementos de entrada y salida de la tubería (en los que se incluye la protección del cable instalada en el interior de la tubería).

Los sistemas están diseñados para una **vida útil superior a 20 años en condiciones normales de funcionamiento, con un caudal máximo de 3 m/s y una presión máxima de 17 bares**. Si bien se puede adoptar soluciones especiales y específicas en caso de mayores requerimientos.

Sistema de adquisición de datos: Se pueden monitorizar hasta 20 km de tubería desde una única ubicación de DAQ hasta 40 km desde un DAQ doble. Pure Technologies proporcionará y mantendrá la comunicación con el emplazamiento.

Hay dos configuraciones disponibles:

1. DAQ estándar:
   El DAQ estándar debe colocarse en un espacio seguro y seco, sin ruidos fuertes de fondo. Se requieren dos circuitos eléctricos independientes de 15 amperios y 120 voltios para el DAQ y la unidad de CA independiente. Los DAQ estándar están pensados para su colocación en el interior de cámaras acorazadas, estaciones de bombeo u otras estructuras existentes
2. DAQ autónomos:
   El DAQ autónomo puede colocarse en el exterior sobre una plataforma de hormigón. Se alimenta mediante un circuito de 60 amperios y 120 voltios. La caja está certificada NEMA clase 250 Tipo 4.





Imagen 2.1.4.1. A la izquierda, equipo DAQ estándar y a la derecha equipo DAQ autónomo.

Cable de fibra óptica:

El cable de fibra óptica instalado en el interior de la tubería es un cable personalizado fabricado específicamente para su uso en el interior de líneas de agua potable, con una cubierta certificada NSF61. El cable estándar contiene cuatro (4) fibras monomodo -una fibra acústica, una fibra de localización y dos de repuesto- con un diámetro exterior de 0,41 pulgadas (10,3 mm). Hay disponibles cables más grandes con seis, ocho y diez fibras para aplicaciones no estándar.

Cabe destacar que, la disposición de cables con mayor número de fibras puede ser utilizada por las entidades explotadoras para otros fines, como comunicaciones.



Imagen 2.1.4.2. Detalle de fibra óptica instalado en el interior de conducción.

Elementos de entrada y salida:

El cable entra y sale de la tubería a través de una conexión en carga, conectada a la tubería a través de una conexión suministrada por el cliente, normalmente con una válvula de aislamiento. Preferiblemente, se utilizarán válvulas de seccionamiento de paso completo de diámetro mínimo 75 mm con conexiones embridadas o NPT, aunque las conexiones de 50 mm y más pequeñas pueden ser aceptables para instalaciones con tubería desaguada. La entrada en la tubería está protegida por un tubo flexible de acero inoxidable que se mantiene en su lugar, anclado en la conexión presurizada y que pasa a través de la conexión de los distintos elementos hasta alojarse en el interior de la tubería.

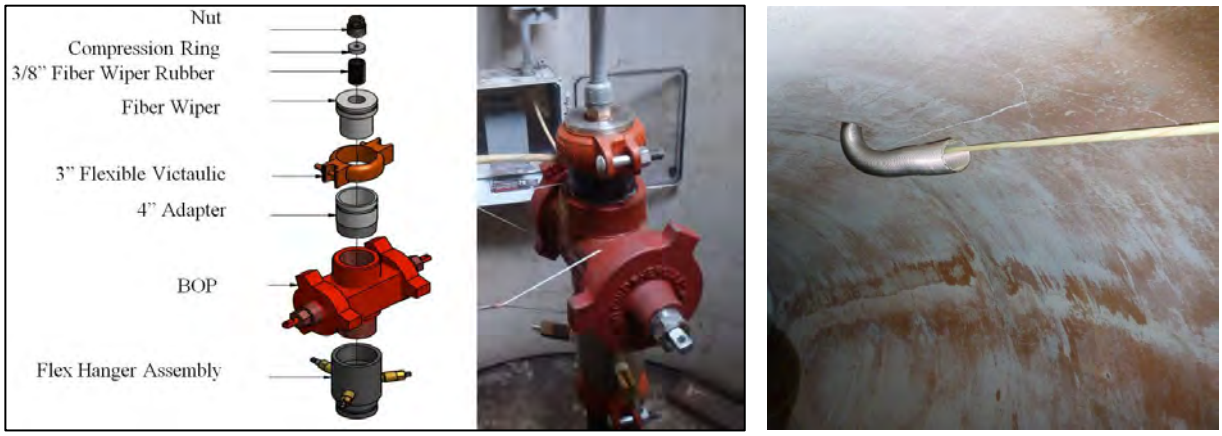


Imagen 2.1.4.3. A la izquierda esquema de conexión presurizada AFO y a la derecha, protección del cable en el interior de la canalización.

a) Instalación:

La instalación de la tecnología SoundPrint AFO sobre una canalización existente requiere de un proceso de estudio y planificación detallado y exhaustivo. Destaca la necesidad de identificar las características de los puntos críticos que presenta la tubería para proporcionar continuidad al cable AFO. Concretamente se realizará un detalle, si no existe, de los nudos, válvulas de líneas, by-pass y cualquier otro elemento que pueda generar una discontinuidad en le línea AFO. Este proceso será especialmente crítico en el caso de las instalaciones de cable AFO presurizadas, con mantenimiento de servicio. Por su parte, en las instalaciones de cable AFO en condiciones despresurizadas podrán y deberán planificarse detalladamente la instalación de elementos de fijación en codos, derivaciones y reducciones.

El cable AFO puede ser instalado en una tubería completamente desaguada o en una tubería operativa y en servicio.

Metodología de instalación en condiciones desaguadas:

El cable AFO se instalará una vez que la tubería haya sido retirada del servicio y completamente desaguada, siendo tendido de forma manual en la tubería en una serie de tramos individuales. Los límites de estos tramos vienen determinados por la ubicación de las válvulas en la tubería y por criterios de distancia máxima. Estos puntos, iniciales y finales en los tramos de cable, se denominan puntos de empalme. En estos puntos el cable AFO, es extraído y empalmado en la superficie, volviendo a ser introducido tras el empalme y sobrepaso del elemento disruptor (válvula, etc.). El cable AFO queda empalmado en una caja de conexiones registrable.

En el interior de la tubería se monta un carro específicamente diseñado para el diámetro del tubo sobre el que instalar la tecnología AFO, las particularidades del trazado y las condiciones de cable. El cable queda enrollado en el carro y éste es empujado a través de la tubería para su tendido por un grupo de operarios especializados. En su puesta y posterior servicio, el cable no queda anclado a la tubería, excepto en los casos en que la geometría de la tubería requiera un anclaje interno para proteger el cable. Entre estos puntos en los que se puede requerir anclajes y fijaciones del cable destacan:

- grandes derivaciones
- grandes desagües

- codos o desalineaciones de más de 45 grados
- tes

Para salir de la tubería en los puntos de empalme, el cable debe atravesar desde la parte interna en la coronación del tubo hasta la salida, mediante apertura roscada, expresamente realizada para este fin. En cada una de estas salidas, debe procurarse al cable de una protección especial, dado el elevado riesgo de deterioro por fricción en estos puntos. Tradicionalmente, se utilizará un tubo flexible de acero inoxidable que protege esta transición. El cable quedará anclado y sellado contra posibles afecciones provocadas por la presión mediante una válvula de manga o pinza que previene reventones.
Las cajas de empalme se montan en la pared de la cámara y conectan el cable AFO de dos tramos adyacentes. Las cajas de empalme tienen dos compartimentos:

- un compartimento interior para proteger los empalmes y las fibras peladas.
- un compartimento exterior para proteger y almacenar el cable AFO adicional necesario para permitir que los empalmes se completen fuera de la cámara.

Metodología de instalación en condiciones presurizadas:
Las principales ventajas del método de instalación en condiciones presurizadas, con una tubería en pleno funcionamiento, son:

- La realización de la instalación se hace sin interrumpir el servicio
- La realización de la instalación no requiere del acceso de personal a la tubería.

Sin embargo, este método no puede utilizarse en condiciones de caudal extremadamente alto o bajo, en tuberías con numerosas curvas o cuando las cámaras no son adecuadas o no pueden modificarse posibilitar las labores de inserción y extracción del cable AFO.
En este tipo de instalaciones se requieren consideraciones adicionales de espacio libre para el montaje de columnas de trabajo en carga para el alojamiento de los equipos de instalación del cable AFO. Normalmente, esta altura libre requiere de, al menos, 3 m por encima del punto de conexión.

En el caso en que esta altura no esté disponible, se realiza una perforación de 200mm de la cobija o cubierta de la cámara, en un punto alineado con la zona de conexión, a través del cual se dispondrá la columna de instalación.
La instalación, con inserción y extracción del cable de fibra óptica de la tubería presurizada es una tarea compleja en la que intervienen muchos elementos especialmente desarrollados para tal fin y que podemos resumir en los siguientes pasos:

1. Introducción de un paracaídas adherido a un cable guía en la canalización presurizada en el punto de inserción, esto es, punto en el extremo aguas arriba del tramo de cable a instalar.
2. Arrastre, mediante empuje del caudal del agua, del paracaídas corriente abajo hasta el punto de extracción.
3. Captura del paracaídas y cable guía en el punto de extracción mediante lazo captura previamente insertado en la tubería a presión.
4. Sujeción del cable AFO al cable de guiado en el punto de inserción.
5. Instalación de cabestrante hidráulico en el punto de extracción, aguas abajo, para realizar una tira del cable de guía y cable AFO.
6. Disposición del cable en su posición final dentro de la tubería, mediante uso del cabestrante en el punto aguas abajo.



Imagen 2.1.4.4. A la izquierda preparación del paracaídas, en el centro introducción del cable en el interior de la tubería y a la derecha detalle del cabestrante tirando de la cuerda.

Entre las principales ventajas del método de instalación con tubería en servicio destaca el hecho de no ser necesario poner la tubería fuera de servicio ni introducir personal en ella. Sin embargo, este método no puede utilizarse en condiciones de caudal extremadamente alto o bajo, en tuberías con trazados excesivamente sinuosos o cuando las cámaras no son adecuadas y no pueden modificarse para la instalación. Las tuberías con características que requieren una protección adicional de los cables pueden requerir un método de instalación híbrido para obtener la máxima vida útil del sistema.

Las instalaciones en seco ofrecen más opciones de diseño, con la posibilidad de instalar la protección de cables dentro de la tubería. En elementos como salidas y curvas cerradas se pueden utilizar aros de expansión y tubos de acero inoxidable para tender el cable de forma segura, mientras que en las instalaciones en servicio puede ser necesario roscar a ambos lados de estos elementos y tender el cable externamente. Las instalaciones en seco también son más predecibles, con más variables bajo el control del equipo de instalación, lo que reduce los retrasos inesperados.

Los plazos de ambos métodos son similares, con aproximadamente un día de instalación por tramo, y tramos de hasta 4572 m de longitud para las instalaciones en servicio y 3048 m para las secas, aunque normalmente se dividen en tramos más cortos y manejables.

b) Calibración y puesta en marcha del Sistema:

El sistema SoundPrint AFO determina la ubicación de un evento en función de su distancia a lo largo de la fibra desde el DAQ. Para ello se requiere de un proceso de calibración previa a la puesta en servicio. Este proceso consiste en la generación de impactos sobre la tubería con varillas específicas para tal fin. La realización de impactos de puesta en servicio implica golpear una ubicación conocida, normalmente cada subtramo entre válvulas y algunos accesorios intermedios, y registrar su distancia desde el DAQ. Cada impacto de puesta en servicio requiere un mínimo de cinco golpes en cada ubicación, para proporcionar redundancia y eliminar resultados extraños. Como mínimo, los impactos se completarán en todos los puntos de empalme. Siempre que sea posible, los impactos de puesta en servicio se realizarán a una distancia máxima de 800 m para garantizar la precisión de los informes dentro del sistema.

A su vez, será necesaria la calibración de cada unidad de adquisición de datos. Una vez montado, cada DAQ es calibrado a distancia, desde el centro de interpretación de datos, previa a su puesta en funcionamiento.

Dado que el cable AFO sólo está anclado en los puntos de empalme, cualquier holgura adicional que haya quedado en la línea debido a la fricción que se puede originar en su contacto con las paredes del tubo. Esta holgura afectará negativamente a la precisión del mapa, además de introducir el riesgo del desgaste dada la fricción del cable desgaste la cubierta del cable a un ritmo mayor.

Por todo ello, transcurrido un periodo inicial de uso (normalmente 4 semanas) es importante realizar labores de repensado del cable AFO y de actualización del mapa y calibración.

Labores extra de retesando serán requeridas durante la vida útil del cable AFO. La necesidad de estas labores será evaluada y definida durante las visitas y labores anuales de mantenimiento.

c) Monitorización

Una vez instalado y puesto en marcha, el sistema AFO se comenzará a supervisar la tubería y las labores de monitorización estructural. Para ello, un equipo de especialistas en monitorización y analistas de datos trabajan conjuntamente para garantizar que el sistema funcione de acuerdo con los estándares esperados y proporcione datos procesables al cliente.
Para garantizar que el sistema de monitorización SoundPrint AFO funciona correctamente, se incorporan una serie de pruebas automatizadas al funcionamiento estándar del sistema. En primer lugar, un componente del DAQ reproduce cada hora el sonido grabado de una rotura de cable real. El archivo de sonido incluye una característica distintiva al final que garantiza que el evento no se clasifique erróneamente como una rotura de cable.

Esta rotura de cable simulada puede ajustarse a una variedad de tamaños de energía total para probar y optimizar la sensibilidad del sistema en función de las condiciones de ruido de las tuberías específicas del lugar. La localización de los eventos se determina mediante una técnica de reflectometría óptica en el dominio del tiempo. Esta técnica, que utiliza una conversión A/D de muy alta velocidad, permite una resolución de localización de menos de 3 m a distancias superiores a 20 km.

Dada la sensibilidad del sistema, el tratamiento y análisis de los datos se realiza en dos fases:

- La primera es automática y tiene lugar en el sistema DAQ, donde se aplican filtros de hardware y software a los datos brutos entrantes. Analizando las características de los eventos de interés, los filtros pueden configurarse para rechazar la mayoría de los eventos acústicos que no son de interés. Esto reduce la cantidad de datos que requieren un procesamiento secundario.
- El procesamiento secundario utiliza una combinación de análisis y clasificación automatizados y manuales.

El DAQ utiliza el cable AFO para identificar los eventos acústicos a lo largo del cable AFO, guarda los datos de los eventos y transfiere los datos relevantes a la oficina de centrales de control de datos para su futuro cotejo y análisis. Cuando un evento se ha analizado y clasificado como rotura de cable, se envía una notificación por correo electrónico a las partes interesadas con la información sobre la hora y la ubicación. Los datos también quedan alojados en una plataforma virtual, online, accesible únicamente por el personal de proyecto y los gestores de la línea.
Tal plataforma, permite una valoración del estado de la red, así como una valoración y cuantificación del estado y evolución de los tubos afectados, incorporando herramientas de cálculo mecánico que son actualizadas automáticamente con los datos incorporados por el sistema AFO.

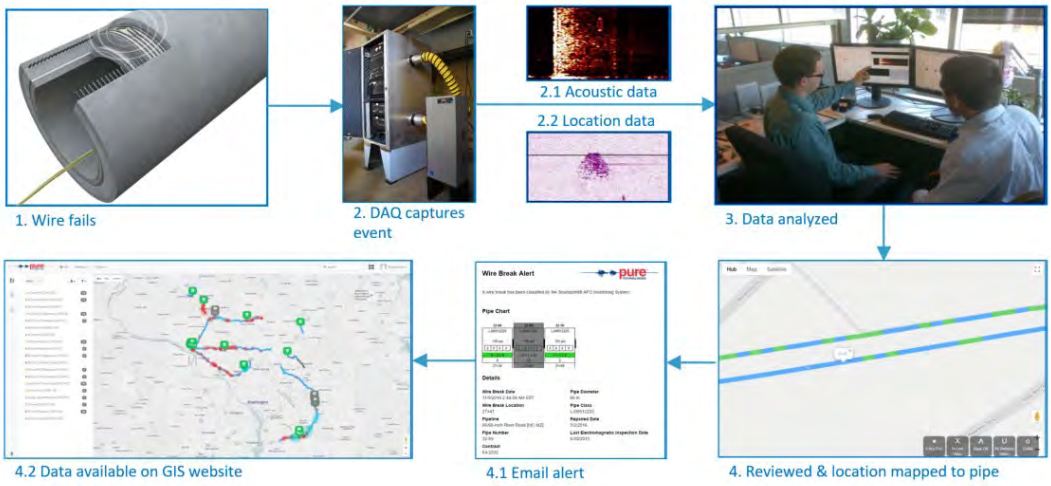


Imagen 2.1.4.5. Proceso de notificación de evento.

d) Notificaciones:

Si bien existen unos protocolos de notificación y comunicación estándar, podrán incluirse cualquier determinación o necesidad de comunicación que sea requerida por la empresa gestora de la red. Por lo general, durante la supervisión de las actividades de rotura de cables se publican en el sitio web de la plataforma AFO en el plazo de un día hábil después de cada evento, y son enviado, a modo de alertas, a los responsables gestores de la red mediante notificaciones por correo electrónico. Las notificaciones estándar incluyen:

- Alerta de rotura de cable
  Proporcionan los detalles de un evento de rotura de cable e incluyen instantáneas del sitio web de AFO Hub que muestran información de la tubería afectada. Toda la información del correo electrónico está disponible inmediatamente en el sitio web haciendo clic en el enlace que aparece en la parte inferior del correo electrónico e iniciando sesión.

- Alarma de tres tubos
  La alarma de tres tuberías se genera cuando se identifican y notifican tres roturas de cable en cualquiera de las tres tuberías adyacentes en un plazo de 24 horas. Con ello se pretende identificar actividad preocupante en una zona concentrada.

- Alarma de análisis de elementos finitos (FEA)
  Se genera una alarma de análisis de elementos finitos cuando existe una curva de análisis de elementos finitos para la clase de tubería y el número total de roturas de cable supera el 80% del límite de elasticidad a la presión de funcionamiento.

Además, la clasificación por secciones permite la identificación de tramos que presenten un elevado grado de deterioro, o que han experimentado una evolución importante en la tasa de roturas, pudiendo generarse protocolos específicos de escrutinio y control para estos tramos.

e) Portal web AFO Hub:

El portal web Hub, accesible de forma segura a través de un navegador web, proporciona un GIS de tuberías que puede incluir cualquier atributo disponible de la tubería, como el estado de base, la tasa de deterioro, las

especificaciones de diseño, el calendario de tendido, la presión de funcionamiento y las curvas de rendimiento FEA. Además de las roturas de cables u otra información proporcionada, los datos de monitorización de la presión transitoria también pueden integrarse y mostrarse en directo en el Hub.
AFO Hub, ofrece cuatro opciones de menú principales:
- Ver la ubicación de la tubería y la actividad de rotura de cable en un mapa GIS
- Proporcionar información completa sobre una tubería y sus secciones
- Consultar la información de las tuberías por tubería, por hora o por una lista de vigilancia especificada por el usuario.
- Buscar números de tuberías para localizar rápidamente la información.

2.1.5. EXPERIENCIAS/CASOS PRÁCTICOS

2.1.5.1. SENSADO DISTRIBUIDO SOBRE FIBRA ÓPTICA (DFOS) MEDIANTE TECNOLOGÍA DAS/HDAS E IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS POR APRENDIZAJE SUPERVISADO (MACHINE LEARNING).

Tal y como se ha explicado en apartados anteriores, la tecnología DAS (Distribuited Acoustic Sensing), utiliza cable de fibra óptica como micrófono distribuido con alta resolución espacial a largas distancias y HDAS (High-Fidelity Distribuited Acoustic Sensor) es un sensor acústico distribuido de alta calidad. La fibra óptica refleja una pequeña parte de la luz inyectada a medida que los fotones rebotan en la imperfección de la fibra (retrodispersión Rayleigh). En condiciones normales, sin eventos, se extrae por OTDR la luz retrodispersada y se obtiene una onda patrón. Ante un evento que afecte a la fibra (deformación), la onda retrodispersada es diferente al patrón.

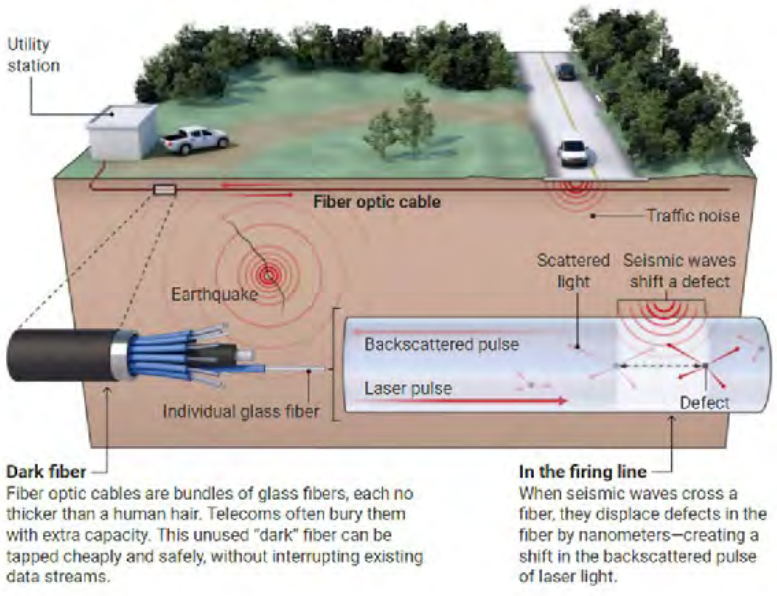


Imagen 2.1.5.1.1. Imagen procedente de la presentación "Sensado distribuido sobre fibra óptica (DFOS) mediante tecnología DAS/HDAS e identificación de eventos por aprendizaje supervisado (Machine Learning). Subdirección I+D+i Canal de Isabel II. Año 2022.

Basado en los sistemas DAS/HDAS, se pueden detectar eventos de forma automática captando las perturbaciones en el entorno de la fibra óptica:

- Ruidos (vibraciones): la fibra actúa como micrófono. El sonido a través de ondas mecánicas/ondas de presión provoca deformaciones en la fibra óptica. Resolución espacial: 10 metros.
- Actuando directamente sobre la fibra (deformación absoluta), se modifica la sección de la fibra por extensión o compresión.
- IA. Machine Learning. Algoritmo de IA (inteligencia artificial) que partiendo de la conversión de las señales ópticas en datos pueda identificar y clasificar eventos.

