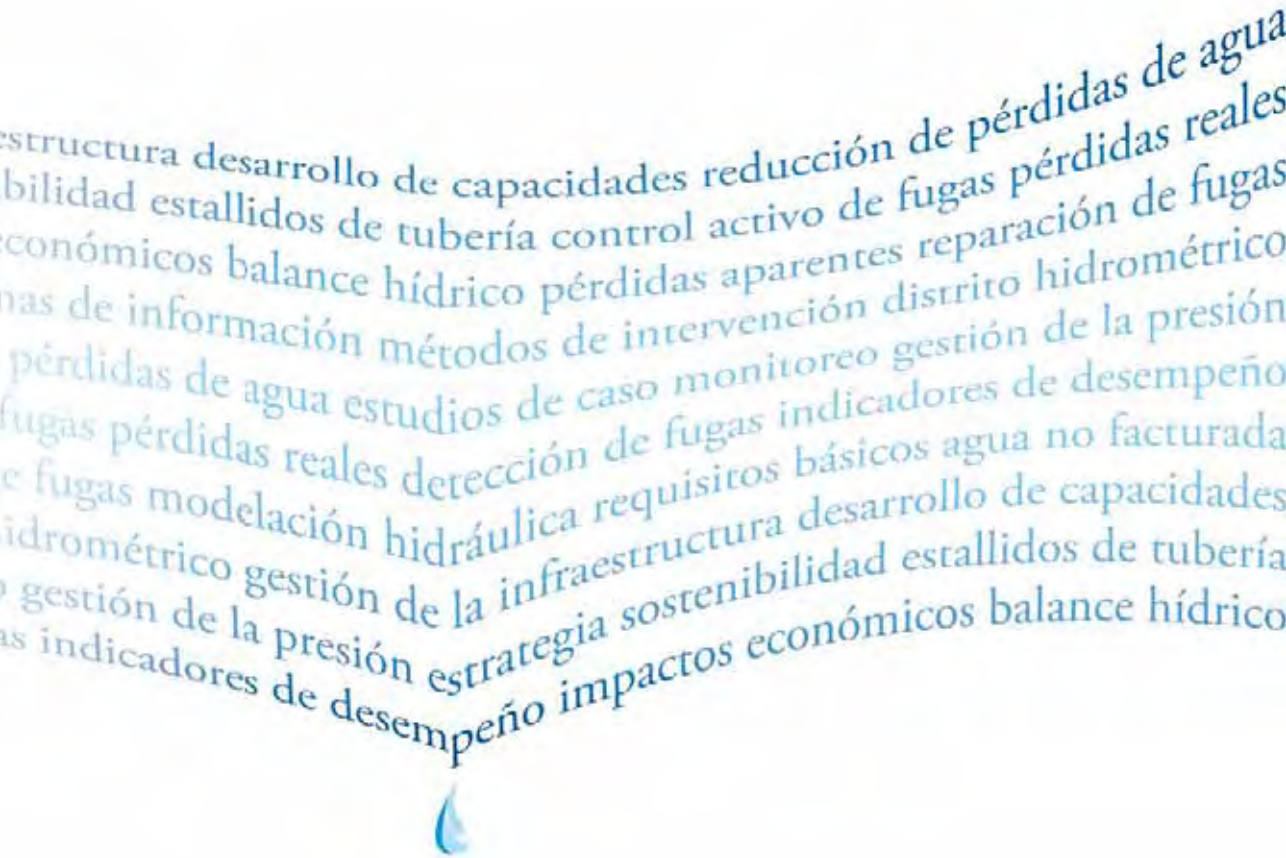


Guía para la reducción de las pérdidas de agua

Un enfoque en la gestión de la presión

giz

Por encargo de
Ministerio Federal de
Cooperación Económica
y Desarrollo

VAG

ntervención distrito hidrométrico gestión de la infraestruc
aso monitoreo gestión de la presión estrategia sostenibilid
cción de fugas indicadores de desempeño impactos econó
hidráulica requisitos básicos agua no facturada sistemas d
fraestructura desarrollo de capacidades reducción de pérd
sostenibilidad estallidos de tubería control activo de fugas
icos balance hídrico pérdidas aparentes reparación de fug
s de información métodos de intervención distrito hidro
ción de pérdidas de agua estudios de caso monitoreo gest
trol activo de fugas pérdidas reales detección de fugas inc

ctura desarrollo de capacidades reducción de pérdidas de
ad estallidos de tubería control activo de fugas pérdidas
omicos balance hídrico pérdidas aparentes reparación de
e información métodos de intervención distrito hidromé
idas de agua estudios de caso monitoreo gestión de la pr
pérdidas reales detección de fugas indicadores de desem
gas modelación hidráulica requisitos básicos agua no factu
métrico gestión de la infraestructura desarrollo de capaci
ión de la presión estrategia sostenibilidad estallidos de tu
licadores de desempeño impactos económicos balance hí