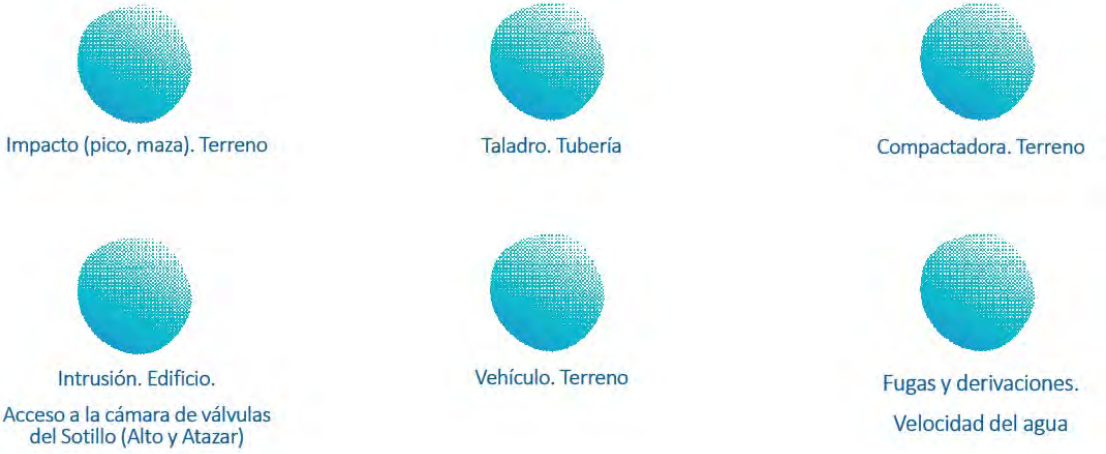
Desde Canal de Isabel II, S.A.M.P. en un proyecto conjunto entre las Subdirección de I+D+I y la Subdirección de e Conservación de Infraestructuras Zona Este se impulsó la prueba de tres tecnologías, que basándose en el mismo principio de medida (HDAS), los algoritmos de identificación y clasificación de eventos permitiera poner a prueba la detección de fugas, amenazas e interferencias en infraestructuras hidráulicas:



El proyecto se desarrolló en un canal de la red que gestiona Canal con una longitud total de 56 km y gran diferencia de cotas. En su trazado cuenta con 6 sifones y cruza también una línea de ferrocarril. Tiene la posibilidad de desviar caudal mediante dos trasvases y recibe caudal otros trasvases. En su trazado tiene dimensiones y configuraciones variadas.

La prueba piloto se desarrolla en un tramo de 5,6 km, que discurre a lámina libre, a presión y con sifones, y la infraestructura estaba dotada de fibra para comunicaciones.

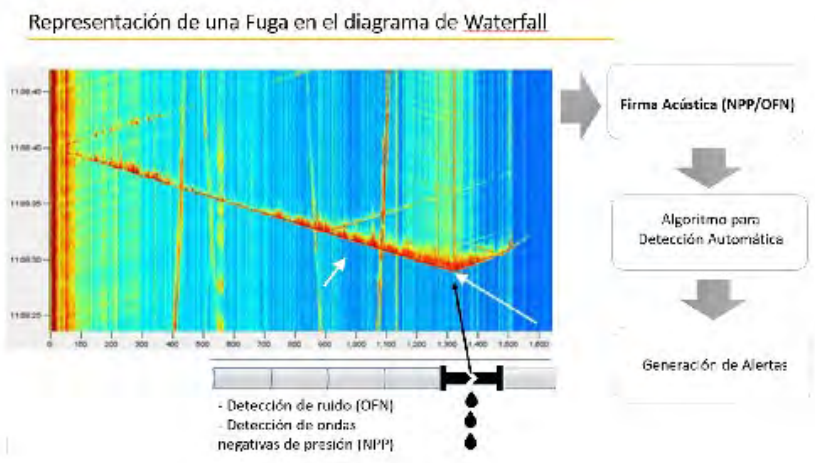
El objetivo de la prueba era conseguir identificar eventos de los siguientes tipos:



1) Impacto e intrusión en la Almenara de Fuencarral y Cámaras de Válvulas del Sotillo.
2) Máquina taladradora en carrete de desmontaje de caudalímetro del Sotillo
3) Circulación de un vehículo sobre la traza.
4) Reconocimiento de derivaciones y cambios de velocidad en el agua mediante maniobras de apertura de desagües y operación de la elevadora del Sotillo.

Aunque en el siguiente apartado se muestra los resultados más concretos relativos a las pruebas realizadas con la casa comercial OPTASENSE, en líneas generales las conclusiones obtenidas de los ensayos realizados se pueden resumir en las siguientes:

- Existe dificultad para simular fugas y validar la tecnología a la escala utilizada:
  - Existen perturbaciones producidas por el ruido de orificio.
  - Se produce un pulso de presión negativa en la onda de presión y se forma una onda en forma de V:



- Existen cambios de deformación loca. La fuga del fluido de la tubería perturba el terreno, lo que redunda en la deformación del cable de fibra óptica.
- Existen cambios de temperatura que dilatan o contraen la fibra. No son muy relevantes y sólo serían detectables en el caso de grandes fugas.

A pesar de ser una tecnología con un gran potencial, su funcionamiento es muy sensible a que el cable de fibra óptica se instale sobre la superficie de la tubería y con fijaciones adecuadas. Así mismo, es muy importante que las fibras ópticas instaladas sean capaces de detectar tanto vibración como deformaciones de la fibra.

2.1.5.1.1. PRUEBA PILOTO PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS, AMENAZAS E INTERFERENCIAS MEDIANTE TECNOLOGÍA OPTASENSE EN CANAL DE ISABEL II.

En la actualidad Canal de Isabel II dispone de una red de telecomunicaciones propia para asegurar la seguridad y protección del ciclo del agua, que ya cuenta con más de 1.100 km de fibra óptica instalados, y se prevé una ampliación de 277 km adicionales en los próximos 5 años. Por este motivo, si se confirma la viabilidad del empleo de la tecnología DFOS de forma complementaria a su uso actual como sistema de telecomunicaciones, se podría avanzar de forma rápida en mejora de la protección de las instalaciones y en la garantía de la continuidad del suministro a todos los clientes.

Dentro del proyecto de "SENSADO DISTRIBUIDO SOBRE FIBRA ÓPTICA (DFOS) MEDIANTE TENLOGÍA DAS/HDAS E IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS POR APRENDIZAJE SUPERVISADO (MACHINE LEARNING)" llevado cabo por la Subdirección de I+D+i de Canal de Isabel II, se desarrollaron pruebas en el tercer trimestre del año 2021. Como se ha explicado anteriormente los objetivos del proyecto son:

- Proyecto piloto en un canal de 5,6 km.
- Pruebas ciegas para la empresa comercial a efectos de validar la tecnología basada en DAS. En este caso de la casa comercial OPTASENSE.
- Los eventos a detectar son intrusión y fugas.

Como elemento sensor se ha utilizado fibra óptica monomodo G.652D y testada previamente mediante un OTDR. La conexión a internet se puso a disposición junto al equipo para que durante el periodo de demostración pudiera ser utilizada en remoto por todos los usuarios.

Previo a la prueba y dado que se trataba de ensayos ciegos se dieron ciertas indicaciones relativas a cómo se deben simular las fugas para que se ajusten a un escenario lo más real posible, de forma que los algoritmos basados en inteligencia artificial permitan detectar los eventos mediante su firma acústica.

Antes de exponer los resultados obtenidos, cabe adicionalmente hacer algunos apuntes:

- El rendimiento del Sistema depende del tipo de cable, método de instalación, ubicación del mismo. En la situación más ideal, el cable debería estar instalado fuera de la tubería de agua y enterrado directamente sin canalización a unos 50 cm de distancia.
- El rendimiento del sistema es independiente del rango dinámico (distancia total).
- Para las pruebas de fugas, es necesario el uso de disco de ruptura.



Imagen 2.1.5.1.1.1. Sistema de interrogación utilizado para las pruebas: unidad DAS, sistema de ventilación, unidad de post procesado de datos e identificación de firmas acústicas (PU), consola de control + software de visualización (CU) y altavoces de escucha de eventos.

La solución ofrecida por OPTASENSE basada en tecnología DAS (detección acústica distribuida) mediante un solo núcleo dentro de un cable de fibra óptica monomodo, enterrado de forma adyacente a la tubería es una solución para el monitoreo de tuberías con los siguientes rangos de detección:

- Pasos: hasta 5 metros
- Excavación: hasta 10 metros
- Vehículos: hasta 10 metros
- Actividad general
- Detección de fugas (según especificaciones de rendimiento).

El sistema envía datos de alerta de intrusión en tiempo real en una interfaz gráfica de usuario (GUI) personalizada que ofrece una representación visual de actividad acústica a lo largo de la tubería y una alerta clara en pantalla de la ubicación. El sistema puede enviar alertas a otras plataformas mediante protocolos de interfaz estándar y puede alimentar a sistema de CCTV (cámaras), siendo una ayuda visual para los operadores.

Las **fases** de la prueba piloto se pueden resumir en:

a) Estudio del lugar, inspección de la instalación de cables
b) Preparación, test y envío del sistema
c) Instalación física, configuración del equipo y geolocalización, grabaciones de escenarios de prueba y puesta a punto de detectores y test del sistema. Los ingenieros de OPTASENSE realizaron la instalación física del sistema de interrogación, la conexión a la fibra y la geocalibración de la distancia óptica del cable para que coincida con la distancia física a lo largo del activo.
d) Verificación del estado del sistema de forma remota.

Pruebas de eventos simulados (pruebas ciegas) y resultados:

a) **Prueba de fuga**: en este caso se simuló una fuga mediante la apertura de una de las válvulas del canal. El flujo estimado de derivación de agua fue de 50 l/s aproximadamente lo que corresponde a un 3% del flujo total. La prueba se prolongó durante 40 minutos. En este caso, el sistema no detectó cambios obvios, sin embargo, con tan sólo 1 día de calibración, sí que se pudieron relacionar eventos como la velocidad, sentido del flujo, acción de ventosas y variaciones de caudal. En este caso, dado que la fibra óptica ya estaba instalada en la infraestructura ya se presuponía antes de la prueba ciega que su ubicación y método de instalación no era el óptimo para esta simulación.
b) **Excavación**: se realizó una prueba ciega de excavación en superficie y la prueba fue completamente exitosa.
c) **Perforación en caudalímetro**: se realizó una prueba de perforación en un caudalímetro. La prueba ciega se realizó sin que la empresa Optasense supiera el tipo de actividad o herramienta a usar. En este caso se detectó perfectamente la "intrusión" mediante el taladro en el caudalímetro a ambos lados de la tubería, con la fecha, hora exacta y ubicación. Así mismo, se detectó durante la prueba un evento de intrusión en otro extremo de la fibra, confirmándose posteriormente que se trataba de un equipo de trabajo tomando algunas fotografías.
d) **Paso del tren**: durante las pruebas ciegas de intrusión, también se detectó que el paso del ferrocarril (a poca distancia del final de la fibra y que discurre de forma paralela a la misma), deja huella en la monitorización también.
e) **Intrusión en el edificio**: se realizó una simulación de actividad de intrusión en uno de los edificios que cuenta con fibra óptica. En primer lugar, se golpeó con maza la pared exterior del edificio, se simuló la apertura por intrusión de la puerta, se tocó directamente la coca del cable de fibra que está en el interior del edificio. El sistema detectó todos estos eventos e incluso el cierre final de la puerta una vez concluida la actividad. Todos los eventos fueron detectados sin problemas por el sistema.
f) **Detección de vehículo**: se realiza el test de actividad para un vehículo tipo furgoneta en una zona de carretera sin asfaltar.

A modo de ejemplo, se muestran dos figuras. La imagen 2.1.5.1.1.2 se tomó en tiempo real durante la prueba de excavación y las firmas acústicas de excavación se pueden ver claramente al final de la pantalla de la cascada.

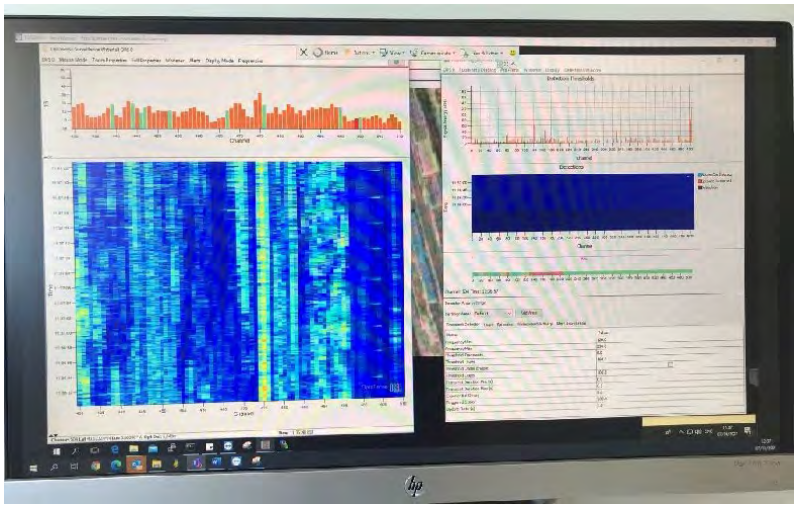


Imagen 2.1.5.1.1.2. Detección en tiempo real de la prueba simulada de excavación.

En la figura 2.1.5.1.1.3 se puede observar la detección de vehículo, de manera que a medida que el vehículo se aleja del edificio, la señal se debilita y al volver al edificio se realiza a mayor velocidad observando que la señal es aún más nítida.

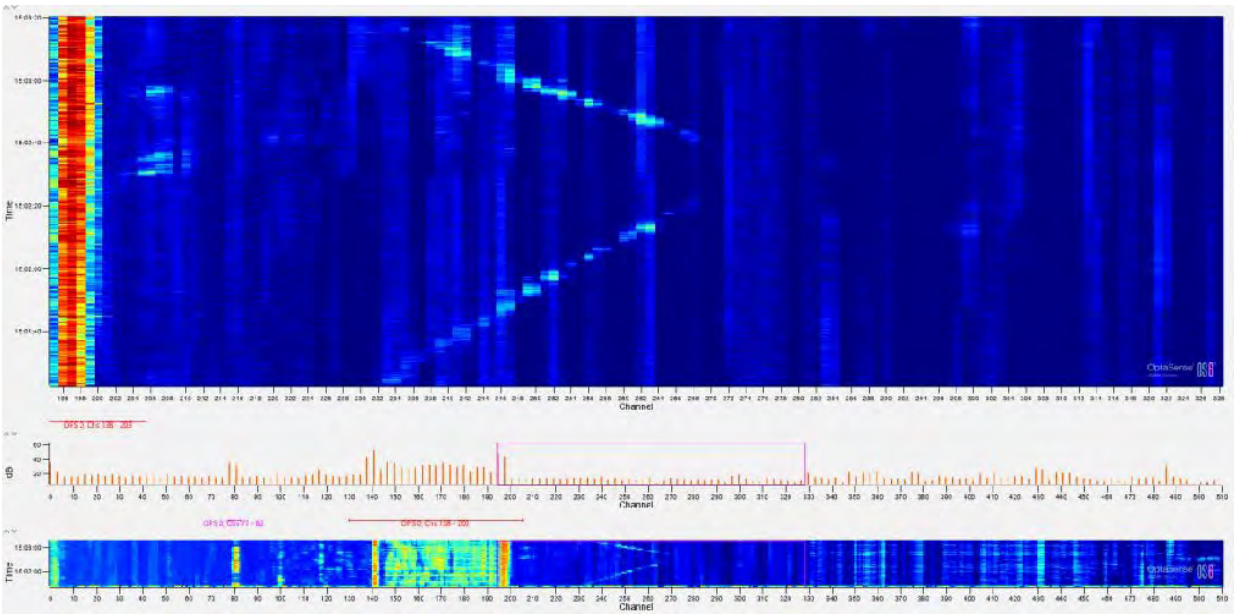


Imagen 2.1.5.1.1.3. Representación del sistema. Vehículo en ambas direcciones visto en cascada.

Como conclusión, las pruebas realizadas, en test controlados como pruebas ciegas, durante las dos semanas de duración del piloto, han proporcionado a Canal de Isabel II una información completa de la solución propuesta para varios eventos de intrusión, así como información relacionada con el flujo del agua (velocidad, movimiento, sentido, acción de ventosas, etc.). Se ha demostrado con éxito y de forma eficiente (con tan sólo un día de calibración del sistema) los beneficios de la tecnología DAS Optasense, incluso en una instalación antigua y con un cable de fibra sensor no óptimo en lo referente a su ubicación y método de instalación, para los objetivos deseados.

Respecto a los eventos de detección de fugas de agua, el escenario de este tipo de simulaciones no es el adecuado para construir un banco de simulación de fugas por lo que están previstas otras pruebas en diferentes condiciones.

2.1.5.2. SISTEMA MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL CON FIBRA ÓPTICA. SOUNDPRINT AFO.

El Consorci d'Aigües de Tarragona (CAT), creado en 1985, es responsable del abastecimiento en alta a un territorio que cubre el 36% de la provincia de Tarragona, lo que supone el suministro a una población de alrededor de 800.000 personas (1.500.000 personas en verano) así como los equipamientos industriales y servicios existentes en el área. Para ello, el CAT gestiona 23 bombeos, 120 llegadas a depósitos y más de 400km de red que tienen su punto de partida en la captación del rio Ebro a la altura de Campredó (Tortosa).
De entre sus activos, destaca el conjunto de líneas Conducció Principal y Secundaria, una línea de transmisión que traslada el agua desde la captación a la ETAP, en el municipio de la Ampolla, y desde ahí a toda el área de cobertura (imagen siguiente). Resultando una red mallada sin redundancia en la que las mencionadas líneas tiene un papel crucial para el servicio.

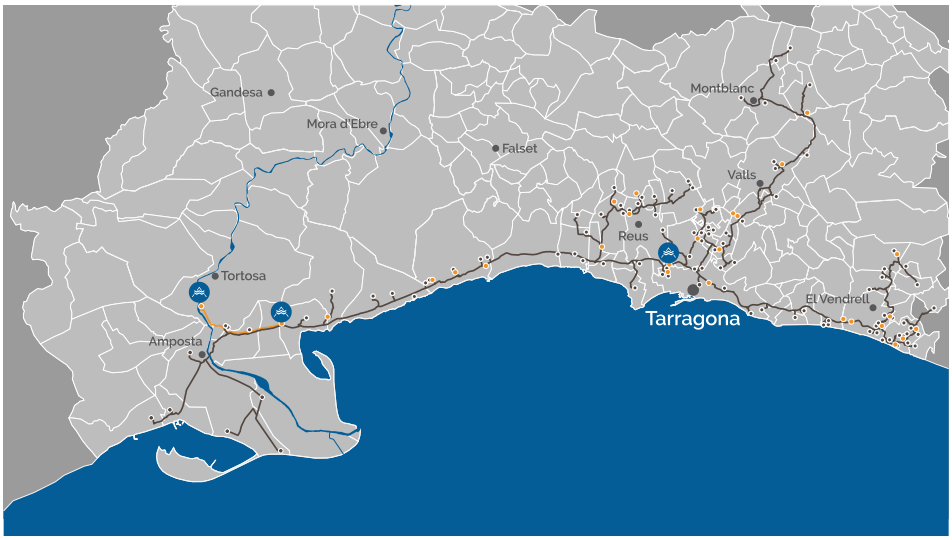


Imagen 2.1.5.2.1. Red de tuberías del Consorci d'Aigües de Tarragona

En enero de 2020, el CAT sufrió una gran rotura en Conducció Principal, en un tubo DN1600 de hormigón pretensado con camisa de chapa, que generó grandes daños materiales. Este evento supuso un cambio radical en la gestión de las tuberías del CAT, pasando del mantenimiento correctivo clásico a un mantenimiento predictivo avanzado con la implantación de un gemelo digital para tuberías de gran tamaño, mediante la monitorización estructural de la Conducció Principal y Conducció Secundaria con el Sistema SoundPrint AFO de la empresa Xylem.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SOUND PRINT AFO DEL CAT:

Como ya se ha mencionado, el sistema SoundPrint AFO instalado en el CAT monitoriza la Conducció Principal y Conducció Secundaria, un total de 83 km de tuberías de hormigón pretensado con camisa de chapa y hormigón armado con camisa de chapa en diferentes diámetros: 1.600 mm, 1.300 mm, 1.100 mm y 800 mm.
La instalación del sistema SoundPrint AFO se hizo mediante instalación presurizada, manteniendo la red en servicio durante su implantación. Este hecho presentaba la ventaja de no tener mínima incidencia sobre el servicio, condición esencial dada la no redundancia de la Conducció Principal y Conducció Secundaria. A cambio fue necesaria una importante labor de coordinación entre los equipos de instalación y los equipos de gestión del CAT, para poder suministrar los caudales requeridos por el proceso de instalación y actuar en caso de contingencia.
La configuración de la instalación del sistema de fibra óptica en la totalidad de la longitud requirió de la disposición de 3 equipos de adquisición de datos (DAQ) y un total de 5 secciones de cable, tal y como se muestran en la figura siguiente:

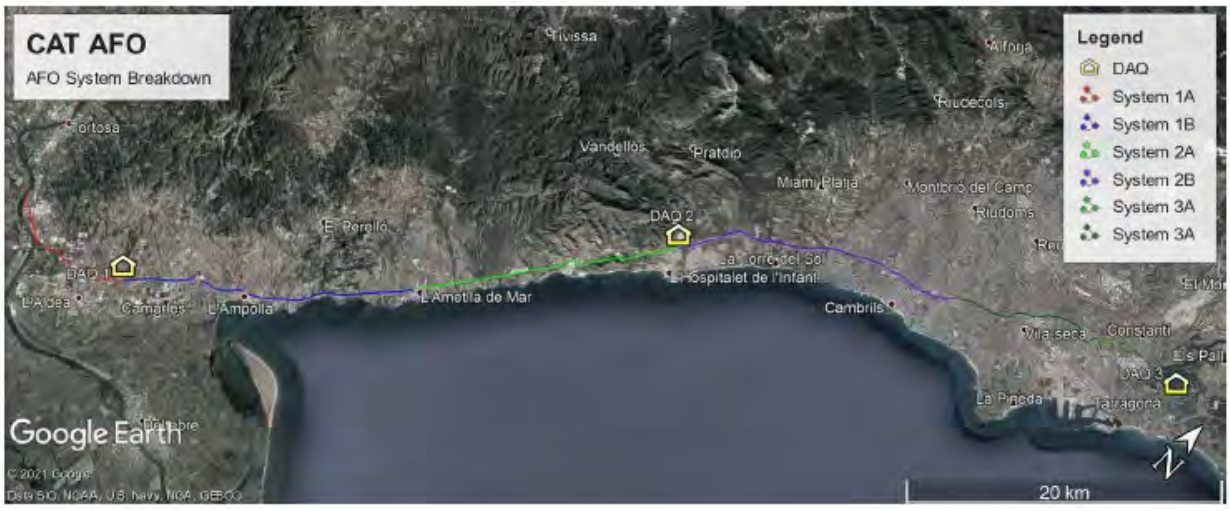


Imagen 2.1.5.2.2. Esquema general de sistemas de monitorización en la Conducció Principal y Conducció Secundaria

Para la instalación y posterior realización de labores de mantenimiento se diseñaron y ejecutaron más de 60 puntos de empalme, que permiten la entrada y salida del cable, en condiciones de estanqueidad en la red. La selección de la localización de estos puntos de empalme responde a dos motivos principales:

- Presencia de válvulas o elementos de discontinuidad en la red, que el cable AFO debe sortear de forma externa. Además de las válvulas, se consideraron trazados alternativos que sortearan lo bombeos intermedios existentes.

- Longitud máxima de puesta de cable en las condiciones de instalación. El cable, durante su instalación y funcionamiento se somete a solicitaciones (fricciones y tracciones) que deben limitarse para evitar roturas. Estas limitaciones conllevan unas longitudes máximas para cada tramo instalado, según su trazado, diámetro, caudal, etc.

Para la disposición de estos puntos de empalme se seleccionaron elementos existentes del sistema, que fueron rediseñados y adaptados para la posterior instalación del sistema SoundPrint AFO, tales como ventosas, bypass o bocas de hombre.

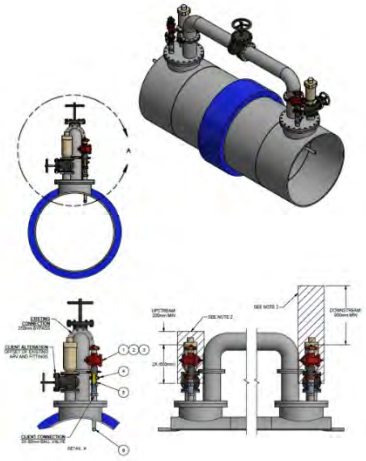


Imagen 2.1.5.2.3. Ejemplo de diseño de elementos para punto de empalme sobre elementos existentes en la red. En este caso puntos de empalme en by-pass de válvula de mariposa.

Como puede desprenderse de lo anteriormente mencionado, la instalación del sistema SoundPrint AFO en la Conducció Principal y Conducció Secundaria requirió de la ejecución de una serie de adaptaciones y obra civil complementaria que se realizó previamente a la instalación propiamente dicha del sistema de monitorización.
En este tipo de trabajos también se incluyeron la acomodación de las instalaciones a las necesidades requeridas para la ubicación y puesta en funcionamiento de los 3 sistemas de adquisición de datos, DAQs, (figura siguiente) repartidos a lo largo de la traza, así como las actuaciones necesarias para el suministro de energía eléctrica y conexión a internet de los mismo.

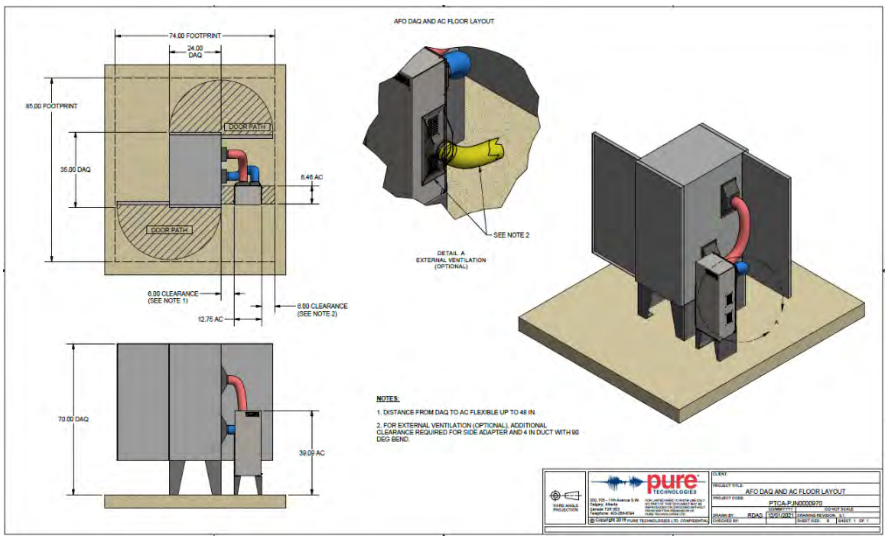


Imagen 2.1.5.2.4. Requerimientos dimensionales de los equipos DAQ del sistema SoundPrint AFO

PROCESO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA SOUNDPRINT AFO

La instalación del sistema SoundPrint AFO dio comienzo durante el mes de marzo de 2022 y finalizó durante el mes de julio de 2023. Este periodo de instalación tan prolongado se debió a la necesidad de coordinación entre los trabajos de adaptación de la red y los trabajos de instalación propiamente dicha.
El proceso de instalación fue, en toda la trama, de instalación presurizada. Realizándose en un tramo actuaciones programadas, con línea desaguada, para la disposición de elementos de sujeción interna. Si bien, la instalación presurizada permite mantener en servicio la conducción durante su puesta, existen unos valores máximos y mínimos de caudal que deben mantenerse en la línea, para limitar la velocidad de desplazamiento del paracaídas. En el caso de la instalación del CAT se establecieron valores mínimos y máximos de 0,3m/s y 1,8m/s, respectivamente, para la velocidad del fluido durante el proceso de instalación y presiones máximas de 1,5 MPa en los puntos de inserción y extracción. El procedimiento habitual de instalación de un tramo de cable AFO en la instalación del CAT seguía el siguiente esquema:

<table>
<tr><th colspan="5">Secuencia tipo diaria de instalación presurizada en el CAT</th></tr>
<tr><th>Time</th><th>#1 – Inserción del Cable</th><th colspan="2">#2 – Extracción / Inserción del Paracaídas</th><th>#3 – Extracción del Paracaídas</th></tr>
<tr><td>8:00</td><td>Desplazamiento al sitio y configuración de equipos</td><td colspan="2">Desplazamiento al sitio y configuración de equipos</td><td rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td>9:00</td><td>Preparación de Cable AFO para inserción</td><td>Configuración de equipos de tracción de cable</td><td>Test de caudal</td></tr>
<tr><td>10:00</td><td rowspan="3">Inserción y despliegue del cable AFO en la tubería</td><td rowspan="3">Tracción del cable AFO</td><td rowspan="2">Instalación elementos Aguas Abajo</td><td>Desplazamiento a la cámara, configuración de detención de caídas</td></tr>
<tr><td>11:00</td><td>Lanzamiento del paracaídas</td><td rowspan="2">Instalación de elementos de entrada y salida.</td></tr>
<tr><td>12:00</td><td rowspan="3">Coordinación de la captura dirigidos por el equipo de extracción</td></tr>
<tr><td>13:00</td><td rowspan="2">Empaquetado de equipos y cierre de cámara</td><td rowspan="3">Apertura para montaje de equipos y materiales y elementos de empalme.</td><td>Supervisión de la aproximación del paracaídas mediante cámara.</td></tr>
<tr><td>14:00</td><td>Captura del paracaídas y extracción.</td></tr>
<tr><td>15:00</td><td rowspan="3">Apertura para montaje de equipos y materiales y elementos de empalme.</td><td rowspan="3">Empaquetado de equipos y cierre de cámara</td><td>Instalación elementos de protección</td></tr>
<tr><td>16:00</td><td rowspan="2">Empaquetado del equipo y cierre la cámara.</td></tr>
<tr><td>17:00</td></tr>
</table>

Tabla 1. Secuencia tipo diaria de instalación presurizada en el CAT

Durante el proceso de puesta e instalación de cada uno de los tramos de cable en el interior de la tubería, se cerraron todas las válvulas de derivación, desagüe o purgas existente, pudiendo coordinarse cierres puntuales gracias al rastreo y localización del paracaídas durante las maniobras.

PUESTA EN FUNCIONAMIENTO

La puesta en funcionamiento del sistema se hizo, de forma parcial, de acuerdo con la finalización de instalación de los tramos de cable AFO y sistemas de adquisición de datos.
Así en julio de 2022 se comenzó con la monitorización del primer tramo instalado, Fase 1B, de 15km, alcanzándose la monitorización de la línea al completo en julio de 2023.

El funcionamiento del sistema de monitorización cuenta con la supervisión y control de dos equipos de análisis de datos y monitorización, situados en Manila (Filipinas) y Calgary (Canadá) para reducir los tiempos de respuesta a un máximo de un día laboral. Y con un equipo de mantenimiento, que realiza tareas in situ, al menos, una vez al año.

EL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN

Los sistemas de monitorización estructural de la Conducció Principal y Conducció Secundaria se visualizan mediante la plataforma HUB AFO, que presenta mediante sistema GIS los datos recopilados por el sistema SoundPrint AFO. Se trata de una plataforma con posibilidad de visualización de las conducciones Principal y Secundaria, en formato GIS, sobre las que se presenta el número de espiras pretensadas rotas en las tuberías de hormigón pretensado con camisa de chapa. Con este valor, la plataforma presenta el estado estructural, o análisis de riesgo, mediante la generación de curvas de riesgo de acuerdo con los límites definidos por las AWWA C301 y C303.

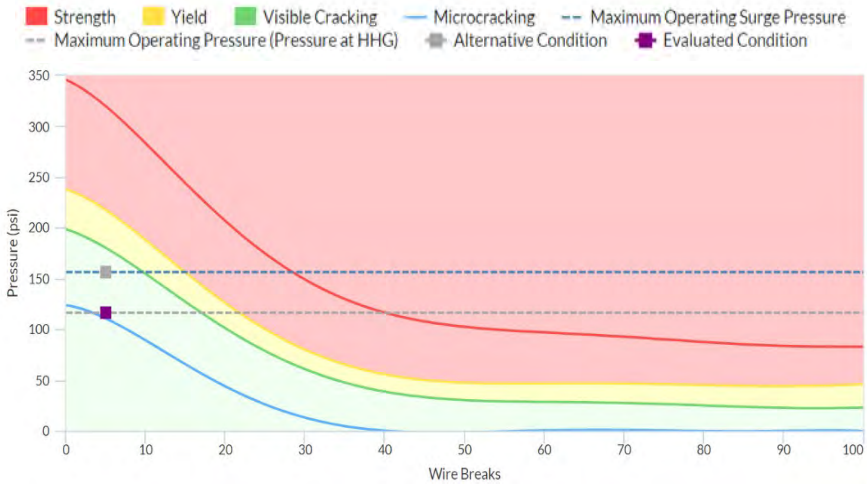


Imagen 2.1.5.2.5. Ejemplo de análisis estructural mediante curvas de riesgo para los tubos de hormigón pretensado con camisa de chapa del CAT. Este análisis está disponible para cada uno de los tubos monitorizados.

La plataforma permite visualizar los datos de evolución histórica de la línea, tubo a tubo. Reflejando, para cada uno de los 13.081 tubos monitorizados la tipología de tubo, clase de presión y especificaciones, condiciones de instalación, fechas de inspección, resultados de las inspecciones realizadas. Así como la evolución de estos datos. La emisión de alertas, con cada uno de los eventos detectados, completa el sistema de monitorización. Se trata de alertas en formato e-mail que se envían a los responsables de gestión y mantenimiento designados por e CAT.

RESULTADOS E IMPACTO DEL FUNCIONAMIENTO

El sistema ha detectado, desde su puesta en funcionamiento, eventos acústicos relacionados con rotura de espira en los tubos monitorizados (imagen siguiente). De ellos, 189 eventos se corresponden con roturas de espiras de pretensado, mientras el resto son eventos en tubos armados (en revisión).

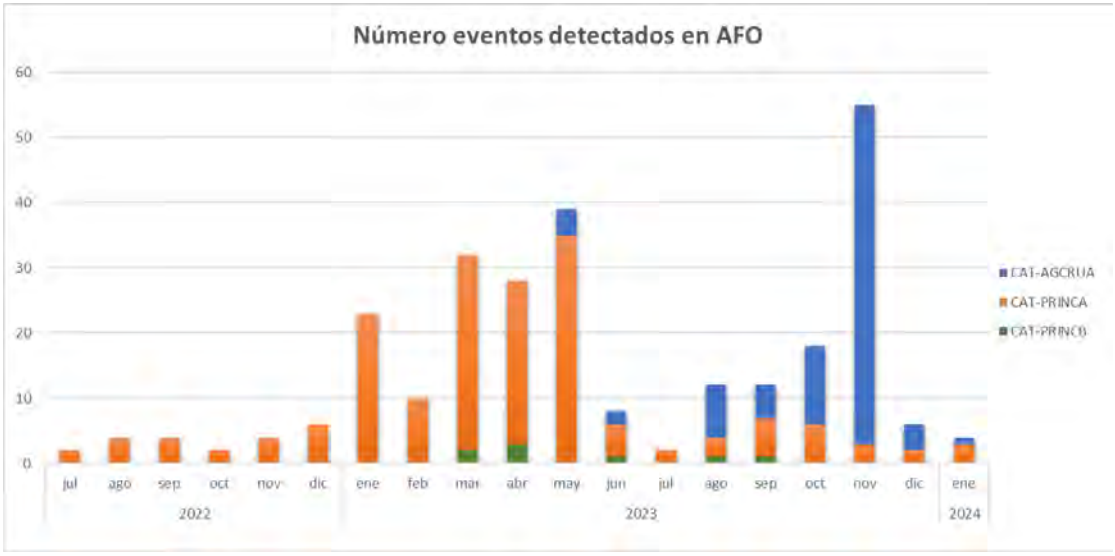


Imagen 2.1.5.2.6. Eventos de roturas de espiras detectados mensualmente desde instalación AFO, según zona

Como ejemplo de gestión posibilitada por la monitorización del sistema, es especialmente destacable el incremento de actividad que se produjo el 19 de enero de 2023, asociado a tres tubos de PCCP instalados en una galería bajo la carretera principal de acceso al municipio de l'Ametlla de Mar. Este incidente supuso una actuación de urgencia que, mediante la disposición de un cajón de hormigón para los tres tubos afectados, evitó su colapso y los posibles daños catastróficos que podría haber producido. La tipología de reparación permitió la continuidad del sistema de monitorización en estos tubos, dando muestra de la actividad de degradación de estos y momento de fallo, en caso de no haberse realizado la reparación, tal y como puede observarse en la figura siguiente.

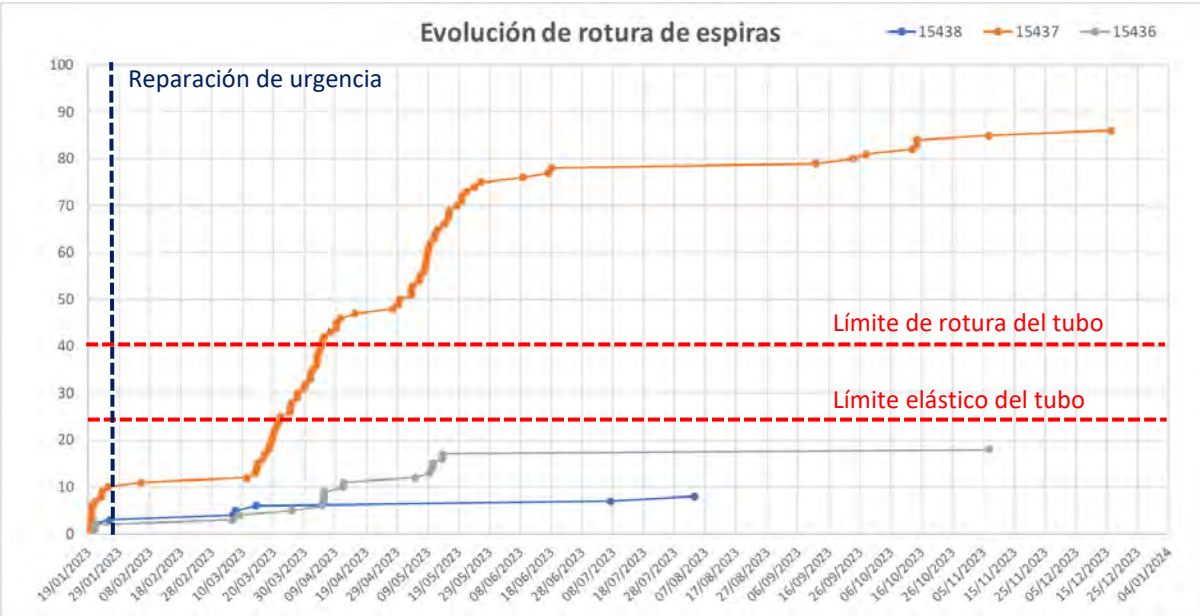


Imagen 2.1.5.2.7. Evolución de rotura de espiras de los 3 tubos de la galería

CONCLUSIÓN

La instalación y puesta en funcionamiento del sistema SoundPrint AFO en la Conducció Principal y Secundaria supuso la ejecución de actuaciones en las líneas durante algo más de 1 año y medio, así como la constante coordinación de los equipos del CAT y Xylem. Estos esfuerzos concluyeron con una instalación exitosa y con la posibilidad de monitorización en continuo de la totalidad de tubos existentes en la línea. Tal monitorización proporciona información que permite evitar fallos catastróficos y mejorar la eficiencia de gestión, en cuanto a facilitar la toma de decisiones para el mantenimiento de la línea.

2.2. SENSORES INSTALADOS EN ELEMENTOS DE LAS CONDUCCIONES

2.2.1. MONITORIZACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN CONDUCCIONES.

La corrosión es un fenómeno electroquímico según la cual un metal se transforma en un óxido. Supone que una corriente eléctrica circula entre determinadas zonas de la superficie del metal, ánodos y cátodos, a través de una solución o liquido (electrolito) que está en contacto con ambas zonas, capaz de conducir esa corriente. Es decir, el electrolito debe ser conductor eléctrico y es el que proporciona el medio a través del cual se produce el desplazamiento de cargas eléctricas o electrones desde el ánodo (polo positivo, cede electrones) hasta el cátodo (polo negativo, receptor de electrones). La zona de la superficie de metal que actúa como ánodo se disuelve o corroe al perder electrones, y la que actúa como cátodo queda protegida.

La corrosión de las tuberías es, generalmente, una **consecuencia de la naturaleza del medio ambiente en que estén instaladas, del material de su fabricación, del régimen de funcionamiento a que se ven sometidas y de los medios de protección empleados**. Para alcanzar la protección catódica se deben satisfacer las siguientes condiciones:

– Continuidad eléctrica.
– Aislamiento eléctrico.
– Recubrimiento externo.

Dentro de las Normas Técnicas para la instalación de redes de abastecimiento, en concreto, este extracto se ha obtenido de la Norma de Abastecimiento de Canal de Isabel II v.4 2021, se especifica que, para la protección contra la corrosión de las tuberías de acero, **se dispondrán de sistemas de protección catódica complementariamente a la protección pasiva mediante revestimientos.**

La continuidad eléctrica longitudinal de una tubería de acero se conseguirá mediante uniones soldadas. Su aislamiento de otras estructuras también enterradas y que no se desean proteger, tales como redes de tierra de cobre, armaduras de estructuras de hormigón armado, otras tuberías, etc. se llevará a cabo instalando juntas dieléctricas con ciertas precauciones para evitar que la corriente de la protección catódica las cortocircuite por el interior a través del agua.

El proyecto de la conducción debe detallar el sistema de protección catódica a instalar, así como las condiciones de los materiales, las de instalación de éstos y cuantas otras características sean necesarias para el buen funcionamiento de la protección adoptada. En conducciones enterradas es conveniente efectuar un reconocimiento y estudio del trazado, que permita conocer la naturaleza del terreno y su potencial agresividad

respecto de la tubería que se pretende instalar. Como resultado de todos los parámetros (naturaleza del terreno: porosidad, humedad, resistividad, pH, potencial redox, contenido en sales), se puede determinar, en cada caso, la agresividad potencial del suelo frente a los fenómenos de corrosión a efectos de establecer el tipo de tubería más adecuada en cada proyecto. Las condiciones naturales del suelo y por tanto su potencial agresividad, pueden variar a lo largo del tiempo debido a procesos de contaminación tanto físico-químicos como eléctricos. Por ello, es necesario que las conducciones eléctricamente continuas se diseñen e instalen con los dispositivos adecuados para que en cualquier momento de su vida útil pueda aplicarse un sistema de protección catódica.

Los sistemas más usados son:

- Protección mediante ánodos de sacrificio
- Protección mediante corriente impresa

Más allá, de entrar en el sistema de protección catódica elegido, en este apartado nos centraremos en **analizar cómo se puede vigilar el sistema de protección catódica, con el fin de medir el potencial de polarización de la tubería y comprobar la efectividad del sistema de protección**.

Con el fin de medir el potencial de polarización de la tubería y comprobar la efectividad del sistema de protección catódica, a lo largo de la tubería, deberán instalarse puestos de toma de potencial en puntos tales como:
– Cruces con estructuras metálicas.
– Juntas aislantes.
– Cruces con puentes, carreteras, canales de agua, etc.
– Zonas de corrientes vagabundas.

En cualquier caso, estos puestos no estarán separados en general más de 3 km y en zonas muy urbanizadas más de 1 km y estarán formados por un cable conectado a la tubería enterrada y con el otro extremo accesible situado en el interior de una arqueta (podrán utilizarse los registros destinados al alojamiento de los elementos de maniobra y control). Para la medida de los potenciales anteriores debe seguirse lo establecido en la norma UNE-EN 13509:2003. Una vez puesto en funcionamiento el sistema de protección catódica adoptado debe realizarse su mantenimiento durante la vida útil del mismo.

En general, las operaciones a realizar son las siguientes:

– Comprobación anual de la eficacia del sistema adoptado.
– Comprobación bimestral de las fuentes de corriente impresa. Esta operación podrá realizarse, por ejemplo, a través de la medida de la intensidad de salida, por el consumo normal de energía, por los valores de potenciales de la tubería, etc.
– Inspección anual de los sistemas de protección de las instalaciones de corriente impresa (conexiones de puesta a tierra de seguridad, precisión de los aparatos de medida, rendimiento y resistencia del circuito, etc.).
– Inspección bimestral de los interruptores-inversores de corriente, diodos, puentes de conexión y demás dispositivos de protección.
– Reemplazo periódico de los ánodos que se vayan desgastando y reparación de las averías eléctricas en el sistema.

En el siguiente apartado se explica en más detalle el sistema integral de televigilancia para la protección catódica instalada en varios tramos de arterias de Canal de Isabel II, en este caso, particularizado en uno de ellos.