« La gestión de la presión es de máxima utilidad en los sistemas de abastecimiento de agua con índices de fugas altos, pues las fugas pueden reducirse considerablemente reduciendo la presión del agua en distritos específicos en los períodos de bajo consumo. No obstante, aunque los proyectos de gestión de la presión son rentables a corto plazo porque reducen el agua no facturada, no son desde luego sustitutos de los programas de rehabilitación de redes a largo plazo. »

Prof. Dr.-Ing. Raimund Herz, profesor emérito de ingeniería urbana, Universidad Técnica de Dresde

« La gestión activa de la presión es útil en principio, pero sigue sin aplicarse en grado suficiente. Según el análisis de la situación, deben complementarse entre sí medidas de rehabilitación y de gestión de la presión a fin de desarrollar la mejor estrategia para la reducción de la pérdida de agua. »

Dr. Stefan Gramel, asesor técnico, Competence Center Water Supply, Wastewater, Solid Waste, KfW Bankengruppe (grupo bancario KfW)

Guía para la reducción de las pérdidas de agua

Un enfoque en la gestión de la presión

Foto: © Shutterstock ®

Nota importante

La presente guía describe un enfoque progresivo de gestión de la presión. El enfoque adoptado en la implementación de la gestión de la presión depende del contexto nacional. Es preciso comprender que el nivel de desarrollo económico, la concientización medioambiental, las prioridades políticas, el buen gobierno y los hábitos culturales influyen en la dinámica y el marco temporal de la modernización de la gestión del agua en un país. La implementación de la gestión de la presión debe considerarse una parte de este proceso de cambio, y en cada país se avanzará de distinta manera.

La guía debe ponerse en práctica en un espíritu de cooperación entre los sectores público y privado. Esto no se logra de un día para otro, por lo que es necesaria una incorporación gradual basada en las circunstancias políticas, sociales y legales así como en objetivos alcanzables y ajustados a la realidad.

Pueden actuar como fuerza impulsora de la introducción de la gestión de la presión de acuerdo con esta guía una asociación del ámbito del agua, una empresa local de abastecimiento de agua o el sector público. Los agentes que promuevan esta actividad deberán hacerlo de manera transparente y en un plazo definido y vinculante.

Sobre la guía – agradecimientos

Uno de los principales objetivos de la presente guía es contribuir a reducir la pérdida de agua, mejorando la gestión de las redes de abastecimiento de agua ya existentes, poniendo un especial acento en el método de gestión de la presión. La guía ha sido elaborada en el marco de una cooperación de desarrollo (anteriormente conocida como cooperación entre el *sector público y el sector privado)* entre la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y VAG-Armaturen GmbH. El Institute for Ecopreneurship (IEC) de la University of Applied Sciences Northwestern Switzerland (FHNW) apoyó la gestión del proyecto. El Institute for Water and River Basin Management (IWG) del Karlsruhe Institute of Technology (KIT) coordinó la elaboración del documento.

También brindaron apoyo y asesoramiento diversos expertos externos del ámbito de la reducción de la pérdida de agua de los sectores público y privado. El Programa de ONU-Agua para el desarrollo de la capacidad en el marco del Decenio (UNW-DPC), que organiza activamente en todo el mundo cursos de capacitación sobre reducción de la pérdida de agua, se ha comprometido a apoyar la difusión y puesta en práctica de la guía. El manual técnico ha sido revisado y comentado por expertos de la Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés), la Universidad Técnica de Dresde (Alemania) y el KfW. Por otro lado, la estructura y el contenido de la guía para la reducción de la pérdida de agua han sido expuestos en diálogos de partes interesadas celebrados en Beirut (Líbano) – con 44 participantes de Líbano, Jordania, Siria y los Territorios Palestinos – y Lima (Perú) – con más de 200 participantes de Perú y Bolivia. Además, el proyecto y la guía han sido presentados a representantes de empresas consultoras alemanas así como en la conferencia de la IWA sobre pérdida de *agua celebrada en 2010* en Sao Paulo (Brasil). Se han recogido y tenido en cuenta en la elaboración de los documentos las opiniones de los participantes.