2.2.1.1. CASO PRÁCTICO: SISTEMA INTEGRAL DE TELEVIGILANCIA PARA PROTECCIÓN CATÓDICA RAMAL ESTE DEL SISTEMA TORRELAGUNA, TRAMO VALDEOLMOS-AJALVIR. CANAL DE ISABEL II.

El trazado de la conducción de refuerzo definido tiene una longitud de 11.555 m en tubería de acero helicosoldado de DN 1.000 mm. Parte del depósito de cabecera de Torrelaguna y discurre por el mismo corredor que la tubería existente hasta las inmediaciones de Talamanca del Jarama.

Los espesores de la tubería varían en función de las presiones internas y externas entre 9,5 mm y 11,1 mm, siendo el primero el espesor predominante. La protección exterior de la tubería es de polietileno tricapa con 3 mm de espesor. La protección interior de la tubería es de pintura epoxi alimentaria con un espesor de 400 µm.

En la conducción existen arquetas de conexiones, caudalímetros, ventosas, desagües, y válvulas de seccionamiento, que son de hormigón armado, cuyas armaduras pueden estar en contacto con el acero de las tuberías. Además, las piezas que conforman las ventosas, que van hormigonadas dentro de las arquetas, suelen tener un recubrimiento de inferior calidad que el resto de las tuberías.

Todo esto hace que la instalación se tenga que considerar como una estructura compleja según la norma EN 14505 Protección catódica de estructuras complejas, anteriormente mencionada.

Después del análisis correspondiente, no se prevén afecciones importantes por cruces con líneas electrificadas que influyan negativamente en el sistema de protección, como son especialmente las líneas de ferrocarril o líneas aéreas de alta tensión. El sistema de protección catódica adoptado es **por corriente impresa**.

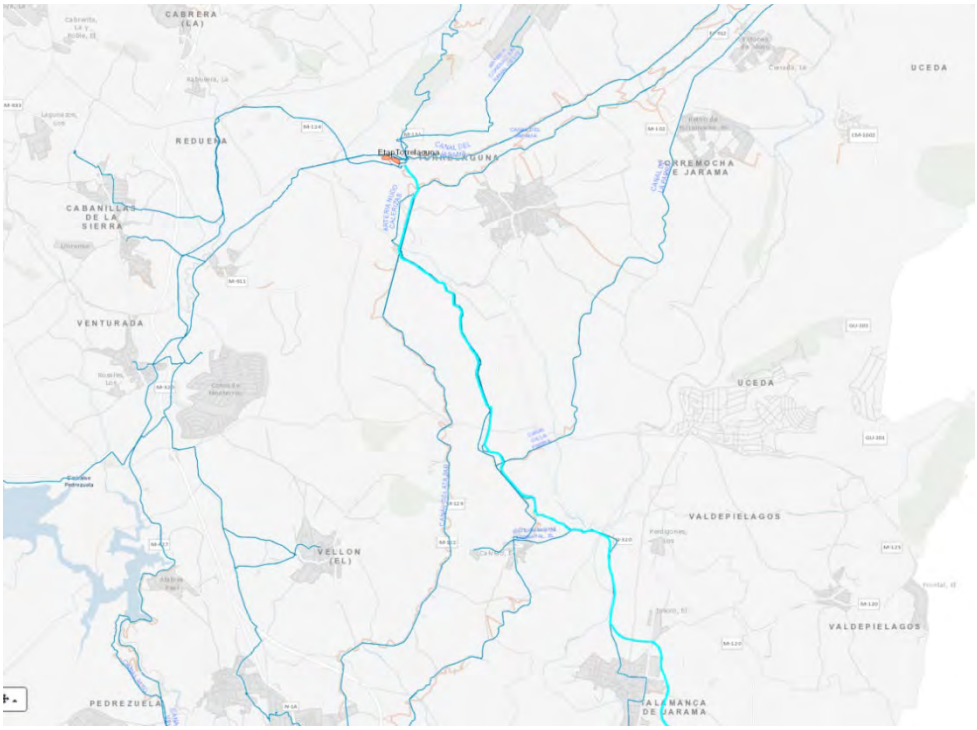


Imagen 2.2.1.1.1. Trazado del Refuerzo del Ramal Este en su tramo desde Torrelaguna a Talamanca (Madrid).

Diseño del sistema de protección catódica:

El sistema elegido es por corriente impresa y está constituido por:

- Transfo-rectificador:
- Lecho anódico
- Electrodo de referencia (para controlar los transfo-rectificadores en su actuación automática, así como para la medida de potencial)
- Tomas de potencial: con el fin de poder medir el potencial de la instalación y así controlar el sistema de protección catódica se han instalado tomas de potencial simples a lo largo de toda la traza. Para poder proteger y controlar las juntas aislantes de la tubería, se han instalado en estos puntos tomas de potencial del tipo especial, que van provistas de un conjunto de descargadores de sobretensión y toma de tierra.
- Electrodos probeta: Con el fin de poder realizar medidas de potencial libres de caídas IxR, se han instalado electrodos probeta. Los electrodos disponen de probeta de 10 cm2. Se encuentran instaladas al pie de las tomas de potencial, a unos 0,2 m de la tubería y a su misma profundidad.
- Puestas a tierra
- Juntas aislantes
- **Sistema de Televigilancia: Constituido por cuatro equipos dos para las EPC´S y dos para TP´S**.

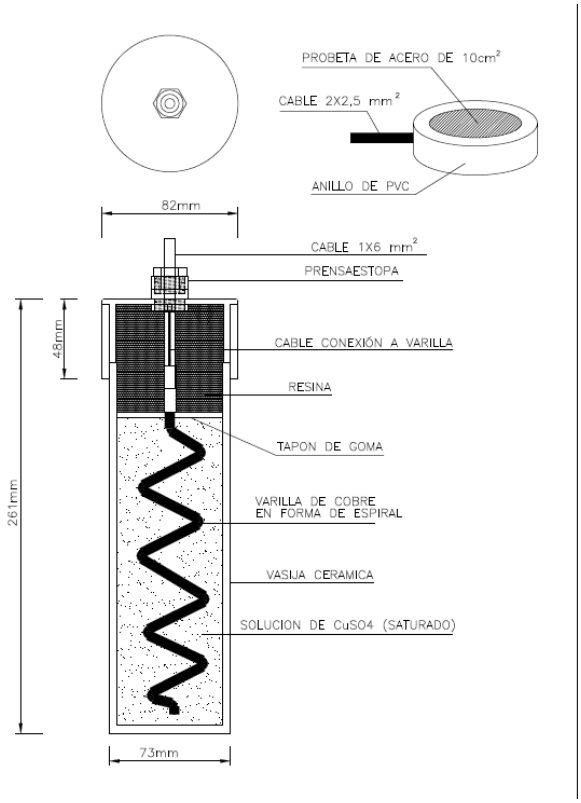


Imagen 2.2.1.1.2. Detalle de electrodo Cu/CuSo4 y probeta de acero.

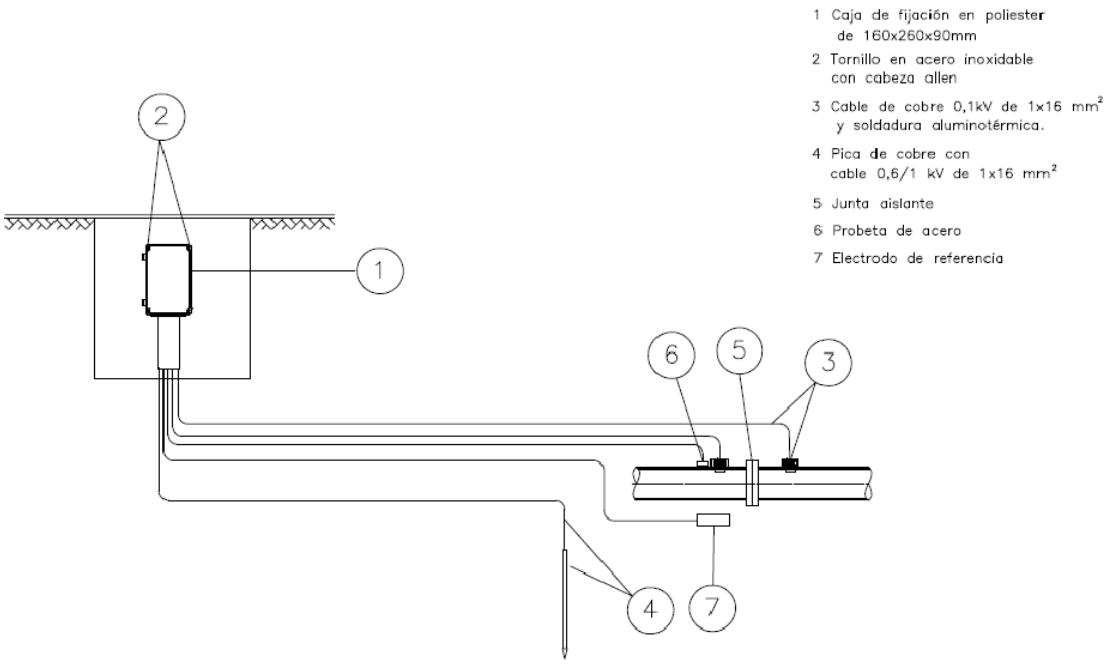


Imagen 2.2.1.1.3. Conjunto de instalación de TPE con junta aislante, electrodo y probeta en arqueta.

El sistema integral de televigilancia para la protección catódica se basa en un sistema configurado con **DATALOGGER** y **SOFTWARE DE CONTROL Y ANÁLISIS** y equipos de televigilancia de **EPC´s (estación de protección catódica)** y **TP´s (tomas de potencial).**

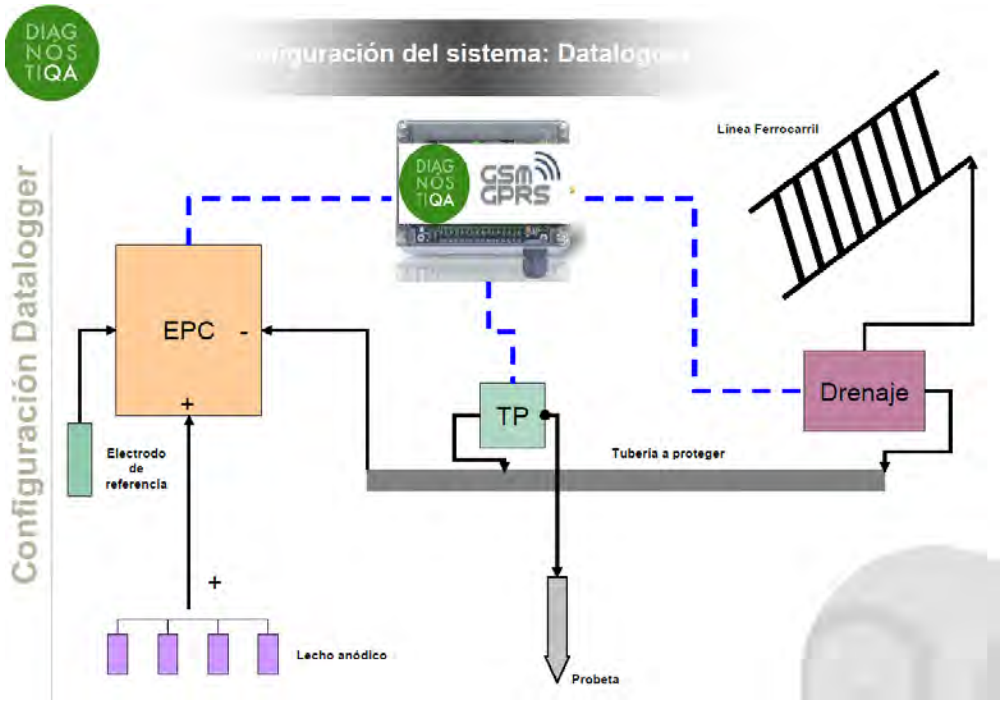


Imagen 2.2.1.1.4. Configuración del sistema de televigilancia. Esquema confeccionado y cedido por DiagnostiQA (sistema HADES)

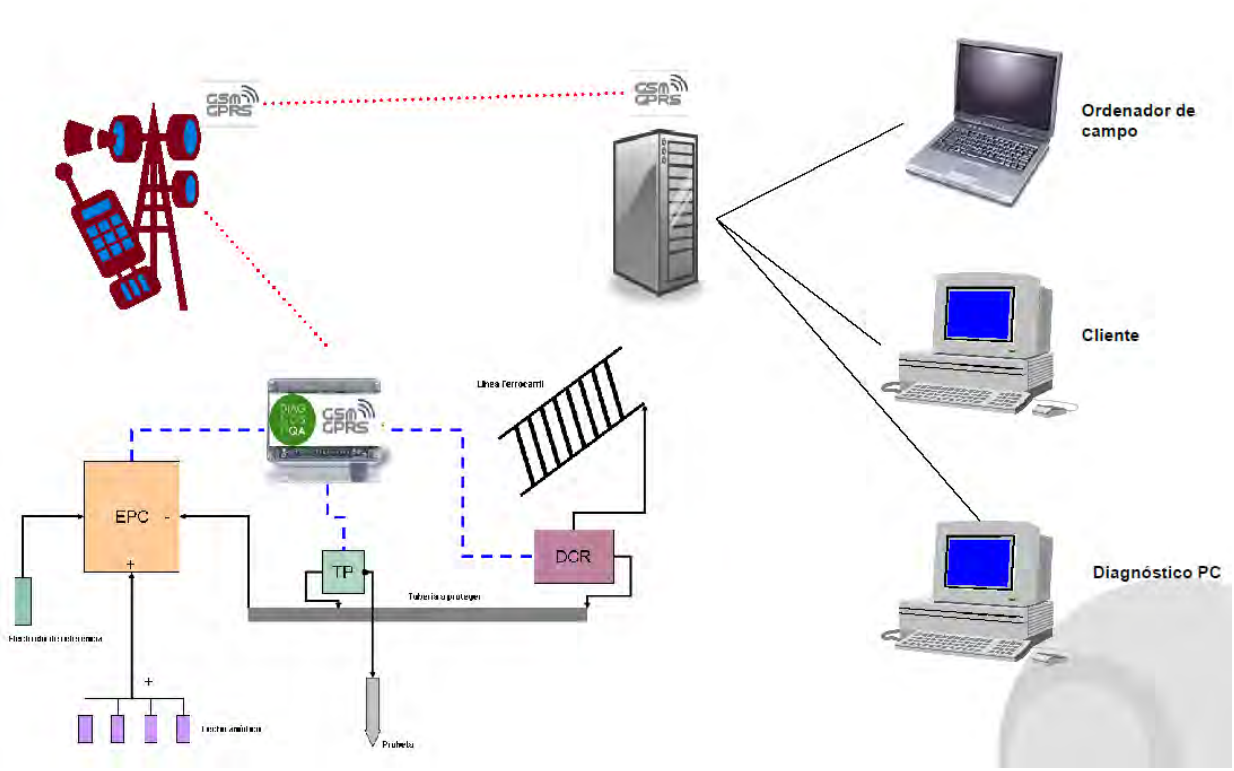


Imagen 2.2.1.1.5. Esquema de la arquitectura del sistema de televigilancia. Esquema confeccionado y cedido por DiagnostiQA (sistema HADES)

El sistema está diseñado para leer y/o registrar en los siguientes elementos y con el siguiente alcance:

EPC´S

parámetros	frecuencia	duración	intervalo
Tensión de salida	diaria	24 horas	1 medida / segundo
Intensidad de salida	diaria	24 horas	1 medida / segundo
Potencial de Referencia	diaria	24 horas	1 medida / segundo
Potencial CA ~	diaria	24 horas	1 medida / segundo

El objetivo fundamental de este modo de funcionamiento es controlar de manera constante el estado de funcionamiento del equipo, posibilitando una resolución más inmediata en caso de anomalía.
Además, se contempla además la posibilidad de telecontrolar la EPC remotamente.

TPS´S Vigilancia

parámetros	frecuencia	duración	franja horaria	intervalo
Potencial ON	Semanal	10 minutos	Crítica. según instalación	1 medida / 1 segundo
Potencial CA ~	Semanal	10 minutos	Crítica. según instalación	1 medida / 1 segundo
Potencial ON-OFF	Semanal	10 minutos	Crítica. según instalación	1 medida / 1 segundo
Intensidad de polarización	Semanal	10 minutos	Crítica. según instalación	1 medida / 1 segundo

En este modo conseguiremos:

Vigilar de manera constante el correcto funcionamiento del sistema de Protección Catódica instalado.
Evaluar el estado actual de la protección catódica y, si se precisa, compararlo con anteriores controles.
Desechar posibles anomalías graves en el sistema.

El datalogger irá instalado preferentemente en los puntos de control donde se tengan instalados electrodos-probeta. Estos dispositivos suelen estar ubicados en las partes de la instalación que más información aportan y son la referencia del comportamiento del sistema de protección catódica.

TPS´S Exhaustiva

parámetros	frecuencias	Duración	intervalos
Potencial ON-OFF	semestral	24 horas	2 medidas / segundo a 30 medidas / segundo
Intensidad de polarización	semestral	24 horas	2 medidas / segundo a 30 medidas / segundo

Los objetivos fundamentales de este modo de funcionamiento son:

Conocer el potencial real de protección en base a la curva de despolarización
Conocer la densidad de corriente de polarización.

Con el resultado del análisis de todos estos datos se obtendrán las posibles acciones a realizar para garantizar un sistema de protección catódica realmente eficaz.

Transmisión de datos y Alarmas: Se realizan mediante GSM / GPRS o bien por mensajes cortos (SMS), dependiendo del volumen de datos a transmitir.

Almacenamiento de información: El equipo dispone de la capacidad de almacenar en memoria interna la configuración establecida, límites de las alarmas, canales activos e intervalos entre las medidas a realizar en cada momento. Así mismo, todos los datos y las alarmas adquiridas son guardadas durante el tiempo suficiente para su posterior envío en caso de que se produjera cualquier anomalía en la red GSM/GPRS.

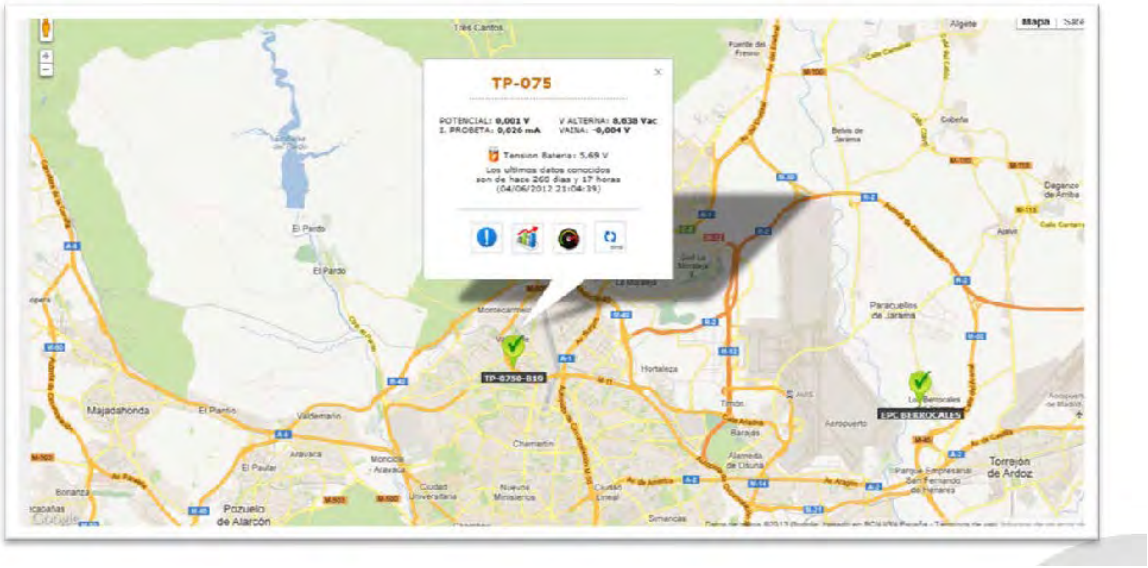


Imagen 2.2.1.1.6. Ejemplo de la apariencia del software de gestión con pantalla de geo-referenciación de las estaciones remotas. Visualización de valores actuales, acceso directo a alarmas, datos adquiridos y datos en tiempo real. Cedido por DiagnostiQA (sistema HADES).

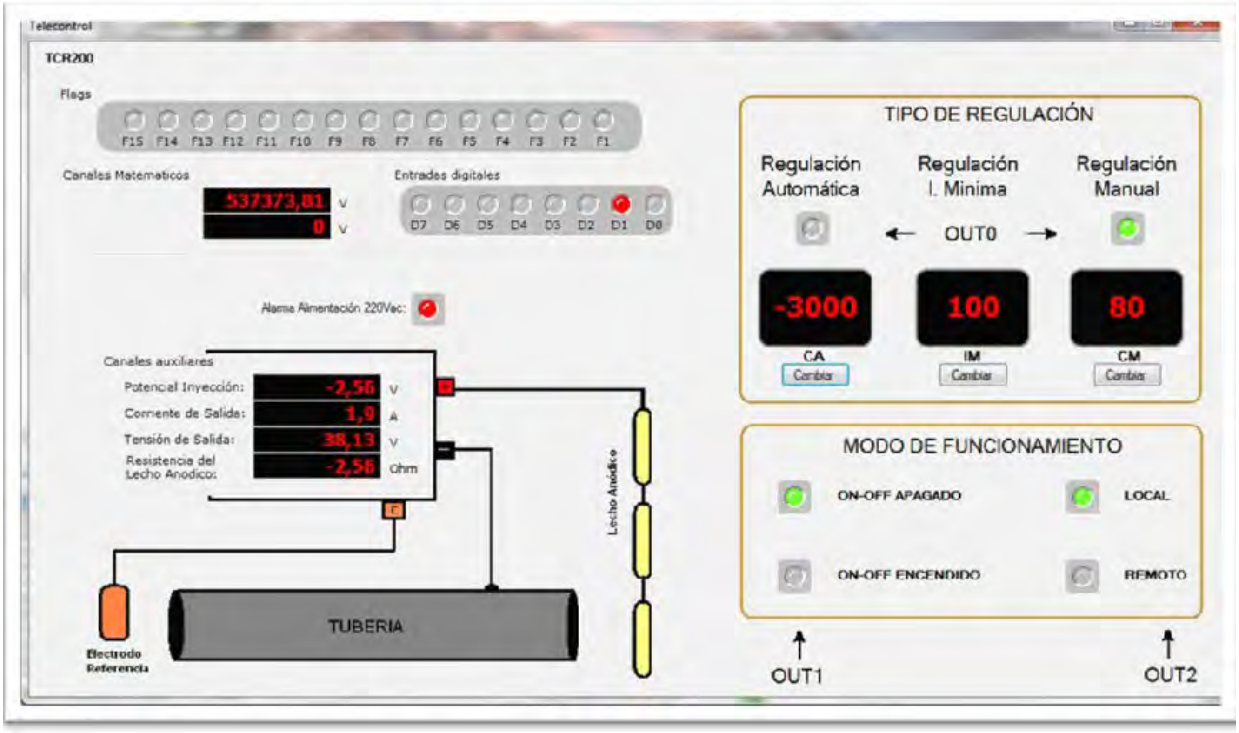


Imagen 2.2.1.1.7. Pantalla de telecontrol, donde se pueden modificar los modos de funcionamiento y los parámetros de salida de las estaciones de protección catódica (EPC), así como visualizar en tiempo real los valores obtenidos. Cedido por DiagnostiQA (sistema HADES).

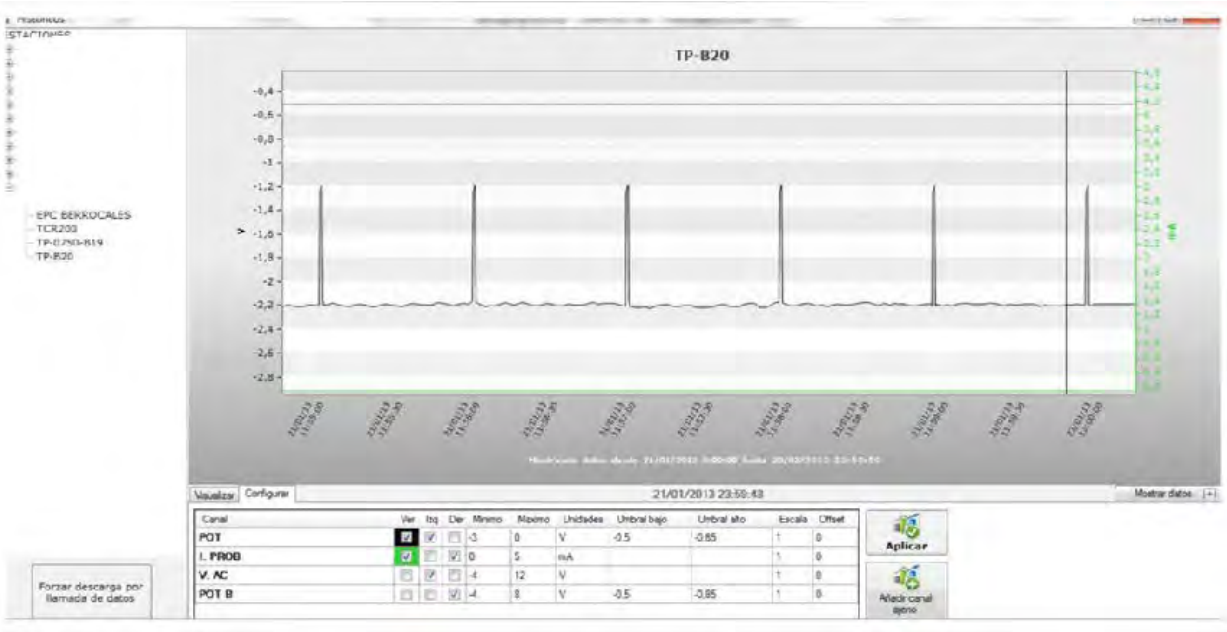


Imagen 2.2.1.1.8. Pantalla de gestión de datos y configuración de gráficos. Toda la información recibida se representa de forma gráfica o en tablas Excel para su análisis. La gestión de gráficos es personalizable, con configuración para "usuarios". Cedido por DiagnostiQA (sistema HADES).

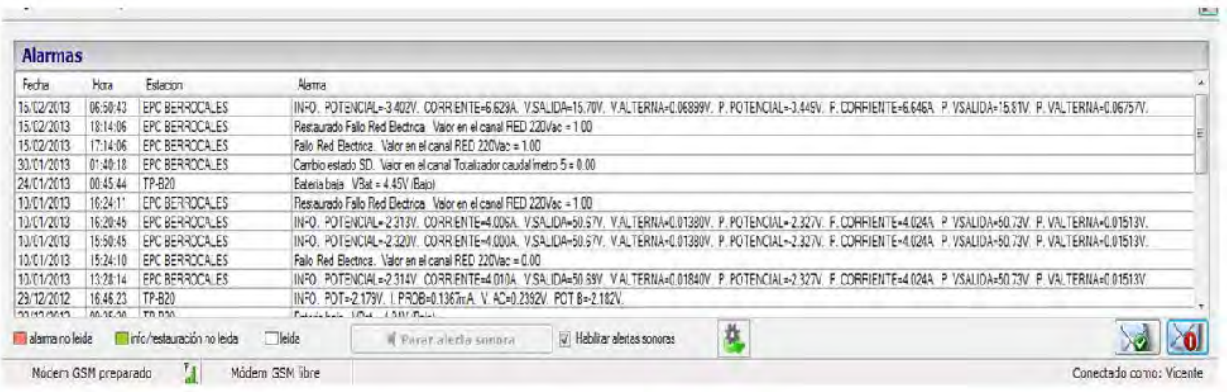


Imagen 2.2.1.1.9. Pantalla de información sobre alarmas generadas en el sistema (el sistema gestiona en automático las alarmas, permite un reenvío de las mismas según configuración (usuarios, franjas horarias, números telefónicos), así como el uso de mensajería corta (SMS), correo electrónico o llamada de voz. Cedido por DiagnostiQA (sistema HADES).

2.2.2. MONITORIZACIÓN EN CONTINUO DE LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS

En áreas donde se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas, es habitual encontrar niveles de nitratos próximos o por encima de 50 mg/l como consecuencia de los aportes de fertilizantes en escorrentías y/o lixiviados que acaban afectando a las captaciones de aguas superficiales y subterráneas. Con objeto de que el agua de consumo humano a suministrar se encuentre dentro de los valores máximos admitidos en el Real Decreto 3/2023, una de las soluciones más empleadas es realizar diluciones con aguas captadas en fuentes alternativas, las cuáles, en origen, tengan una concentración de nitratos reducida.

Por este motivo es imprescindible disponer de la tecnología adecuada que permita monitorizar con precisión y en continuo la concentración de nitratos para automatizar el proceso de mezcla en función de la concentración de nitratos final. Además, se podrán optimizar los costes de producción, ya que es posible calcular en todo momento el volumen máximo de agua a emplear procedente de la fuente de origen más económica a la hora de realizar la dilución.



AquaMonitrix es un sistema fiable y preciso para la monitorización de Nitratos que está basado en una técnica de laboratorio adaptado a campo. El analizador combina la cromatografía iónica rápida y una novedosa tecnología de detección óptica patentada que ofrece una medición en tiempo real en campo con una exactitud de laboratorio. Gracias a su capacidad de detección en un amplio rango analítico, lo hace adecuado para aplicaciones ambientales, agua dulce e incluso aguas residuales con pocos requerimientos de mantenimiento gracias a su bajo potencial de bio-incrustación y obstrucción. Además, debido a la técnica empleada, AquaMonitrix no requiere de calibraciones rutinarias, sino que es completamente estable en despliegues prolongados e incluso cuando el analizador se traslada a una nueva locación o matriz de muestra.

El analizador tan sólo requiere rellenar un pequeño volumen de eluyente (cloruro sódico) con una periodicidad que dependerá de la frecuencia de muestreo, aunque en la mayoría de los casos puede permanecer desatendido por periodos de 6 meses.

Otras características técnicas:

- Tecnología de análisis: cromatografía iónica y detección óptica
- Intervalo mínimo de muestreo: 15 minutos
- Exactitud: > 99% (agua dulce) 90% (aguas residuales sépticas)
- Precisión 95%
- Rango analítico:

Nitrato: 0,6 - 500 mg/L como NO3 (0,14 a 113 mg/L como N)

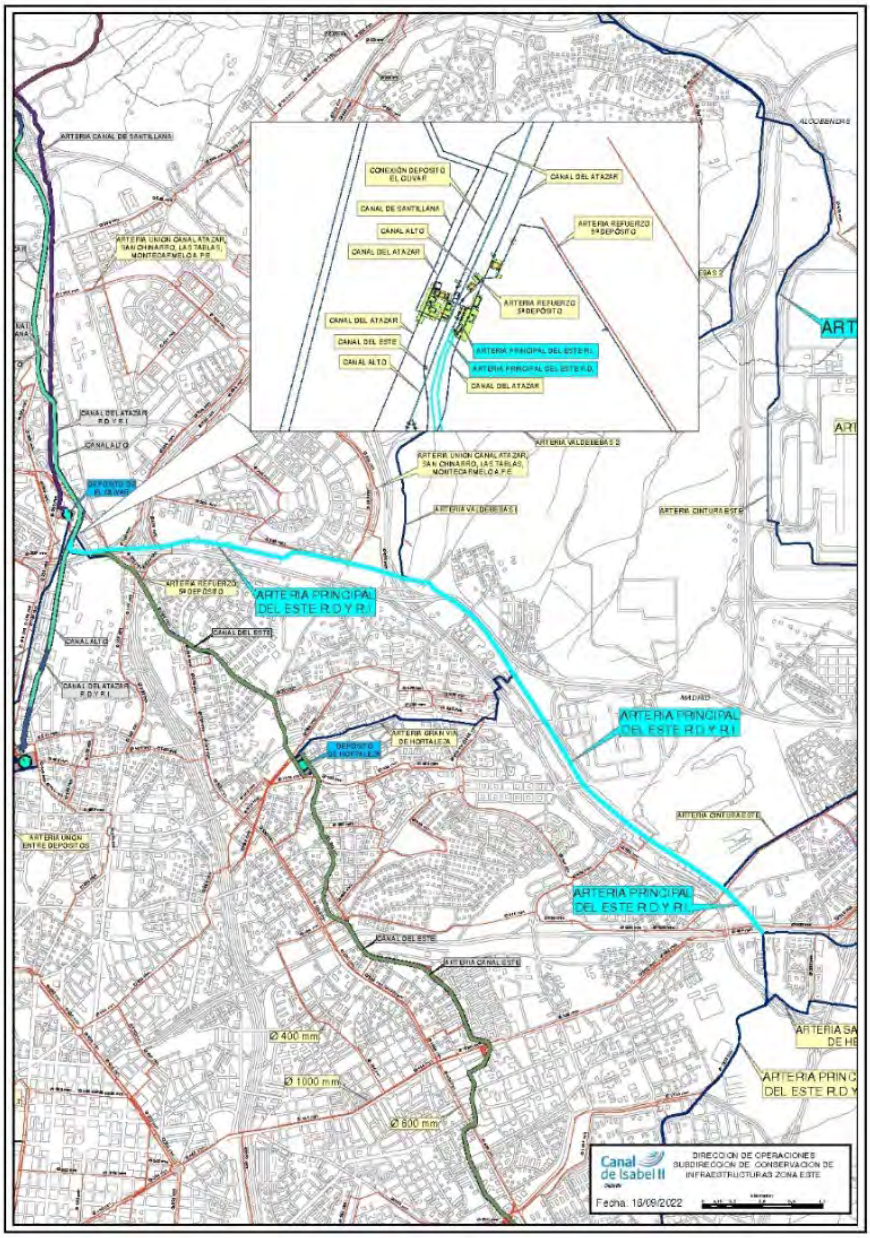
Nitrito: 0,05 - 100 mg/L como NO2-(0,01 a 23 mg/L como N)

2.2.3. CASO PRÁCTICO: INSTALACIÓN DE SENSORES ACÚSTICOS EN LA ARTERIA PRINCIPAL DEL ESTE (CANAL DE ISABEL II)

La Arteria Principal del Este tiene una longitud de 34,5 km y nace en el Nudo del Olivar donde confluyen la Arteria Canal de Santillana y el Canal del Atazar. Cuenta con doble tubular de diámetro unitario de 1600 mm y tiene como destino final la Arteria 1ª Cintura Sur. En su recorrido hacia el sureste, presenta las siguientes conexiones, derivaciones y singularidades:

- Conexión DN800 con la Arteria SANCHINARRO/LAS TABLAS/MONTECARMELO-CONEXIÓN CON ARTERIA PRINCIPAL DEL ESTE.
- Conexión DN1000 con la Arteria Valdebebas I
- Conexión DN1250 con la Arteria Cintura Este
- Tramo en DN600 y DN900 de refuerzo a su paso por el parque Juan Carlos I, Parque el Capricho y cruce de la Nacional A-2.
- Derivación DN900 para la Arteria Torrejón de Ardoz
- Conexión con la Arteria de San Fernando (DN1600) (justo después del cruce de la Arteria Principal del Este por la M-40 y vía de Ferrocarril).
- Derivación DN500 para la red de distribución de Vicálvaro.
- Derivación DN800 (Arteria Moratalaz)
- Derivación DN1000 y DN 800 para la ARTERIA BERROCALES, LOS-UNION A.P.E.-DEPOSITO VALLECAS
- Derivación DN1000 ARTERIA CERRO ALMODOVAR - ELEVADORA DE VELILLA DE SAN ANTONIO
- Destino final ARTERIA 1ª A. CINTURA SUR (2 x Ø1600 mm)

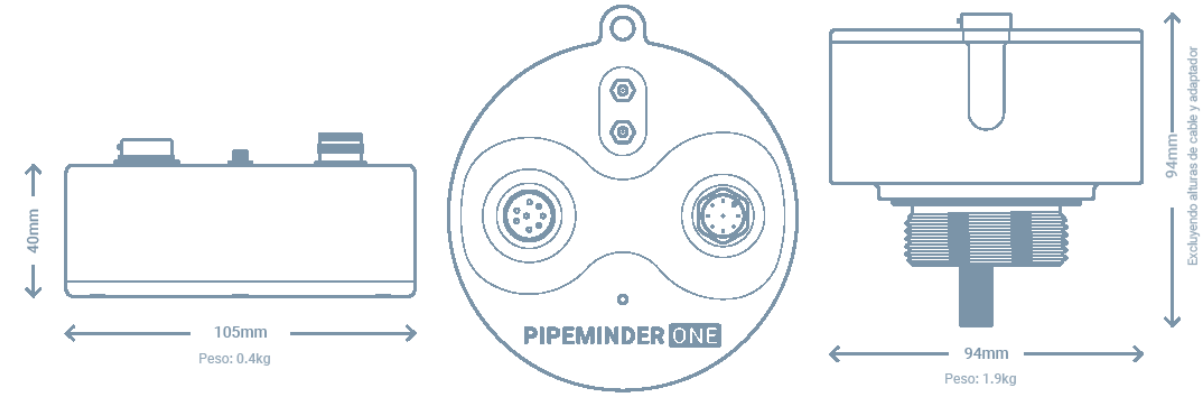
Por tanto, se trata de una conducción critica para el sistema de abastecimiento de la Zona Este de la Comunidad de Madrid.



Plano 1. Arteria Principal del Este

Se ha llevado a cabo la instalación de sensores acústicos en el trazo de dicha Arteria. Los sensores elegidos son el modelo PIPEMINDE ONE, de la empresa Mejoras Energéticas, cuyas especificaciones técnicas se adjuntan a continuación:

ESPECIFICACIONES (VERSIÓN SENSOR ACÚSTICO)



Temperaturas de operación	-20°C to +65°C (la expansión del agua helada por debajo de 0°C dañará el sensor)
Red / SIM	4G/3G/2G tarjeta SIM integrada
Sensor de presión	Externo, rango absoluto de 0-20 bar, 128S/s, ±0,25% de precisión
Conexión	Conexión de rosca paralela 1½" BSP, adaptadores disponibles (tamaños comunes de adaptadores: 1½" BSP paralelo / 1½" BSP cónico / 2½" BSP paralelo
Materiales	Carcasa de acetal, cabezal del sensor de acero inoxidable 316L, clasificación IP68
Antena	Conexión 4G SMA, conexión GPS SMA (varias antenas externas de telefonía móvil y GPS disponibles)
Batería / Potencia	Elección de pilas recargables / de un solo uso (adaptadores de corriente / solares disponibles)
GPS / Reloj	Sincronización periódica de la hora y la ubicación por GPS (se requiere una señal GPS continua para las capturas acústicas)

Se han realizado la instalación de estos sensores en tres tipos de elementos:

- Entradas de hombre: Cambiando la brida por una brida con picaje de 1,5”
- Ventosas: Se instala el picaje en el propio purgador de la ventosa
- Desagües: Se instala picaje en T con brida ciega

La instalación consta de 4 elementos:

- Sensor Acústico: Instalado lo más próximo posible a la conducción
- Registrador: Ubicado a una distancia máxima de 10 m del sensor acústico. A este elemento se conectan las antenas, la batería y el sensor.
- Baterías: Duración estimada de 9 meses, en función de la conexión de la zona.
- Antenas: Ubicada a una distancia máxima de 10 m del Registrador. Se instalan 2 antenas, 1 para GPS y otra para transmisión de datos. Las antenas han de estar ubicadas en el exterior de las cámaras.

Los **condicionantes** que se han tenido en cuenta durante la instalación han sido:

Para un análisis acústico eficiente, la **distancia máxima entre sensores es de 200 m**. En este caso se han instalado un total de 14 sensores por cada rama.



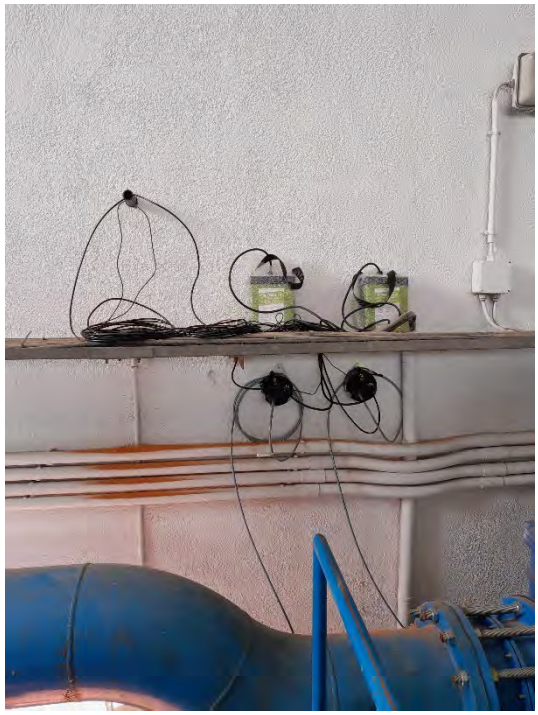


Imagen 2.2.3.1. A la izquierda, detalle de caja para instalación en exterior de antenas. A la derecha registradores y sus baterías.



Imagen 2.2.3.2. A la izquierda detalle del registrador y a la derecha detalle del sensor acústico instalado.

2.2.4. CASO PRÁCTICO: INSTALACIÓN DE EQUIPOS DE MONITORIZACIÓN EN CONTINUO EN LA ARTERIA DE MIRAFLORES A SOTO DEL REAL (CANAL DE ISABEL II).

Desde Canal de Isabel II se propuso la instalación de 10 equipos de monitorización en continuo en la arteria que va de Miraflores a Soto del Real, y la instalación de 1 equipo para la monitorización de la calidad de agua de la dicha red de distribución. Entre los meses de diciembre de 2023 y enero de 2024 se realiza la instalación de los 10 equipos de monitorización en continuo Permanet HY, de la empresa suministradora Mejoras Energéticas.

Estos equipos llevan un sistema hidro acústico autónomo que combina un sensor Hidrófono de alto rendimiento y un Registrador de Datos Avanzado para la detección remota de fugas y la monitorización continua de redes de transporte de agua.

El equipo está compuesto de:

- Sensor hidrófono de altas prestaciones
- Transductor de presión interno de altas prestaciones 25 Hz para estudio de transitorios de
- presión
- Sistema de sincronización mediante módulo GPS integrado y antena exterior
- Entrada MODBUS para la monitorización de la calidad del agua AKWAMETRIC

Estos equipos, las unidades PermaNET HY pueden ser configuradas para trabajar en modo "Monitorización TM" o "Detección PermaNET"

- Monitorización TM - Monitorización continua programable del ruido y grabación de sonido con autocorrelación remota cuando una fuga es detectada
- Detección PERMANET - Análisis nocturno mediante Algoritmo de análisis del nivel ruido/dispersión y grabación de sonido con autocorrelación remota cuando la fuga es detectada.