El equipo de gestión de esta iniciativa desea expresar su sincero agradecimiento a los expertos de VAG, GIZ, IWG-KIT y IEC-FHNW y a todas las personas que han aportado tiempo, información y conocimientos.

Puede obtenerse más información en: *www.waterlossreduction.com*.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

D. Ziegler, F. Sorg,
P. Fallis, K. Hübschen

P.O. Box 5180
65726 Eschborn
Alemania
Tel.: +49 6196 79 0
Fax: +49 6196 79 11 15
pm@giz.de
www.giz.de

VAG Armaturen GmbH (VAG)

L. Happich, J. Baader, R. Trujillo

Carl-Reuther-Str. 1
68305 Mannheim
Alemania
Tel.: +49 621 749 0
Fax: +49 621 749 291 000
pms@vag-group.com
www.vag-group.com

University of Applied Sciences Northwestern Switzerland (FHNW)

Institute for Ecopreneurship (IEC)

D. Mutz, E. Oertlé

Gründenstr. 40
4132 Muttenz
Suiza
Tel.: +41 467 42 42
Fax: +41 61 467 44 60
info@waterlossreduction.com
www.fhnw.ch/hls

Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

Institute for Water and
River Basin Management (IWG)

P. Klingel, A. Knobloch

Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe
Alemania
Tel.: +49 721 608 44561
Fax: +49 721 608 44608
philipp.klingel@kit.edu
http://iwk.iwg.kit.edu

Prólogo

Estimados lectores:

En estos primeros años del siglo XXI, 900 millones de personas –alrededor de la séptima parte de la población mundial– carecen de acceso a suficiente agua potable. La escasez de agua y la mala calidad de este recurso son unas de las causas principales de la pobreza, la mala salud y la degradación ambiental. Dados el rápido crecimiento de la población mundial, el aumento de la urbanización y los ya patentes efectos del cambio climático, cada vez resulta más difícil proporcionar y mantener un suministro de agua adecuado.

En los países en desarrollo y de economía emergente, entre el 40 y el 80 por ciento del agua incorporada a las redes de abastecimiento de agua potable se pierde por fugas. Estas pérdidas del recurso más valioso del mundo tienen consecuencias financieras considerables. Los fondos se gastan en aumentar la producción de agua para compensar las pérdidas, cuando podrían invertirse en mantener o ampliar la infraestructura existente.

Alemania es uno de los donantes más importantes del mundo en el ámbito del agua y saneamiento, y el más importante en África. Anualmente, el Gobierno alemán dedica alrededor de 350 millones de euros a intervenciones relacionadas con el agua, y se estima que las actividades en curso en el sector del agua benefician a unos 80 millones de personas. La reducción de la pérdida de agua es un aspecto importante de nuestros proyectos de desarrollo.
Muchos países ya cuentan con una estrategia de gestión del agua, y en general la reducción de la pérdida de agua se considera un tema importante. Alemania goza en todo el mundo de una excelente reputación por su tecnología del sector del agua sofisticada y de alta calidad. Desde el punto de vista técnico, la pérdida de agua en el sistema de abastecimiento puede reducirse a aproximadamente el 5 por ciento. No obstante, la reducción de la pérdida de agua no sólo tiene que ver con soluciones técnicas: es necesario integrar estrategias eficaces en un sistema de gobierno en materia de agua adecuadamente regulado e inclusivo. Por lo general, la implementación constituye un reto, pues se deben establecer nuevas formas de compartir la responsabilidad y son precisos cambios en el comportamiento tradicional de los consumidores. Los procesos de reforma relacionados con el gobierno en materia de agua muchas veces son complejos y requieren tiempo, pero son absolutamente necesarios.

Es por ello que me satisface enormemente la publicación de esta *guía para la reducción de la pérdida de agua*, con su decidido acento en cuestiones técnicas y de gestión. La guía es el resultado de una fructífera cooperación entre la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y VAG-Armaturen GmbH en el marco del programa de cooperaciones de desarrollo *www.develoPPP.de*. Esta cooperación promueve el desarrollo de capacidades de amplia base para responsables de decisión y partes interesadas en los niveles nacional y regional. La guía sensibiliza sobre las causas de la pérdida de agua e identifican formas de reducir la misma. Presentadas como documento accesible al público, constituyen un medio eficaz para la transferencia de conocimientos y contribuyen a apoyar el uso sostenible del agua en todo el mundo.

Esta cooperación de desarrollo es un excelente ejemplo del progreso que puede lograrse trabajando juntos la cooperación para el desarrollo y el sector privado. Como Ministro Federal de Cooperación Económica y Desarrollo, estoy convencido de que la presente publicación motivará a responsables de decisión, directores ejecutivos, ingenieros y técnicos de empresas de abastecimiento de agua de países en desarrollo y de economía emergente a intensificar sus esfuerzos encaminados a reducir la pérdida de agua y, así, contribuirá a la gestión eficiente y sostenible del agua.

Saludos cordiales

Dirk Niebel
Ministro Federal de Cooperación Económica y Desarrollo

Nota del editor

La presente guía es el resultado de una cooperación de desarrollo con el sector privado entre la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y VAG-Armaturen GmbH (VAG), establecida en 2009. El objetivo de esta cooperación era mejorar la capacidad de las empresas de agua para gestionar de manera sostenible los sistemas de abastecimiento de agua y reducir la pérdida de agua, poniendo un especial acento en la gestión de la presión. Las cooperaciones entre el sector público y el sector privado están adquiriendo importancia y reconocimiento crecientes en la cooperación alemana para el desarrollo, tras numerosas experiencias positivas. Estas cooperaciones presuponen un compromiso a largo plazo por parte de la empresa privada, que no se concentra en sus propios intereses a corto plazo y en beneficios rápidos. Las medidas de desarrollo y los conocimientos del sector privado pueden complementarse mutuamente con el objetivo de obtener resultados eficientes y sostenibles.

VAG *(www.vag-group.com)* es un fabricante de válvulas para el ámbito del agua y las aguas residuales, con gran experiencia y la reputación de ser pionero en el suministro de soluciones modernas y globales. La GIZ *(www.giz.de)* es una empresa federal de cooperación para el desarrollo sostenible que opera en todo el mundo. En el proyecto se han incorporado además conocimientos de dos universidades: el Karlsruhe Institute of Technology (KIT) *(www.kit.edu)* y el Institute for Ecopreneurship (IEC) *(www.fhnw.ch/lifesciences/iec/institut-fuer-ecopreneurship)* de la University of Applied Sciences Northwestern Switzerland (FHNW) *(www.fhnw.ch/hls)*. KIT es una de las más importantes universidades técnicas alemanas y un centro nacional de investigación en gran escala. Ha participado en el proyecto a través del Institute for Water and River Basin Management (IWG). El departamento de gestión de redes de abastecimiento de agua potable del IWG *(http://iwk.iwg.kit.edu)* concentra su trabajo en los modelos hidráulicos, el análisis de redes de distribución de agua y la reducción de la pérdida de agua. El IEC trabaja prioritariamente en la enseñanza y la investigación aplicada en los ámbitos de la gestión sostenible de recursos, la biotecnología y la ecotoxicología.

La combinación de la competencia nacional de los dos actores mundiales GIZ y VAG, complementada con conocimientos académicos, ha demostrado ser una iniciativa muy exitosa. Estamos convencidos de que el uso y la puesta en práctica de esta guía, así como la implementación de las recomendaciones incluidas sobre la resolución de problemas existentes, darán lugar directa e indirectamente a una gestión más sostenible de las redes de abas-

tecimiento de agua, incluidas la reducción de la pérdida de agua y la garantía de un suministro constante, seguro y justo de agua en un mayor número de hogares. En Jordania, p. ej., la pérdida de agua en el área del proyecto se ha reducido de hecho hasta en un 40 por ciento, y la cantidad de agua suministrada para satisfacer las necesidades de los consumidores ha disminuido considerablemente. Adicionalmente, la guía contribuirá a una operación y un mantenimiento de las redes de carácter más preventivo, lo que a largo plazo genera menos costos que la mera reacción a daños existentes. De hecho, se reducirán las roturas de tuberías y aumentará la vida de las redes. Además, mejorará la planificación de inversiones a corto, medio y largo plazos para la gestión sostenible de las redes de abastecimiento de agua. Finalmente, la gestión y el mantenimiento más adecuados de las redes de distribución de agua reducirán la contaminación del agua potable (problemas de calidad) y con ello, mediante el suministro de agua más limpia y segura, las infecciones transmitidas por el agua.