Características destacables:

Sensor Hydro 2:

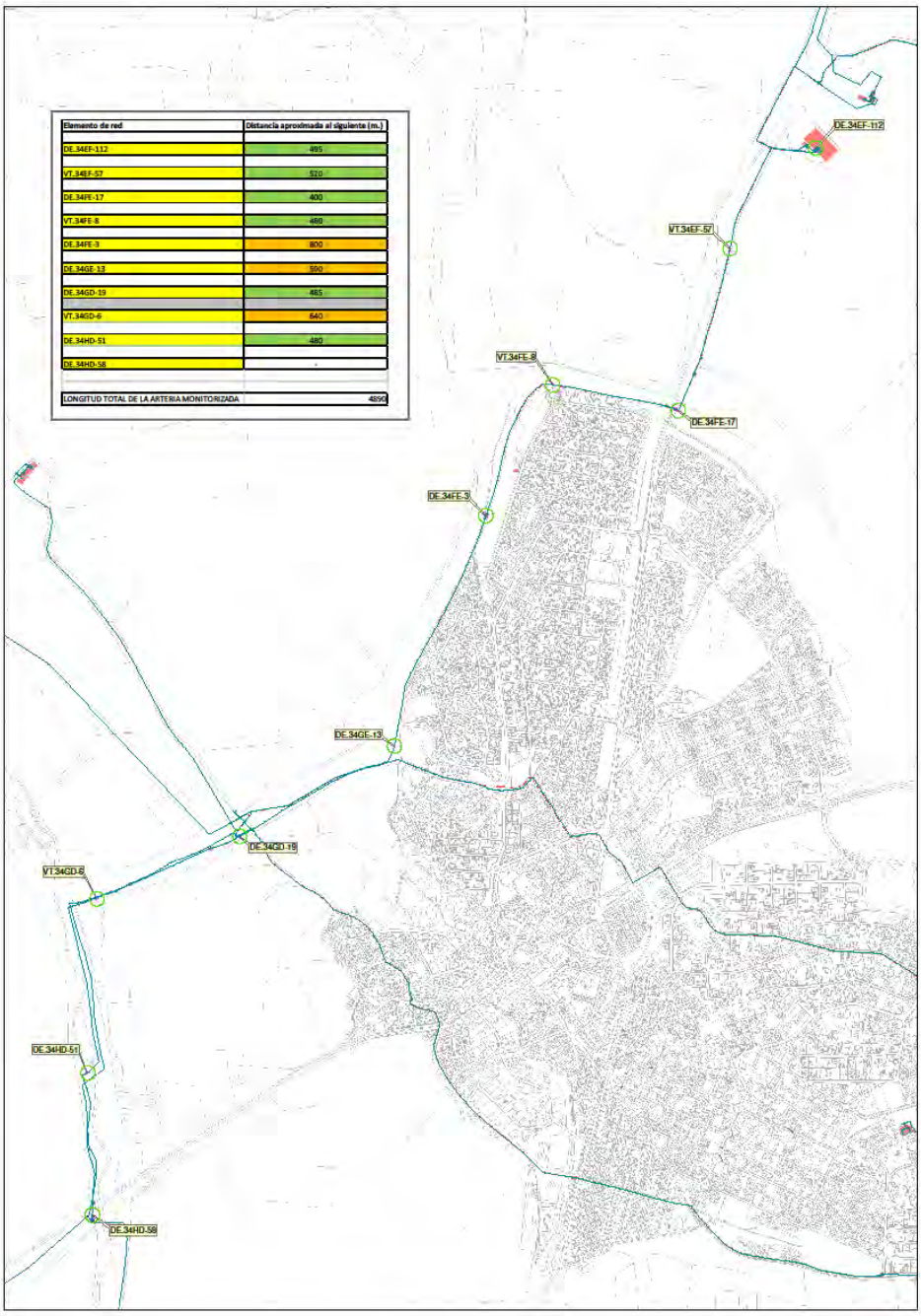
- Alojamiento robusto IP68 con rosca 1 1/2 " de fácil instalación
- Sensor Hidrófono de alta sensibilidad con amplificador de ruido
- Conector militar para la conexión al registrador y enchufe rápido para la toma de presión

Registrador de Datos:

- Registro y monitorización de los niveles de ruido y grabación de sonidos
- Modem interno NB-IoT/LTE para el envío de los datos y alarmas
- Sensor de presión interno a 25 Hz con gráficas envolventes de máximas, medias y mínimas y funcionalidad de detección automática de golpes de ariete (transitorios de presión)
- Sincronización avanzada por GPS, para precisiones en distancias largas de correlación. – Batería interna reemplazable de gran autonomía para todo el conjunto
- Alojamiento metálico estanco IP68

Además, se instalación de un equipo autónomo de registro y de monitorización de la calidad del agua, de la empresa suministradora Mejoras Energéticas. El sistema, llamado akwaMetric, SECTORIZACIÓN SMART 4.0, que podría registrar hasta 16 parámetros, mediante sistema modular, Nodos de bajo consumo y logger avanzando de sectorización. Este sistema está basado en la plataforma Multilog® 2, que además de la monitorización de la calidad del agua, permite el control de los sectores hidráulicos al incorporar registro de caudal y un sensor interno de presión 25Hz con monitorización de transitorios, así como comunicaciones IoT 2G/3G

Mediante este sistema se registra cloro libre, temperatura, turbidez, cloro combinado, caudal y presión con un sistema compuesto de nodos que son analizadores y sensores Smart completamente digitales alojado en un cuerpo miniaturizado con funciones integradas de calibración y autodiagnóstico.



Plano 2. Detalle de la conducción y ubicaciones elegidas para la instalación de la monitorización en continuo



Imagen 2.2.4.1. Detalle de dos de las ubicaciones elegidas para la instalación de los equipos de monitorización en continuo de transitorios en la red. Sistema Permanet HY.



Imagen 2.2.4.2. A la izquierda detalle del registrado que se fija en pared y a la derecha detalle del hidrófono que queda instalado sobre elemento de la conducción.



Imagen 2.2.4.3. Ejemplo de estación akwametric para la medida en continuo de parámetros de calidad.

2.2.5. CASO PRÁCTICO: EXPERIENCIA DE EMASA EN LA MONITORIZACIÓN DE REDES ENFOCADO A LA DETECCIÓN DE FUGAS.

La experiencia de EMASA (Empresa Municipal Aguas de Málaga, S.A) en el seguimiento de redes de agua potable mediante su sensorización se remonta a 2005 cuando se finalizó el despliegue del proyecto de sectorización de estas a través del "Plan Control Redes Málaga III".

Este plan pretendía mejorar los objetivos en cuanto a la reducción del agua no registrada (ANR), y en el apartado de la eliminación de fugas, mejorar los objetivos que se podían alcanzar sólo con una revisión sistemática con métodos electroacústicos.

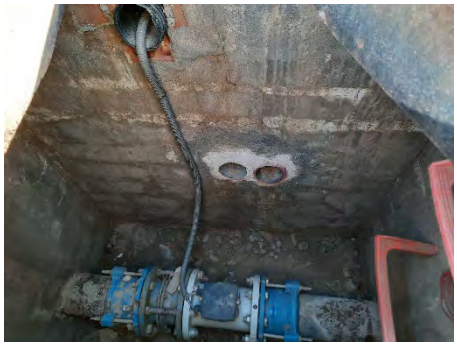
La medición y el seguimiento de caudales y presiones permite detectar aquellas zonas/sectores donde será más eficiente la búsqueda de fugas (búsqueda activa de fugas por estudio de CMN). Además, estos datos juntos con los consumos de las acometidas y contadores permiten la realización de balances hidráulicos, que además ayuden en la reducción de las pérdidas aparentes (errores de medida de los contadores o el fraude).

En la actualidad es indispensable la monitorización para poder realizar una completa y moderna gestión de los activos.

El despliegue de cualquier sistema de sensorización requiere conocimientos tanto en la utilización adecuada de sensores y su correcta instalación, como de sistemas de comunicaciones, empleo de concentradores, servidores de recogida de información, etc.…, sin olvidar la importancia de la obra civil con la instalación de arquetas, pozos, armarios, recintos, etc.…, así como de las condiciones de las ubicaciones donde se emplazan, que afectan en aspectos tan importantes como el suministro de energía (desde la red eléctrica, baterías, microturbinas, paneles solares, alimentación discontinua mediante sistemas de alumbrado público, etc.).







En el caso de la medida de caudal, EMASA ha utilizado caudalímetros electromagnéticos con alimentación eléctrica y dotados con baterías de respaldo para todos los puntos de medición principales en los sectores en que se ha dividido la red y en su red arterial, siendo este tipo de equipos la base de su medida en toda la red.

Como requisito a dichos equipos de medida de caudal, se les ha exigido la posibilidad de testear y verificar su funcionamiento en campo, sin ser necesario su desmontaje y traslado a bancos de ensayos, siendo esto una característica indispensable para un sistema de medición fiable. Dicha función es posible gracias a la comparación de los distintos parámetros eléctricos/electrónicos medidos en campo con equipos de testeo con los mismos datos grabados en la memoria interna del equipo tras su calibrado inicial en el proceso de fabricación.

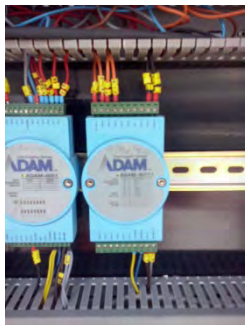


De forma menos frecuente, por adaptación a la singularidad de los puntos de instalación también se han utilizado otros tipos de equipos de medida de caudal, como son los caudalímetros de inserción (mecánicos en su inicio y electromagnéticos después) o los caudalímetros no invasivos de ultrasonidos, principalmente en redes de transporte o en alta, de grandes diámetros donde no ha sido factible la interrupción de la tubería para intercalar el equipo de medida, los cuales ofrecen una inferior confianza en el valor medido pero una gran agilidad en su instalación.

En la actualidad, para diámetros menores, y en la última fase del proyecto de la sectorización, normalmente hasta DN150, se están instalando con éxito caudalímetros ultrasónicos de tiempo de tránsito y autónomos por alimentación con baterías, que ofrecen una gran precisión y versatilidad dado que existen equipos que incorporan incluso sistemas de comunicación integrados. No se descarta el empleo en diámetros mayores a la espera de ver la robustez de los equipos ante la agresión en el tiempo del agua a los sensores de medida y la durabilidad de las baterías cuando se realiza una interrogación intensiva de información en el proceso de telemedida.

Además, para la comunicación de la información adquirida desde los puntos de control de la red hasta los servidores centrales, se desarrolló una estación remota de propósito general y de bajo coste, tanto de telemedida de cualquier tipo de sensor como de maniobra y telecontrol de dispositivos actuadores, que se alojó en un PC embebido y dotado de módulos de adquisición ADAM funcionando con protocolo MODBUS, habiéndose implementado también funcionalidades que permiten de forma transparente al servidor, la interrogación y visualización de datos en tiempo real atacando directamente a las remotas, así como la actualización del software de las estaciones. Se dotó al sistema de comunicaciones inalámbricas múltiple (desde sistemas radio a sistemas 4G) para dar soporte tanto a la lectura de caudales y presiones, como la configuración remota de los mismos y al tratamiento de alarmas e históricos. Todo ello respaldado con baterías para disponer de un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI)



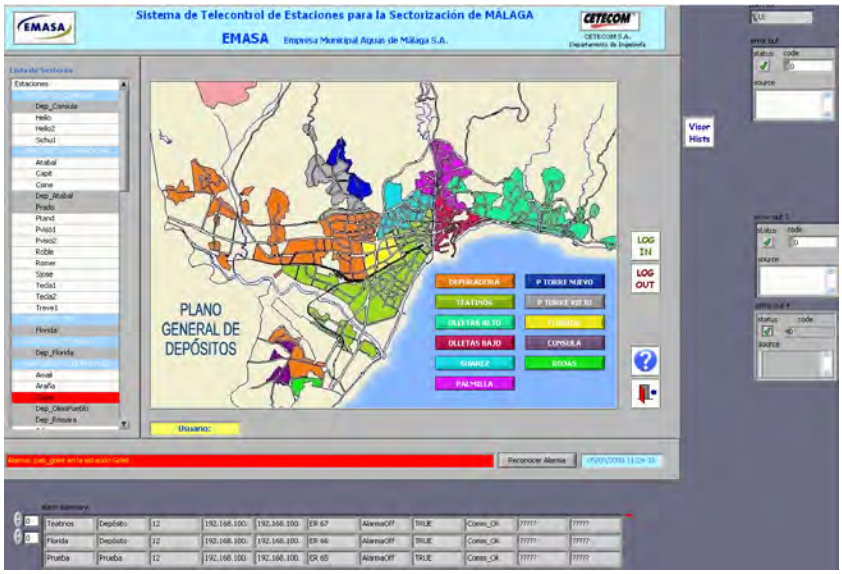


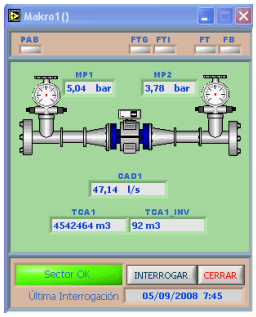




La capacidad de estas estaciones remotas permite también, sin coste adicional salvo el del sensor, la adquisición de señales adicionales para el análisis de la calidad del agua en las redes, el accionamiento de válvulas motorizadas y el control avanzado de válvulas automáticas dotadas de pilotos hidráulicos equipados con motores paso a paso. Se han diseñado funcionalidades específicas de control de válvulas reductoras de presión necesarias en la gestión de presiones en la red.

Además de la instalación de la sensorización, EMASA desarrolló un sistema Scada propio de bajo coste, basado en sistemas abiertos no propietarios y herramientas de programación gráfica (Labview, hoy en día migrándose a desarrollos con Python).





Además de la medición de caudal, en la reducción de pérdidas juega un papel esencial el control de niveles de presión adecuados, siendo fundamental el establecimiento de puntos de control estratégicos para el chequeo on-line de los niveles de presión de cada sector, y puntos de control de presiones mediante regulación dinámica, si bien en Málaga, debido a la distribución de sus redes y la orografía de la ciudad, tiene bastantes limitaciones de aplicación con respecto a otras ciudades.



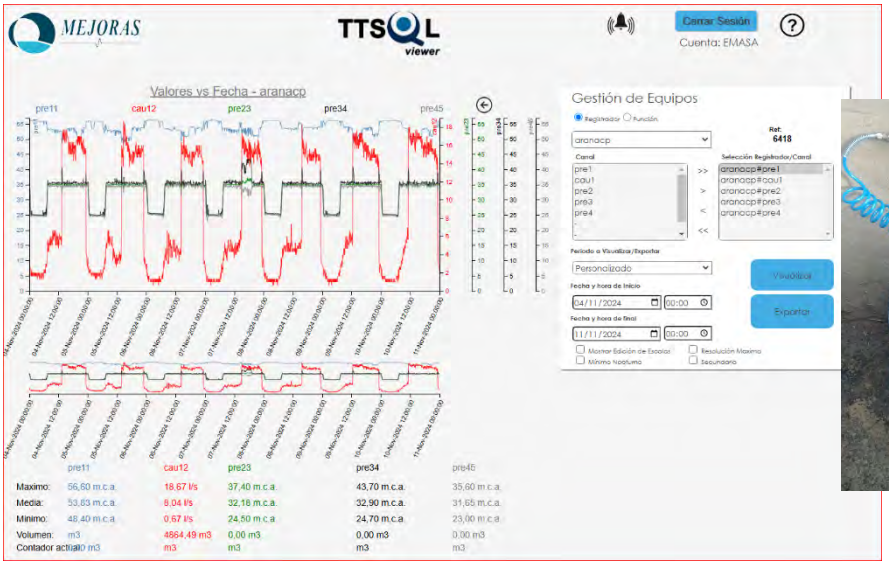




A pesar de ello, con motivo del plan de actuaciones contra la sequía, se está realizando en la actualidad un despliegue masivo en gran parte de la ciudad de válvulas automáticas pilotadas para el control de presiones, siendo necesario acompañar de una micro sectorización orientada a estratos de niveles de presión.



Para agilizar su puesta en servicio a través del Scada, se ha optado por la conexión de dispositivos Pegasus que permiten inmediatamente su control remoto tras la instalación de la válvula de control reguladora en la red, sirviendo la plataforma web del fabricante además como punto de enlace con los sistemas repositorios de información del sistema de control de EMASA.





Pero no se acaba todo cuando se instalan los sensores y se recibe la información en los servidores. Tras la puesta en marcha de la sectorización y ya en los inicios de la explotación de la información facilitada por los sistemas SCADA, se detectó rápidamente la necesidad de disponer de herramientas informáticas muy potentes y específicas para la gestión de tan variada y elevada cantidad de información.

Si además se pretende integrar esta información con otra de distinta naturaleza, tanto en su forma de captura como en su tratamiento, como son las lecturas de los contadores hasta la fecha enfocadas para uso exclusivo en facturación, resulta inviable su análisis sin las citadas herramientas.

Esas herramientas deben desarrollarse en paralelo e integrarse con los sistemas principales, de forma que no interfieran en la misión principal de los sistemas SCADA generales y sistemas de lectura y facturación de las empresas, máxime cuando éstos tratan áreas de responsabilidad crítica, y a su vez sin que esto suponga limitación al análisis.

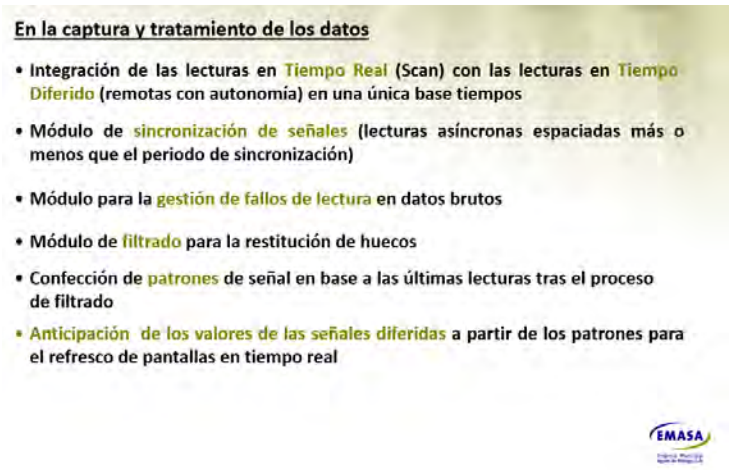
Como acciones básicas de administración de los datos, además de los habituales almacenamientos y copias de respaldo, hay que verificar que llegan todas las señales con la frecuencia y valores válidos, hay que preparar mecanismos para sincronizarlas de forma que permita su comparación, hay que preparar mecanismos para rellenar con datos estimados la ausencia de información por incidencias en los sistemas, hay que tener potentes visualizadores con agilidad para tratar multitud de señales de amplitudes distintas y de gestionar rangos temporales muy dispares, desde largos periodos para analizar las tendencias (suele requerir una regeneración de la información en forma de series con una frecuencia más baja que la de captura, para que los visualizadores sean ágiles), como cortos periodos para analizar incluso transitorios.

Y como análisis avanzados más significativos hay que entrar en balances hidráulicos, en la determinación de patrones o en la predicción de demandas.

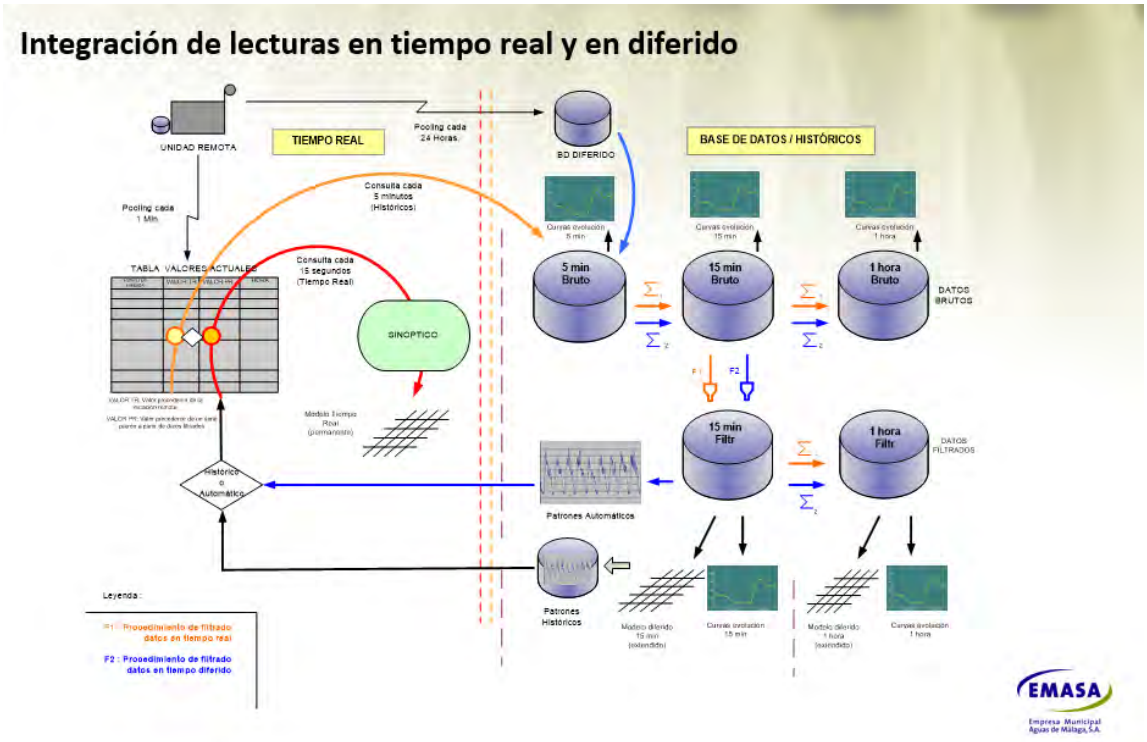
Así pues, en diciembre de 2006 se inició un ambicioso proyecto para la “Gestión Informatizada del Agua Inyectada y Registrada en la Red Sectorizada de Málaga”. Durante 2007 y 2008 se desarrollaron en colaboración con el Grupo REDHISP del IIAMA de la Universidad Politécnica de Valencia tres herramientas informáticas denominadas GisRedPro, Scared y Análisis de Scared.