ntervención distrito hidrométrico gestión de la infraestruc
aso monitoreo gestión de la presión estrategia sostenibilid
cción de fugas indicadores de desempeño impactos econó
hidráulica requisitos básicos agua no facturada sistemas d
fraestructura desarrollo de capacidades reducción de pérd
sostenibilidad estallidos de tubería control activo de fugas
icos balance hídrico pérdidas aparentes reparación de fug
s de información métodos de intervención distrito hidrom
ción de pérdidas de agua estudios de caso monitoreo gest
trol activo de fugas pérdidas reales detección de fugas ind

Guía para la reducción de las pérdidas de agua

ctura desarrollo de capacidades reducción de pérdidas de
ad estallidos de tubería control activo de fugas pérdidas
omicos balance hídrico pérdidas aparentes reparación de
e información métodos de intervención distrito hidromé
idas de agua estudios de caso monitoreo gestión de la pr
pérdidas reales detección de fugas indicadores de desem
gas modelación hidráulica requisitos básicos agua no factu
métrico gestión de la infraestructura desarrollo de capaci
ión de la presión estrategia sostenibilidad estallidos de tu
licadores de desempeño impactos económicos balance hí

Índice

1 Introducción a la guía ... 23
1.1 Objetivo y antecedentes ... 23
1.2 Estructura de este manual técnico ... 26

2 Introducción a la reducción de pérdidas de agua ... 29
2.1 La necesidad de reducir las pérdidas de agua ... 30
2.1.1 Pérdidas de agua – un problema global ... 30
2.1.2 Reducción de las pérdidas de agua para el desarrollo sostenible ... 33
2.1.3 Marco político y financiero para una gestión eficiente y sostenible de las pérdidas de agua ... 34
2.1.4 Desarrollo de capacidades en el campo de reducción de pérdidas de agua ... 36
2.1.5 Los cuatro métodos centrales de intervención para combatir las pérdidas reales de agua ... 37
2.2 Gestión de la presión ... 39
2.2.1 Principios ... 39
2.2.2 Tecnología y modo de operación ... 40
2.2.3 Beneficios de la gestión de la presión ... 42

3 Entender las pérdidas de agua ... 45
3.1 Objetivos ... 46
3.2 Definiciones y terminología ... 47
3.3 Factores clave de influencia ... 49
3.4 Pérdidas reales ... 50
3.4.1 Clasificación ... 50
3.4.2 Hidráulica de las fugas ... 52
3.4.3 Causas de las pérdidas reales ... 54
3.4.4 Impactos de las pérdidas reales ... 59
3.5 Pérdidas aparentes ... 62
3.5.1 Clasificación ... 62
3.5.2 Razones de las pérdidas aparentes ... 62
3.6 Desperdicio ... 64
3.7 Resumen y pasos siguientes ... 65

4 Desarrollo de una estrategia técnica para la reducción de pérdidas de agua ... 67
4.1 Objetivos ... 68
4.2 La necesidad de manejar las pérdidas de agua ... 69
4.3 Análisis de la situación actual ... 71

4.3.1 Diagnóstico preliminar del sistema ... 71
4.3.2 Determinación del balance hídrico ... 71
4.3.3 Confiabilidad de los cálculos de balance hídrico ... 75
4.3.4 Evaluación y cuantificación de pérdidas reales de agua ... 77
4.3.5 Evaluar y cuantificar las pérdidas aparentes de agua ... 81
4.3.6 Cálculo y análisis de los indicadores de desempeño relevantes ... 82
4.3.7 Evaluación de ahorros potenciales ... 89
4.4. Identificaciónd de medidas apropiadas ... 91
4.4.1 Métodos de selección ... 91
4.4.2 Definición del nivel económico de fuga ... 93
4.4.3 Fijación de metas ... 95
4.5 Diseño e implementación de un programa de control de pérdidas de agua ... 98
4.5.1 Plan de acción ... 98
4.5.2 Selección e implementación de métodos de intervención ... 99
4.5.3 Evaluación de los resultados ... 99
4.6 Resumen y pasos siguientes ... 101

5 Requisitos de los datos básicos para el manejo sostenible de las pérdidas de agua ... 103
5.1 Objetivos ... 104
5.2 Sistemas de información y manejo de las pérdidas de agua ... 105
5.2.1 Información: Un requisito para el manejo eficiente de las pérdidas de agua ... 105
5.2.2 Descripción de sistemas de información relevantes ... 106
5.2.3 Integración en un SIG abarcador ... 108
5.2.4 Definición de objetivos ... 109
5.3. Elementos básicos del SIG ... 110
5.3.1 Definición de un sistema de información geográfico ... 110
5.3.2 Nivel de implementación ... 110
5.3.3 Necesidades de los usuarios del SIG ... 111
5.3.4 Tipos de datos ... 112
5.3.5 Estructura de datos del SIG ... 114
5.3.6 Recolección, conversión e integración de datos ... 114
5.4. Base cartográfica ... 116
5.4.1 Datos de ingreso para la base cartográfica ... 116
5.4.2 Contenidos de la base cartográfica ... 116
5.4.3 Consideraciones sobre la calidad de los datos ... 117
5.5. Registro de red ... 119
5.5.1. Objetivos ... 119
5.5.2. Datos que ingresan al registro de la red ... 119
5.5.3. Estructura de datos ... 120
5.5.4. Registro de red y fuga ... 122
5.5.5. Lanzamiento de registro de redes y modelo hidráulico ... 123
5.6. Modelo de red hidráulica ... 125
5.6.1. Definiciones y objetivos ... 125
5.6.2. Fundamentos de la modelación hidráulica ... 125

5.6.3. Datos ingresantes ... 129
5.6.4. Establecimiento del modelo ... 129
5.7. Base de datos de fallas ... 131
5.7.1. Objetivos ... 131
5.7.2. Recolección de datos de fallas ... 132
5.7.3. Análisis de fallas ... 133
5.7.4. Conexión entre la tasa de fallas y la presión del sistema ... 134
5.8. Sistemas de información sobre el cliente (SIC) ... 136
5.8.1. Objetivos ... 136
5.8.2. Componentes del SIC ... 136
5.9. Resumen y pasos siguientes ... 140

6 Métodos e instrumentos para reducir las pérdidas reales de agua ... 143
6.1. Objetivos ... 144
6.2. Acción contra las pérdidas reales de agua ... 145
6.2.1 Programación de intervenciones ... 145
6.2.2 Elección de métodos de intervención apropiados ... 147
6.3. Distritos hidrométricos (DHMs) ... 148
6.3.1 Definición y propósitos de los DHMs ... 148
6.3.2 Diseño de los DHMs ... 149
6.3.3 Implementación de un DHM ... 151
6.3.4 Operación y gestión ... 152
6.4. Gestión de la presión ... 155
6.4.1 Definición y propósito de la gestión de la presión ... 155
6.4.2 Conceptos de modulación ... 157
6.4.3 Tipos de válvulas reductora de presión (VRPs) ... 161
6.4.4 Tipos de sectores de gestión de la presión ... 170
6.4.5 Planeamiento y diseño ... 170
6.4.6 Limitaciones de la gestión de la presión ... 177
6.5 Control activo de fugas (CAF) ... 179
6.5.1 Definición y propósito del control activo de fugas ... 179
6.5.2 Métodos para la percepción ... 180
6.5.3 Métodos de detección de fugas ... 182
6.5.4 Métodos de ubicación de fugas ... 184
6.6 Reparación de fugas ... 187
6.6.1 Propósito ... 187
6.6.2 Cuestiones organizativas y procedimientos operativos ... 187
6.6.3 Ejecución de trabajos de reparación ... 188
6.7 Gestión de la infraestructura ... 189
6.7.1 Revisión general ... 189
6.7.2 Factores que contribuyen al deterioro de la infraestructura de la empresa ... 189
6.7.3 Recolección y organización de información sobre los activos ... 191
6.7.4 Análisis de datos ... 192

6.7.5 Integración de datos y toma de decisiones ... 193
6.8 Resumen y pasos siguientes ... 196

7 Estudios de Caso ... 199
7.1 Módulos de capacitación en GP – El ejemplo de Lima, Perú ... 201
7.1.1 Antecedentes ... 201
7.1.2 Desarrollo del proceso – El enfoque del centro de capacitación ... 202
7.1.3 Logros e impactos ... 203
7.1.4 Lecciones aprendidas ... 203
7.1.5 Referencias ... 203
7.2 Reducción de las pérdidas de agua por gestión de la presión – El ejemplo de Santo Amaro, Brasil ... 205
7.2.1 Antecedentes ... 205
7.2.2 Desarrollo del proceso ... 206
7.2.3 Resultados y buenas prácticas ... 206
7.2.4 Lecciones aprendidas ... 207
7.2.5 Referencias ... 207
7.3 Modelación hidráulica – El ejemplo de Ouagadougou, Burkina Faso ... 209
7.3.1 Antecedentes ... 209
7.3.2 Desarrollo del proceso – modelación hidráulica ... 210
7.3.3 Resultados y estrategia ... 211
7.3.4 Mejores prácticas ... 212
7.3.5 Lecciones aprendidas ... 212
7.3.6 Desarrollo ulterior/perspectivas futuras ... 212
7.3.7 Referencias ... 213
7.4 Pérdidas de agua reducidas hasta el 40% – El ejemplo de Ain Al Basha, Jordania ... 215
7.4.1 Antecedentes ... 215
7.4.2 Desarrollo del proceso ... 215
7.4.3 Buenas prácticas ... 216
7.4.4 Lecciones aprendidas ... 217
7.4.5 Referencias ... 217
7.5 Reducción de las pérdidas aparentes de agua – El ejemplo de Huaraz, Perú ... 219
7.5.1 Relevancia ... 219
7.5.2 Desarrollo del proceso ... 221
7.5.3 Resultados y buenas prácticas ... 222
7.5.4 Lecciones aprendidas ... 222
7.5.5 Referencias ... 223