Con dichas herramientas se realizaban las funcionalidades y análisis anteriormente comentados:

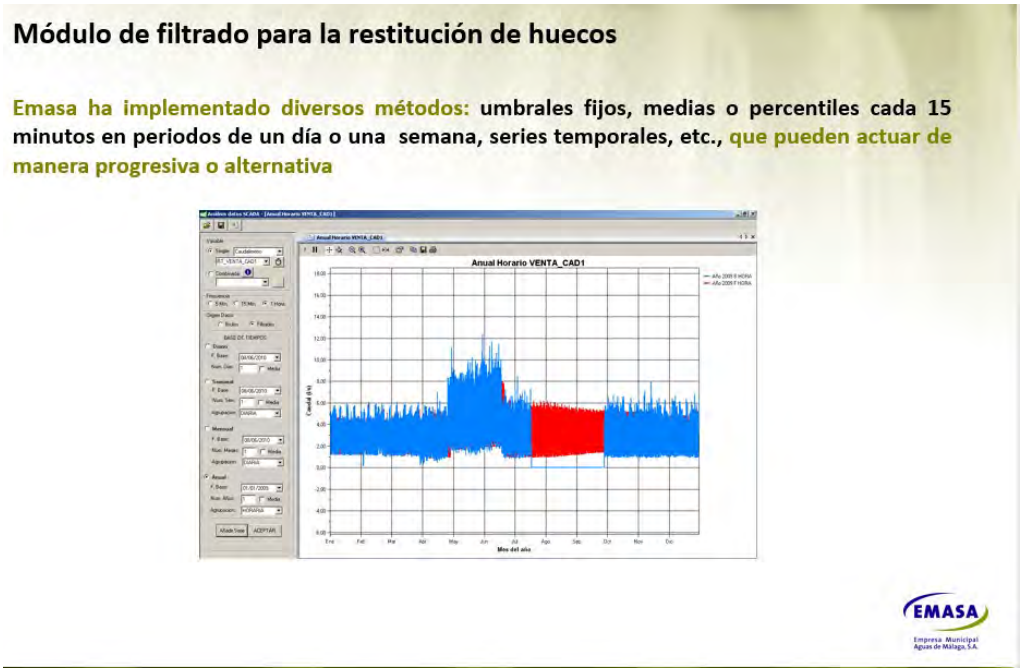
- ✓ **Procesos asociados a la captura de información:**



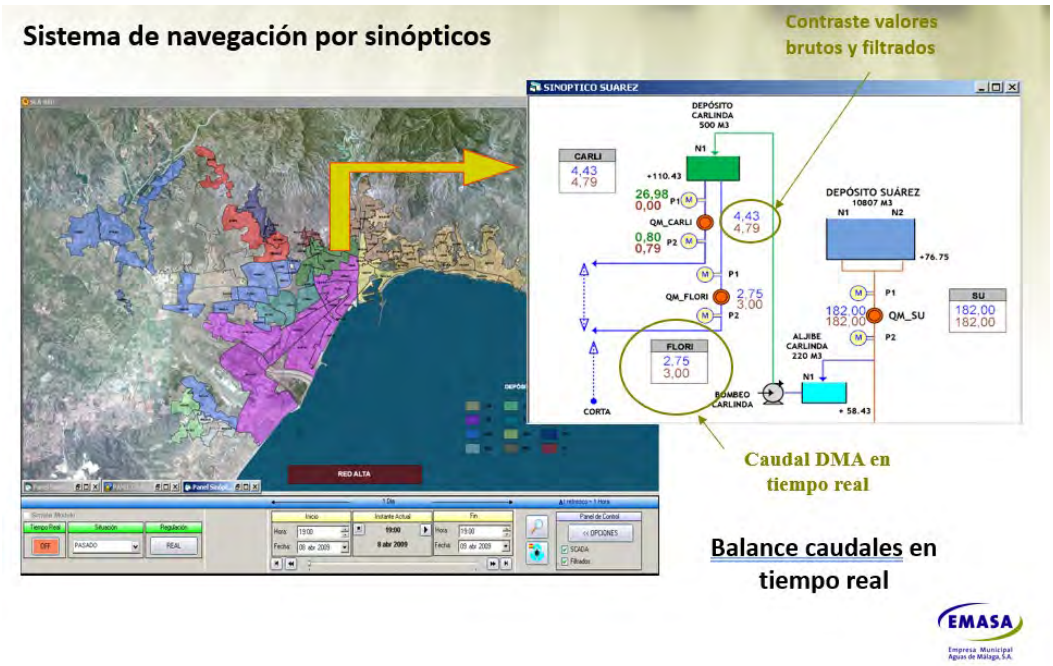
✓ **Manejo de una estructura de datos compleja:**

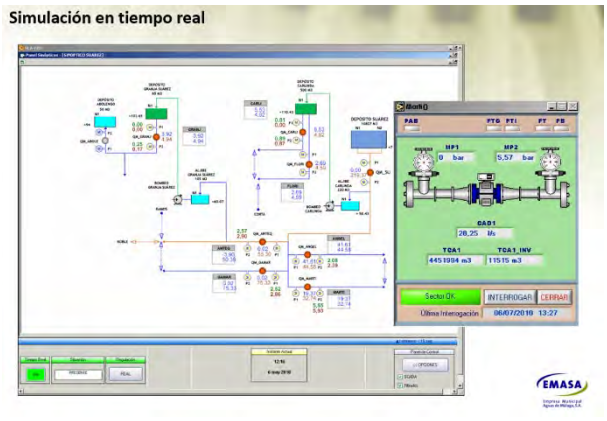


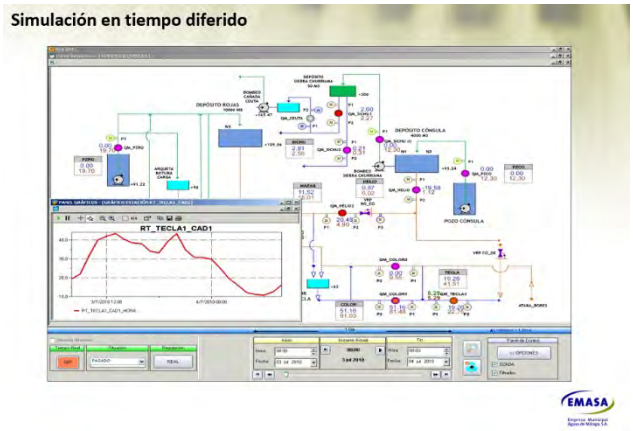
✓ **Filtrado de información:**



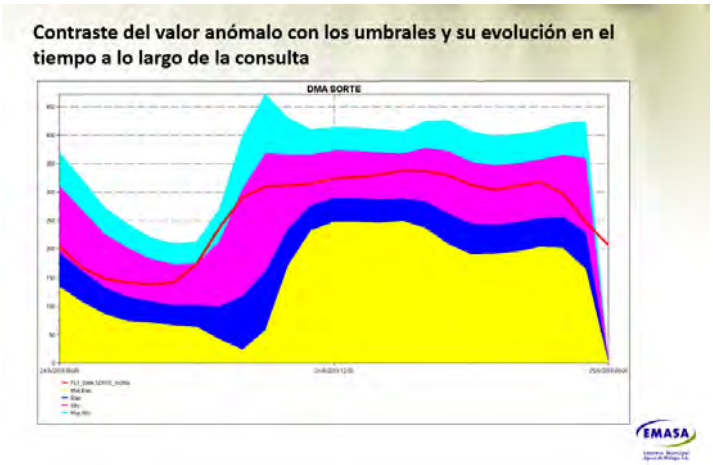
✓ **Manejo de sinópticos en tiempo real y en tiempo diferido:**



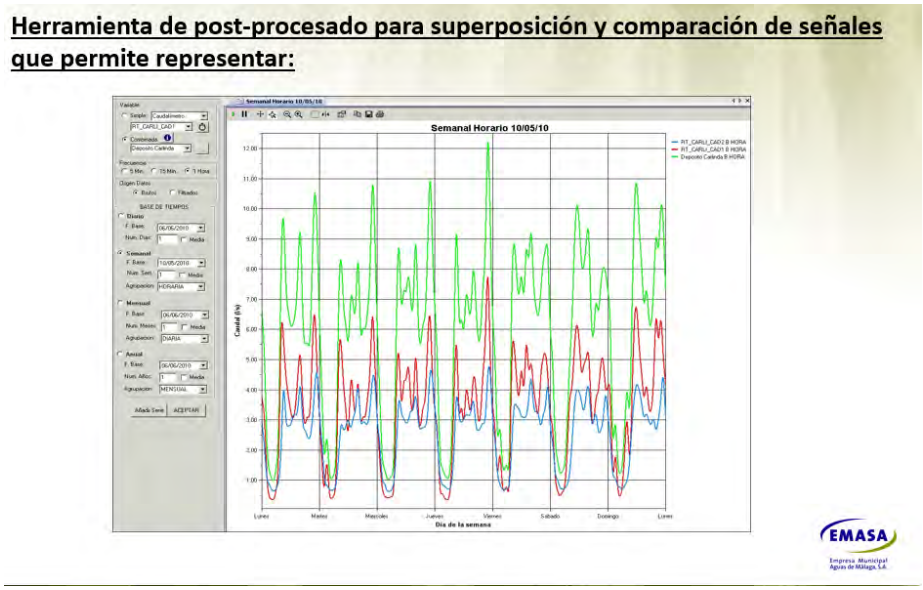




✓ **Elaboración de patrones de funcionamiento:**



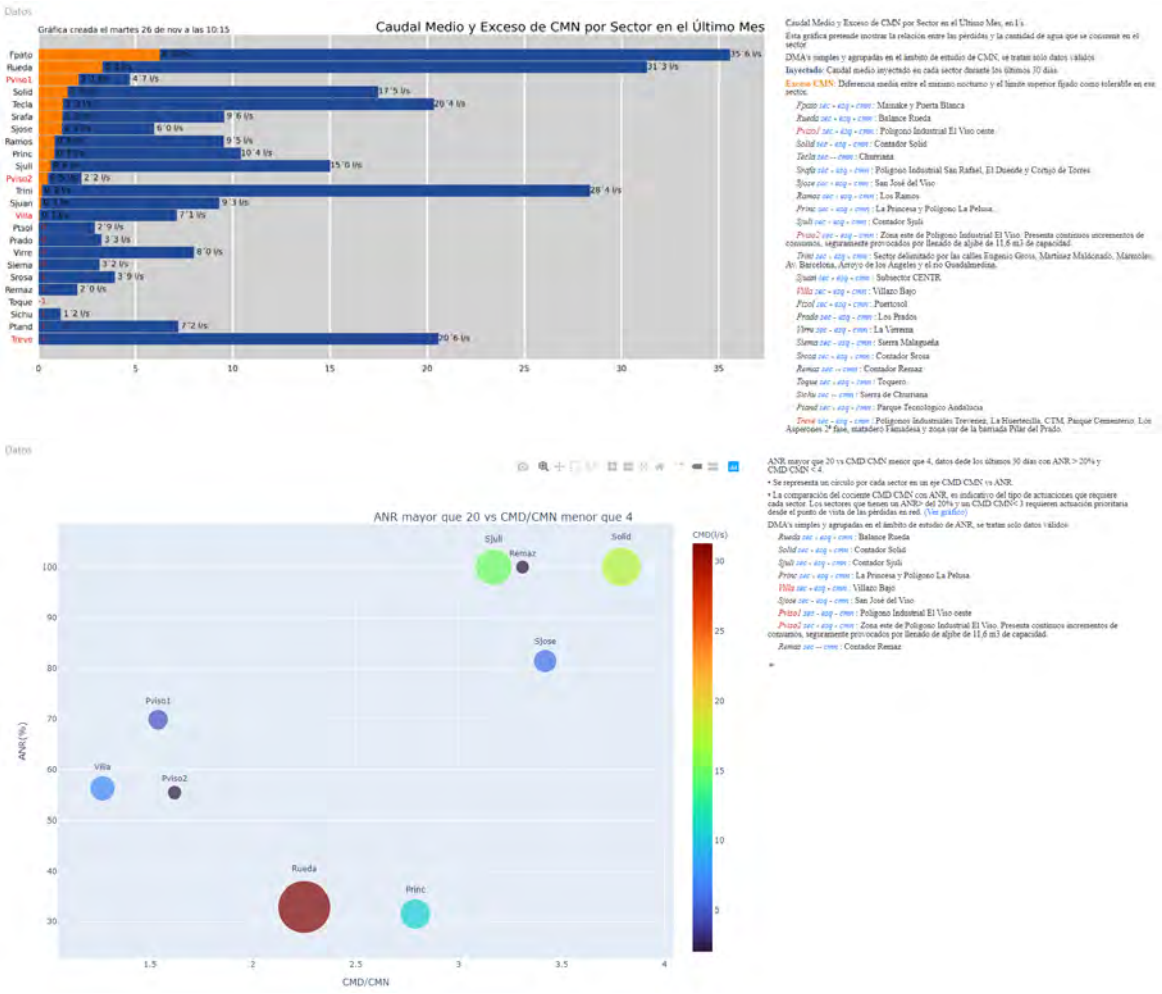
- ✓ **Análisis gráfico de señales:**



- ✓ **Así como diversas herramientas de administración del sistema.**

Con dichas aplicaciones ya se gestionaban balances bimestrales en 2010 de 112 sectores con una longitud media de 15 Km., de los que 87 eran sectores diseñados para el cálculo del rendimiento hidráulico pues abastecen a clientes (con medias por sector de 633 acometidas, 2037 abonados y 6609 habitantes), mientras que 25 fueron sectores creados para el análisis en la red arterial. Además, para la obtención de balances se diseñaron otros 63 sectores virtuales para dar respuesta a las modificaciones provisionales en la sectorización debido a maniobras por incidencias en la red. En la red estaban ya instalados un total de 132 caudalímetros de diámetros que oscilaban entre 50 y 1000 mm.

En la actualidad se han evolucionado los análisis con nuevas herramientas avanzadas, tanto internas desarrolladas mediante técnicas de científico de datos para el control visual de todos sus procesos e indicadores, como externas como es el caso de LEAK DETECTION (Idrica). Dicha herramienta se ha conectado a los sistemas de control de EMASA y permite el análisis de la información en paralelo a los sistemas internos.



Imágenes Control Visual 1



Imagen aplicación Leak Detection 1

Estas herramientas avanzadas se conjugan con el empleo de los sistemas de información geográfica (ESRI) por medio de herramientas de análisis geoespacial.

En cuanto a la búsqueda y situación exacta de fugas en grandes arterias, tienen un especial tratamiento la localización física de las mismas. En estas grandes conducciones, la falta de puntos accesibles y la indefinición de su trazado dificultaban el empleo de los medios electroacústicos habituales.

Por ello se realizó el "Plan de fugas en la red Arterial" donde se utilizaron en primer lugar equipos de georradar para la situación de las tuberías, la acotación topográfica intensiva (cada 50 metros) y la creación de una herramienta visual denominada "Libro de Rutas" que permitiese ayudar a los técnicos en localización de fugas a rastrear estas tuberías. Fue un anticipo a lo que hoy son herramientas GIS u otras más avanzadas como Street View, pero con el objetivo centrado en la situación de nuestras tuberías principales en las campañas de fugas y el replanteo in situ de obras tanto internas como de servicios externos.


EMASA
Empresa Municipal Aguas de Málaga, S.A.

ACTUALIZACIÓN RED ARTERIAL DE ABASTECIMIENTO DE MÁLAGA

Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada Z
371522.28	62275.69	3.68

CROQUIS

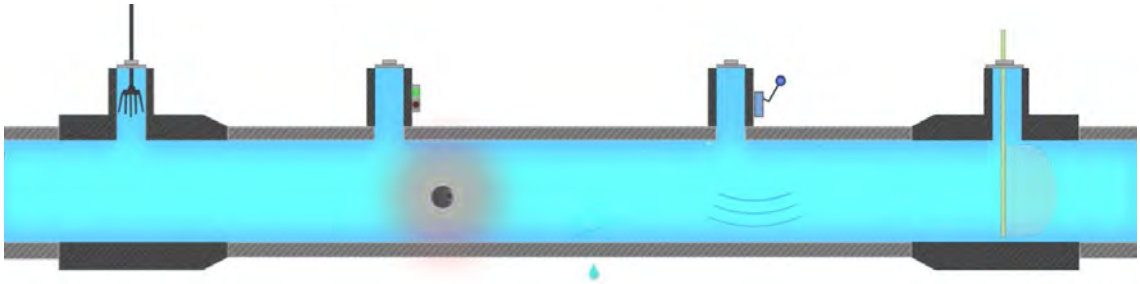
PARAMETROS		
Mslink/Id: 427002	Plano: 427	Fotografia:
Direccion:	Sector: Teatinos	Ubicación: Mediana
Tipo de elemento:	Elemento:	Georadar: SI
Profundidad:	Fecha: 10-23-2008	
Observaciones: Tomado con G.P.S.		
Ref1:	Ref2:	Ref3:

FOTOGRAFIA

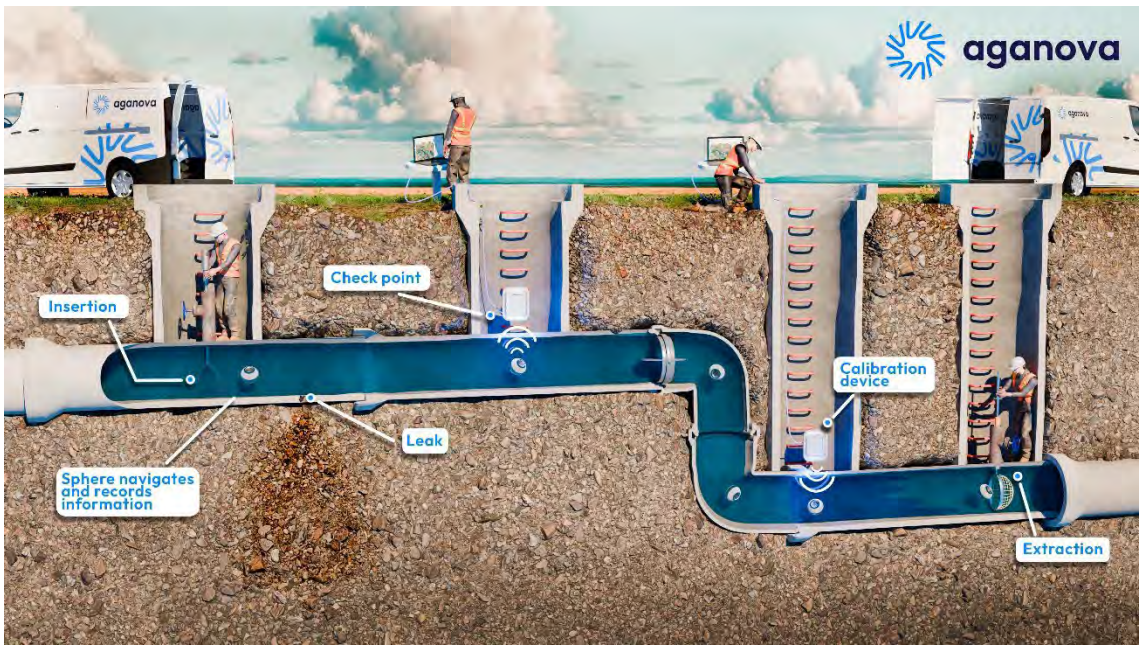
(a-c ing)

Este proyecto se finalizó con total éxito en junio de 2008. De esta forma se aumentó la eficacia de la localización de fugas en la red arterial, aunque la escasez de puntos de auscultación era una importante limitación en el rastreo de dichas tuberías. Se planteó en distintas ocasiones la realización de un importante número de nuevas arquetas de registro sobre estas tuberías para su control, pero su dificultad y coste hizo que nunca se desarrollase adecuadamente ese plan que mejorase de manera significativa la eficacia de la búsqueda de fugas en las grandes arterias.

En 2020 se apostó por la revisión de las redes arteriales con inspección intrusiva (inline), analizando el sonido desde dentro de la tubería. Se inicia así un proyecto para el diagnóstico de las redes arteriales malladas de EMASA mediante la implementación de la tecnología Nautilus con resultados muy satisfactorios hasta la fecha, y que ha quedado implementado como parte de la metodología sistemática en la búsqueda de fugas en arterias en EMASA.



El sistema Nautilus es un dispositivo con sensor acústico que navega por el interior de las redes con la corriente de agua, pudiendo alcanzar, si las condiciones lo permiten, hasta 40km de navegación en una sola inspección, permitiendo la captura de información clave de manera continua durante toda la navegación con una precisión no alcanzable por otros métodos. Todo ello sin interrupción del servicio de suministro. Este sistema es ya un referente en la gestión moderna de los activos, especialmente de las redes de transporte de gran diámetro.



El gran reto de este proyecto ha sido encontrar la forma de aplicar esta tecnología pensada principalmente para grandes tuberías de transporte, normalmente longitudinales y con escasas derivaciones y con unas condiciones de

velocidad suficiente para la navegación de estos equipos, en una red de distribución urbana, totalmente mallada y con gran cantidad de derivaciones, cambios de dirección, con codos tanto horizontales como verticales, y lógicamente con un caudal muy variable, propio de un sistema de abastecimiento.

Por ello, los tramos a revisar han tenido una longitud menor que en las grandes conducciones de transporte, en torno a 1-2 km en muchos casos, donde ha sido necesario el estudio detallado del consumo de los sectores y sus consumidores principales, la modificación temporal de los sectores, el maniobrado de muchas válvulas para poder conducir el equipo por el tramo a inspeccionar, y a su vez continuar suministrando a la población sin alteraciones.

La configuración y parcial aislamiento de una conducción para su inspección causaba en muchos casos un insuficiente flujo en la misma, por lo que la no evacuación de agua en los desagües para mantener la velocidad mínima en torno a 0,3 m/s, que nos garantizaba la correcta navegación del dispositivo, ha sido uno de los mayores hándicaps que se han tenido que vencer.

Otros de los desafíos del proyecto fueron la revisión de la idoneidad y la adecuación de los puntos de entrada y salida del dispositivo que requería accesos de un mínimo de DN100. Este trabajo supone un gran esfuerzo y conlleva un número significativo de obras de arquetas y registros para habilitar dichas inspecciones.

En total se han inspeccionado hasta la fecha más de 100 kilómetros divididos en 50 tramos y se han identificado y clasificado 98 fugas y 26 incidencias relacionadas con las acumulaciones de aire, con una precisión media en la localización en primera instancia de en torno a unos 5 metros.

Dicha precisión se incrementa a demanda cuando se desea la intervención en la tubería, mediante nueva inspección mediante Nautilus con cambio de situación de los sincronizadores, ya centrados en la zona a determinar, y/o con otros sistemas de localización electroacústicas desde el exterior.

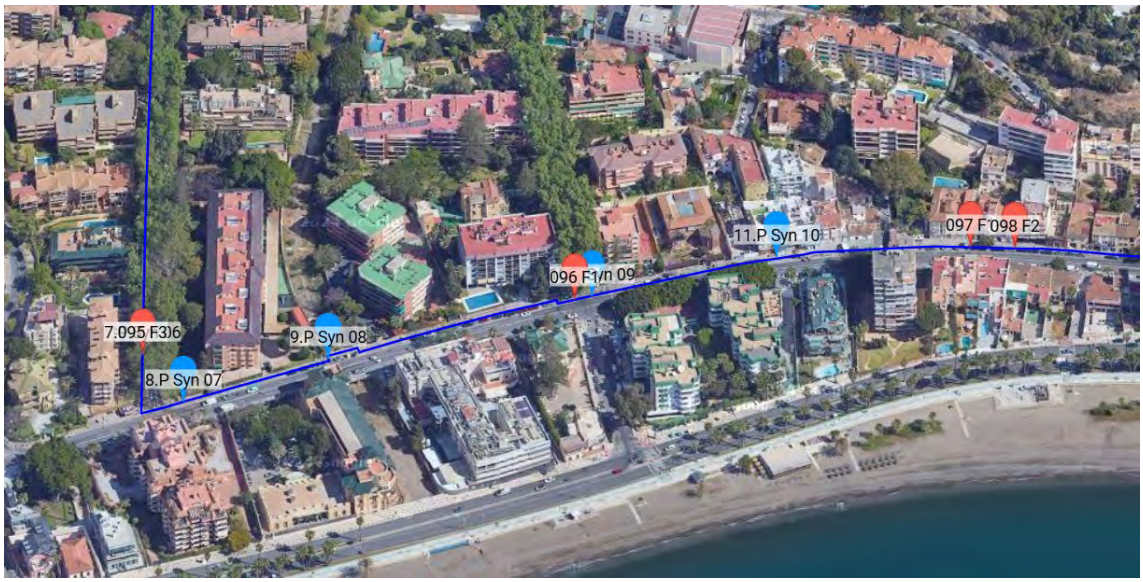


Ilustración 2.2.5.1. Inspección OA-002 con 4 fugas identificadas

Las fugas identificadas han respondido a diferentes niveles de gravedad, con una sensibilidad muy elevada, dado que incluso se han detectado pérdidas inferiores a 1 litro al minuto.