Referencias ... 225
Lista de abreviaturas ... 233
Pie de imprenta ... 236

Foto: © A. Knobloch, 2009

Sinopsis

Introducción a la guía 1

Introducción a la reducción de pérdidas de agua 2

Entender las pérdidas de agua 3

Desarrollo de una estrategia técnica para la reducción de pérdidas de agua 4

Requisitos de los datos básicos para el manejo sostenible de las pérdidas de agua 5

Métodos e instrumentos para reducir las pérdidas reales de agua 6

Estudios de caso 7

Foto: © F. Boyer, 2010

Introducción a la guía

1

1.1 Objetivo y antecedentes

Esta guía tiene como objetivo impartir conocimiento sobre la reducción de las pérdidas de agua a quienes toman las decisiones y a las partes interesadas a nivel nacional, así como al equipo de gestión, al departamento de planeamiento y diseño y al personal operativo de las empresas de agua en los países en desarrollo y en transición. La guía está acompañada por materiales de desarrollo de capacidades así como de la implementación de proyectos piloto para transferir conocimiento e implementar tecnología de la gestión de la presión (GP) de última generación.

(a) Guía para la reducción de las pérdidas de agua

La estructura general de la lineamientos para la reducción de las pérdidas de agua consiste en:

- un folleto resumen para quienes toman las decisiones
- este manual técnico y
- materiales suplementarios.

Los materiales sirven para proporcionar a las autoridades del sector agua, del servicio público de agua y a los gremios profesionales toda la información requerida para entender el origen, naturaleza e impacto de las pérdidas de agua, de tal manera que se desarrolle e implemente una contra-estrategia a la medida y para elegir los métodos e instrumentos más eficientes para la reducción de pérdidas de agua.

Existen varios tipos de pérdidas de agua y hay muchas causas y factores diferentes que influencian la cantidad y el tipo de agua que se pierde en una red de distribución de agua. Sin conocimiento apropiado de la naturaleza de las pérdidas de agua, es entonces imposible encontrar las soluciones correctas y más eficientes para reducirlas. Por lo tanto, el primer objetivo de esta guía para la reducción de pérdidas de agua es proporcionar un buen entendimiento de las pérdidas de agua de manera que se pueda encontrar respuestas a las siguientes preguntas básicas: ¿Dónde está perdiendo agua el sistema, cómo se pierde el agua, por qué se pierde y cuánto se pierde? Reducir las pérdidas de agua es usualmente un emprendimiento caro y que toma tiempo. Por lo tanto el segundo objetivo de la guía es mostrar por qué es importante y por qué generalmente es muy rentable para una empresa de agua tomar acción contra las pérdidas de agua. Finalmente, la guía presentará métodos y tecnologías de última generación para evaluar y reducir las pérdidas de agua, concentrándose especialmente en la gestión de la presión como un instrumento poderoso para reducir las pérdidas reales de agua.

La guía tiene tres grupos objetivo: El primer grupo consiste en los que toman las decisiones desde los ministerios nacionales del agua, pasando por las autoridades, las empresas de agua hasta los gremios profesionales dentro del sector agua. El folleto *Resumen* los hará

conscientes de la importancia de la reducción de pérdidas de agua y les proveerá información breve sobre el potencial que tiene la gestión de la presión para reducir las pérdidas reales de agua. El manual técnico se dirige hacia el segundo grupo: principalmente directores técnicos, ingenieros y técnicos que trabajan para las empresas de agua. Los materiales suplementarios se dirigen a los técnicos y al personal operativo de las empresas de agua.