A nivel global, una vez preparado el sistema de inspección intrusiva, la red queda capacitada para le revisión sistemática de los distintos tramos con una gran facilidad, y eso constituye el primer objetivo del proyecto, disponer de un **sistema de diagnóstico recurrente** del estado de las **redes arteriales**, y así determinar la vida útil de la tubería, su envejecimiento, y tomar decisiones concretas sobre si se acomete la reparación puntual de las fugas localizadas o las prioridades de inversión para la renovación de las redes.

Se estima que en pocos años toda la red arterial de la ciudad estará preparada para planificar inspecciones periódicas y sistemáticas con esta tecnología inline y acústica que, además, ha integrado recientemente sensores de presión, inerciales y magnetómetro para, mediante algoritmos de IA, aportar información de alto valor sobre el estado de conservación de la red.

La amortización del proyecto se produce a corto plazo, y además del significativo ahorro de agua y de la mejora en la eficiencia de la red, como curiosidad, estas inspecciones han permitido identificar elementos no digitalizados, o perdidos, y obstrucciones parciales por incrustaciones anormalmente magnificadas u objetos extraños, que de otra forma nunca habría sido posible detectarlas.

Como punto final, hay que indicar que también se está potenciando el uso de nuevos sistemas para la detección de fugas basados en la evolución tecnológica de los registradores nocturnos de ruidos mínimos (RNRM), donde además de determinar los niveles de ruido que se producen en la red, permiten la correlación entre ellos, lo que permite en un solo paso la detección de la fuga y su situación con cierta exactitud, lo que minimiza el tiempo dedicado en campo para su situación. EMASA ya tiene en pruebas estos equipos y realiza el estudio de su eficacia para incorporarlos a la sistemática con RNRM que se implantó de manera consolidada a partir del 2003.

Además, van apareciendo otros sistemas que se basan en el análisis de imágenes satelitales y en el empleo de técnicas de inteligencia artificial para la previsión de averías. Desde EMASA ya se está estudiando todas estas nuevas tecnologías y se quieren desarrollar próximamente proyectos piloto para implementarlas en Málaga como complemento a la sensorización de las redes para la búsqueda de fugas.

3. OTRAS TECNOLOGÍAS

3.1. DESCRIPCIÓN DE OTRAS TECNOLOGÍAS

3.1.1. VENTOSAS DIGITALES

Haciendo uso de un sistema de transmisión de datos que recoge y remite la información sobre el estado de la ventosa y sus accesorios, se puede tener una visión integral de las válvulas de aire instaladas sobre las tuberías. Así se podrán detectar anomalías antes de que se produzcan puesto que el sistema avisa mediante sistemas de alarmas de detección temprana cuando las ventosas requieren mantenimiento, reduciendo significativamente los costes asociados y evitando el impacto medioambiental, social y económico por fugas, derrames e incluso inundaciones.

El modelo Arisense por ejemplo, permite emplear una combinación de sensores incorporada a la caja de la ventosa, que monitoriza en continuo su funcionamiento y eficacia y transmite los datos en tiempo real al servidor para que puedan ser analizados. Dispone de conectividad IoT que es rápida y estable, transmitiendo los datos de los

sensores de la ventosa por vía inalámbrica a un almacenamiento seguro en la nube y a su aplicación. Permite también la conexión con sistemas SCADA.

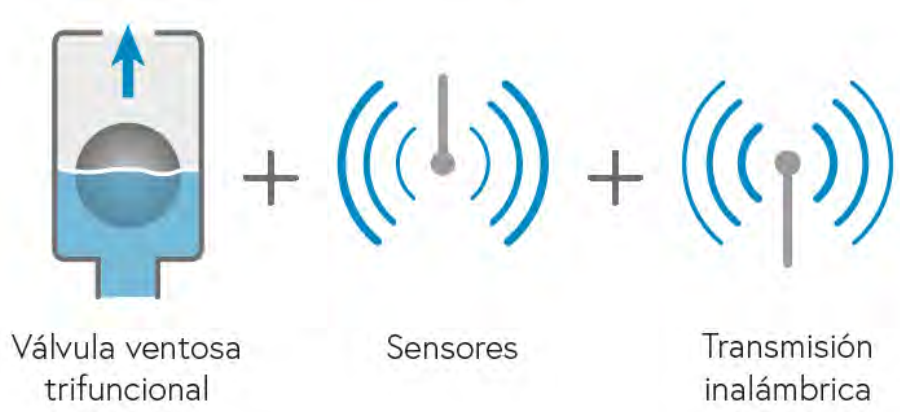


Imagen 3.1.1.1. Esquema de funcionamiento de ventosa Arisense.

Este tipo de sistema puede ser acoplado a ventosas para uso industrial, aplicaciones agrícolas y sistemas de distribución de agua.

Otro sistema similar, es el Hawle Live Air, con ventosas que incluyen 3 sensores: presión, ubicación del flotador (distancia) y sensor capacitivo (para indicar la presencia de agua o aire). Además de forma adicional con el sensor de presión, se podrían detectar fugas próximas a las ventosas monitorizadas.

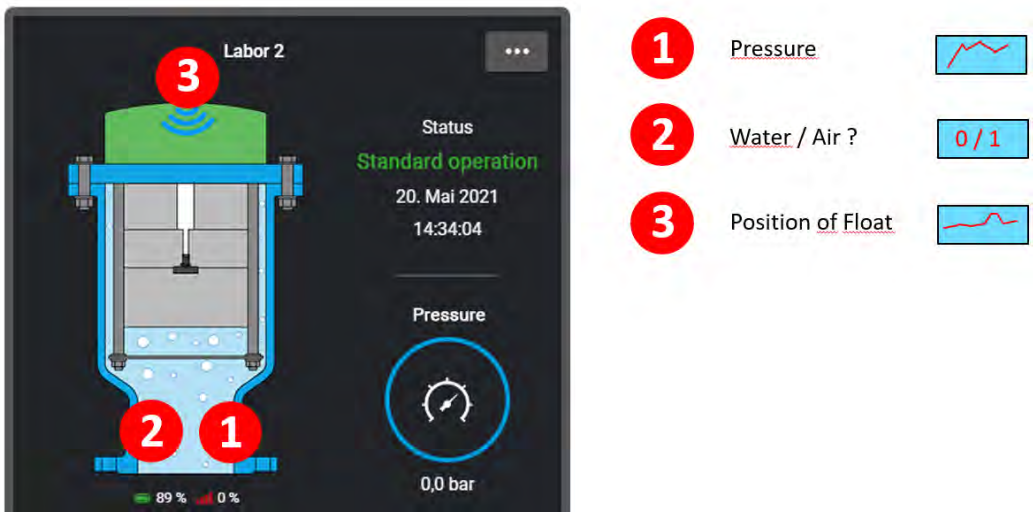


Imagen 3.1.1.2. Imagen cedida por Hawle Live Air. Sistema de monitorización de una ventosa.



Imagen 3.1.1.3. Imagen cedida por Hawle Live Aire. Sistema de monitorización de una ventosa.

El sistema proporciona alarmas instantáneas de fugas, obstrucciones, manipulaciones, altas presiones, inundaciones de arquetas. Es además compatible con los sistemas SCADA de los operadores o visible a través de plataforma web con posibilidad de control en remoto 24/7.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Uso de sensores de fibra óptica para tuberías. Prisutova, J.; Krynkin, A.; Tait, S.; Horoshenkov, K.
- Mediciones hidráulicas y de condición: una revisión. CivilEsp 2022,3, 85-113. https://doi.org/10.3390/civileng3010006
- Marlow, D.; Corazones.; Quemar, S.; Urquhart, A.; Gould, S.; Anderson, M.; Cocinero, S.; Ambrosio, M.; Madín, B.; Fitzgerald, A. Estrategias y protocolos de evaluación de la condición de los activos de servicios públicos de agua y aguas residuales; Reporte técnico; Fundación para la Investigación del Medio Ambiente del Agua: Alexandria, VA, EE. UU., 2007.
- INDUSTRIAL VALIDATION AND VERIFICATION APPROACH FOR EXTERNAL FIBER OPTIC BASED LEAK DETECTION. Chris Minto1, Alastair Godfrey, Paul Clarkson, Alasdair Murray, Dominic Graham. OptaSense Ltd.
- Sensado distribuido sobre fibra óptica (DFOS) mediante tecnología DAS/HDAS e identificación de eventos por aprendizaje supervisado (Machine Learning). Subdirección I+D+i Canal de Isabel II. Año 2022.
- TECONOLOGÍA SOUND PRIN AFO PARA LA MONITORIZAICÓN ESTRUCTURA DEL ARTERIAS DE HORMIGÓN PRESTENSADO CON CAMISA DE CHAPA. Documento elaborado por Xylem.
- Normas Redes Abastecimiento Canal de Isabel II, v.4. 2021.
- SISTEMA HADES. Sistema integral de televigilancia para protección catódica. DiagnostiQA Consultoría Técnica, S.L.
- Gómez-Martínez, P.; Sáez García, L.; Arozamena Ramos, E.; Tomé Sánchez, C. Innovative Tools to Control Organic Matter and Disinfection Byproducts “HE IntoDBP”. The case study of Madrid. 19th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies, Essen (Germany), 2024.
- Gómez-Martínez, P. Caracterización de transitorios hidráulicos en condiciones normales de operación para la red gestionada por Canal de Isabel II. AEAS XXXV Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento. Valencia, España, 2019.

ANEXO I. SOLUCIONES COMERCIALES PARA EL CONTROL EN CONTINUO DE LA CALIDAD DEL AGUA.

A continuación, se presenta un breve resumen de **algunas soluciones comerciales disponibles** en mercado para la **medición en continuo** de parámetros relativos a la calidad del agua. En concreto, se realizó solicitud a las siguientes empresas comerciales para la instalación de sistemas de medición en continuo (**con solución integrada para la recogida y transmisión de datos**) para los parámetros de **turbidez, cloro libre, cloro total, nitritos, amonio y crecimiento bacteriano**. Así mismo, se hizo hincapié en estas consultas en obtener **viabilidad para que el suministro eléctrico de los equipos se realizase mediante baterías y/o panel solar**, dado que por lo general las ubicaciones seleccionadas no disponen suministro eléctrico convencional:

- Xylem (enlace a web)
- Badgermeter (enlace a web
- Hach (enlace a web)
- Izasa (enlace a web)
- Burket (enlace a web)
- Stasa (enlace a web)
- Endress (enlace a web)
- Egidion (enlace a web)
- Mejoras energéticas (enlace a web)

Aspectos a valorar	BADGERMETER	IZASA	XYLEM	EGIDION
¿Se puede introducir el sensor en tubería? Consultar tabla 3 a.	Para la opción en la que se quiera medir nitritos y amonio, se debe recurrir al by-pass. Además, es económicamente más rentable. La opción insertada (sólo para cloro y turbidez) es el equipo denominado PIPESCAN. Mirar en tabla adjunta los parámetros que se pueden medir con sensores insertados.	Según tabla 3.a) y según especificaciones técnicas concretas recogidas en tabla 1 y tabla 2. Los sensores son marca Process Instrument.	En función del sensor, según tabla 3a)	El sensor queda introducido 3,7 cm dentro de la tubería. Recomendado instalación lateral. Hay que evitar cambios en el flujo, velocidad del agua. Si hubiera burbujas de agua, existe interferencia en la medida.
Consumo de agua en caso de by-pass:	min: 30 l/h, max: 100 l/h-130l/h	500 ml/min, el mismo caudal se usa para todos los sensores.	50 l/h (pendiente confirmar)	No aplica
¿En caso de by-pass se puede recircular el agua?	Si, no queda contaminada el agua	Si	El agua queda "contaminada" con electrolito, pero se podría utilizar para otros usos. Lo que sí queda contaminado es el agua que se use para medir cloro total (medida DPD. Colorimétrica). Esta agua, (2 ml / medida) se debe tratar como residuo químico de laboratorio.	No aplica
¿Presión máxima admitida?	La opción insertada (pipescan) admite presiones de 1 a 11 bar.	Según tabla adjunta. Tabla 1 y Tabla 2	10 bar	10 bar
¿Consumo de reactivo?	Sin reactivo, consumible de electrolito entre 6 meses y 1 año (amonio), Cloro: 1 año cloro la membrana, entre 6 meses y 1 año (electrolito). Consume más electrolito a menos concentración.	Según tabla adjunta. Tabla 1 y Tabla 2	De todos los equipos ofertados los únicos que tendrían reactivos serían el electrodo de cloro libre amperométrico (cambio de electrolito, cambio de membrana) y el analizador de cloro colorimétrico (cambio de botellas de DPD)	No

Aspectos a valorar	BADGERMETER	IZASA	XYLEM	EGIDION
Rango de medida.	Consultar catálogo	Según tabla adjunta. Tabla 1 y Tabla 2.	Indicados en la ficha técnica, aptos para agua potable	No aplica
Calibración exigida	Revisión anual mínimo, pero se tendrá que ajustar según medio	Según tabla adjunta. Tabla 1 y Tabla 2.	Sí, recomendable mensuales, pero se podría dilatar a trimestrales (cloro), semestrales (turbidez), anuales (NO2, NO3)	No necesaria
Mantenimiento necesario.	El mantenimiento se puede hacer por personal propio o contratarlo a ellos. En Valencia por ejemplo se hacen un par de veces al año	Según tabla adjunta. Tabla 1 y Tabla 2.	Sólo calibración y cambio de reactivo. en el caso de NO2/NO3 es óptico. No requiere mantenimiento. El mantenimiento puede ser realizado por personal propio. Nos pasarán el coste de electrolito y repuestos. Estimado al año por panel: 50 €/trimestre (solución formacina), 200 €/año (electrolito)	No necesario
Condiciones de temperatura, humedad, etc.	Humedad de almacenamiento 0 a 95 % sin condensación	Según tabla adjunta. Tabla 1 y Tabla 2.	Temperaturas hasta de 40 ºC y desde cero grados. Humedad sin problema. IP68. pH: 4-9. ojo, por encima de 9 (pasa con todos los sensores) la medida pierda precisión. Aplicable al Cloro libre.	De -10 a 60ºC. Humedad: no aplica
Consumo energético.	Depende de la frecuencia de lecturas y del modo de operación	Se adjunta una simulación en Tabla 3	A calcular en función de configuración final	Batería de 12V para toma de datos cada 2 horas y transmisión 2 veces al día.

Aspectos a valorar	BADGERMETER	IZASA	XYLEM	EGIDION
Transmisión de datos en remoto/ tiempo real o diferido.	Sí, los equipos se adaptan según necesidades	Sí	Según necesidades nuestras: en remoto, mediante comunicación Ethernet IP, Profinet, Modbus TCP, con un modem conectado a la nube correspondiente. Datos en tiempo real, descarga de datos, tendencias, etc.	Recomendado cada 2 horas con 2 transmisiones al día. Exige cobertura al menos 3G. Almacena datos en caso de falta de cobertura puntual y luego transmite.
Tamaño de la estación y requerimientos técnicos que se precisen.	Según especificaciones. Se adjunta una fotografía orientativa.	Panel PVC de 500x600 mm	Panel sería de 85 cm X 70 cm X 22,5 cm. A considerar además el tamaño de la sonda espectrofotométrica Nitravis 705 IQ NI (unos 80 cm). Hay que instalar dos paneles	Pequeña caja estanca de ip-67 donde va ubicado el transmisor y la batería (como en la fotografía inferior)
Recepción de los datos	Contra servidores propios. PROFIBUS SÍ PROFINET NO.	Portal control site a través de navegador web (gratuito). Otras opciones con suscripción de pago. También es posible integrar los datos en servidores propios.	Se puede comunicar la info del panel mediante un modem a una nube (de Xylem o propia) o una salida de Ethernet del controlador, o cualquier otro protocolo digital que necesitemos. 200 €/año (plataforma). AQUAVIEW. Similar al de las bombas (funcionamiento)	Portal control site a través de navegador web (suscripción)

Aspectos a valorar	BADGERMETER	IZASA	XYLEM	EGIDION
Alimentación tensión o con panel/batería (corriente continua o alterna)	La empresa propone oferta con alimentación en continuo, ya sea a 230V o 24V (en la oferta vamos con 24V, pero también se podría cambiar a 230V). Debido a su tecnología, estos sensores funcionan mejor con una alimentación estable, por eso lo hemos planteado así.	El controlador se puede alimentar tanto a AC como DC. Esto se configura a la hora de realizar el pedido. Tenemos clientes que trabajan con estos equipos alimentados por baterías y paneles en zonas con menos radiación que la que tenemos en España y no tienen ningún problema. Tened en consideración que los sensores se alimentan a través del controlador, y éste tienen las alimentaciones de cada sensor aisladas entre sí para evitar estos inconvenientes.	Controlador del panel y resto de equipos a 220V, existiría la posibilidad de controlador a 24 V con suministro de una batería, pero tendríamos que calcular este consumo exactamente	No requiere conexión eléctrica. Con la batería de 12 V propuesta es suficiente para la transmisión de datos.

Aspectos a valorar	BADGERMETER	IZASA	XYLEM	EGIDION
Flexibilidad. Se pide incluir equipos que puedan ser versátiles (ampliar sensores, por ejemplo).	El controlador propuesto es el "CONCUBE", que es el terminal más completo. La principal ventaja de este terminal es que es muy flexible, pudiéndose conectar sondas adicionales hasta un máximo de 64 parámetros. Además, adquiriendo licencias extra se le puede dotar al equipo de muchas ventajas que nos diferencian de otras marcas. Os hemos incluido el módulo y antena 4G para que, con una tarjeta SIM pudieseis acceder de manera remota al equipo además de dotarlo de internet para el envío de datos a un servidor (que puede ser vuestro, como ya hablamos en la reunión).	El controlador ofertado permite gobernar cualquier sensor que comunique con protocolos estándar (ModBus, analógico 4-20 mA, etc.). Es decir, se puede integrar los sensores de otras casas comerciales para integrar la retransmisión de datos desde un único controlador.	Sí, se pueden integrar más sensores al panel ofertado	

Tabla 1 y 2. Datos específicos de IZASA

Especificaciones sensores:	Turbidez	Cloro libre	Cloro total
¿Se puede introducir el sensor en tubería?	Si	No	No
Principio	dispersión de luz	método amperométrico o DPD o método híbrido (Chloribrid) (ver tabla adjunta)	método amperométrico y DPD (ver tabla adjunta)
¿Presión máxima admitida?	10 bar	3 bar	1 bar
¿Consumo de reactivo?	No	Sí	Sí
Rango de medida.	0-1000 NTU	0-200 ppm (en función del método analítico puede ser de 0,005-2 ppm o de 0 a 5 ppm para rangos bajos de medida).	0-200 ppm (en función del método analítico puede ser de 0,005-2 ppm o de 0 a 5 ppm para rangos bajos de medida).
Mantenimiento necesario.	Ninguno	Anual	Anual
Condiciones de temperatura, humedad, etc.	0-50 ºC	0-45 ºC	0-45 ºC

Especificaciones método de medida:

Amperométrico	Sin reactivos
	Coste mantenimiento bajo (1 vez al año)
	Respuesta instantánea a variaciones
	Requiere calibración frecuente
DPD	Mantenimiento mensual
	Requiere cambio de reactivos todos los meses.
	Tiempo de respuesta a la medida de 2,5 minutos
Chloribrid	Poco reactivo. Cambio cada 6 meses
	Coste mantenimiento bajo (2 veces al año)
	Respuesta rápida

Tabla 3 a. Opciones de sensores según casa comercial

	Turbidez	Cloro libre	Cloro total	Nitritos	Amonio	Crecimiento bacteriano
IZASA	SI	Si	Si	No	No	No
	BY-PASS O INSERTADO	BY-PASS	BY-PASS			
XYLEM	SI	Si	Si	Si	Si	No
	BY-PASS O INSERTADO	BY-PASS	BY-PASS	BYPASS	BY-PASS	
BADGERMETER	SI	Si	Si	Si	Si	No
	BY-PASS O INSERTADO	BY-PASS O INSERTADO	BY-PASS O INSERTADO	BY-PASS	BY-PASS	
EGIDION	No	No	No	No	No	Si
						INSERTADO
MEJORAS ENERGÉTICAS	**SÍ**	**SÍ**	**SÍ**	**SÍ**	**No**	**No**
	BY-PASS	BY-PASS	BY-PASS	BY-PASS		

Tabla 3. Datos específicos de IZASA

Tabla resumen de un ejemplo de controlador+sensor de cloro amperométrico+turbidímetro+módem para acceso remoto con los consumos desglosados. Harán el cálculo más detallado si definimos mejor nuestras necesidades

Equipamiento	Consumo 24VDC (mA)	Consumo 12VDC (mA)
Placa Base	80	176
Pantalla Encendida	79	150
Modem GPRS Acceso Remoto	69	140
TurbSense	64	128
Sensor de cloro amperométrico	33	79

MEJORAS ENERGÉTICAS (AKWAMETRIC)



Aspectos a valorar	
¿Se puede introducir el sensor en tubería? Consultar tabla 3 a.	Mediante la solución autónoma Akwametric todos los parámetros son analizados en derivación, única forma de obtener valores precisos, independientes de las condiciones hidráulicas de la conducción y reducción importante del mantenimiento de los sensores.
Consumo de agua en caso de by-pass:	0,20 litros/analítica
¿En caso de by-pass se puede recircular el agua?	Solamente en el caso de tomar la muestra aguas arriba de una VRP y devolverla aguas abajo. En cualquier caso, el consumo de agua es mínimo y se garantizan condiciones óptimas para las analíticas.
¿Presión máxima admitida?	No es limitante
¿Consumo de reactivo?	Cloro: 1 año cloro la membrana, entre 6 meses y 1 año (electrolito)
Rango de medida.	Consultar catálogo
Calibración exigida	Revisión anual mínimo, pero se tendrá que ajustar según medio
Mantenimiento necesario.	El mantenimiento es mínimo y muy sencillo de realizar.
Condiciones de temperatura, humedad, etc.	No limitante.
Consumo energético.	Mínimo. Solución autónoma alimentada por baterías.
Transmisión de datos en remoto/ tiempo real o diferido.	Los equipos se adaptan según necesidades

Tamaño de la estación y requerimientos técnicos que se precisen.	Según especificaciones.
Recepción de los datos	A plataforma propia de Mejoras o a la del Cliente.
Alimentación tensión o con panel/batería (corriente continua o alterna)	Solución autónoma mediante baterías. También se puede conectar a alimentación externa mediante una fuente de alimentación.
Flexibilidad. Se pide incluir equipos que puedan ser versátiles (ampliar sensores, por ejemplo).	El sistema es modular pudiendo ser ampliado hasta 8 sensores. Asimismo, el sistema puede integrar otro tipo de sensores (caudal, presiones, equipos detección de fugas, nivel en depósitos, …). Se puede utilizar para la automatización de purgas o reinyección de cloro en red.