Todos los documentos estarán disponibles como copias duras y también se pueden bajar gratuitamente de la página web del proyecto: *www.waterlossreduction.com*.

(b) Materiales de desarrollo de capacidades

Esta guía para la reducción de pérdidas de agua provee pericia a nivel económico, técnico, social y ambiental de la gestión de pérdidas de agua en general y de la gestión de la presión en particular.

Se ha desarrollado un conjunto de módulos de capacitación que complementan la guía como instrumento para el desarrollo de capacidades y dicho conjunto ha sido diseñado para enseñar al personal del sector público y privado aspectos de la reducción de pérdidas de agua. Los módulos de capacitación toman en consideración las condiciones marco específicas en los países en desarrollo y en transición y permitirá a los participantes comprender los beneficios y el potencial de la reducción de pérdidas de agua como una contribución hacia el desarrollo sostenible.

Los módulos de capacitación están disponibles en la página web del proyecto y tienen como objetivo ser notas de lectura para talleres y seminarios.

Sin embargo, la necesidad de desarrollo de capacidades en reducción de pérdidas de agua varía grandemente para distintos países y empresas de agua. Se requiere estrategias de desarrollo de capacidades específicas al país para empoderar a las partes interesadas nacionales de modo que logren una reducción exitosa de las pérdidas de agua. Consecuentemente, estas sesiones de capacitación deberían formar parte de una estrategia integral de desarrollo de capacidades *(véase Capítulo 2.1.4)*.

(c) Implementación de proyectos piloto

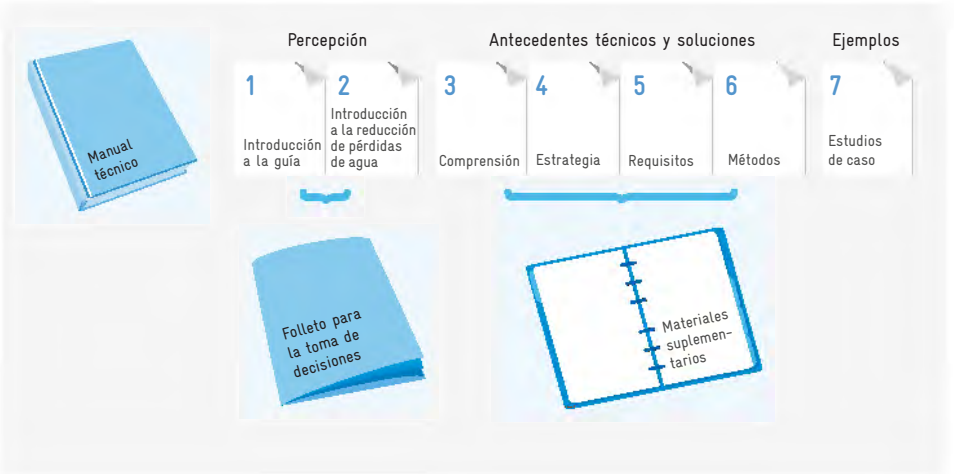
Otra medida que acompaña a la guía para la reducción de pérdidas de agua es la implementación de proyectos piloto en cooperación con las empresas de agua que estén interesadas. El objetivo de los proyectos piloto es demostrar la aplicabilidad y eficiencia de la gestión de la presión como una medida de corto a mediano plazo para combatir las pérdidas reales de agua. Durante los últimos cinco años, VAG ha instalado exitosamente varios sistemas de gestión de presión en Ain El Basha (Jordania), Santo Amaro y Belo Horizonte (Brasil) así como en Lima (Perú), entre otros. VAG entonces no posee solamente la tecnología, sino también un equipo muy experimentado. Se puede encontrar más detalles sobre estos proyectos en los estudios de caso seleccionados en el *Capítulo 7*.

Al momento de escribir este manual, se estaba realizando preparativos para implementar proyectos piloto en Saida (Líbano) y Ouagadougou (Burkina Faso).

1.2 Estructura de este manual técnico

Esta guía está compuesta de *tres conjuntos de documentos*, tal como se muestra en la *Figura 1.1*: el manual técnico con su prefacio y capítulo introductorio, cuatro capítulos técnicos y un capítulo que presenta los estudios de caso. El capítulo introductorio, que elevará el nivel de consciencia sobre la importancia de reducir las pérdidas de agua, se resume también en un folleto separado para quienes toman las decisiones. Los cuatro capítulos técnicos están acompañados por un conjunto de materiales suplementarios que ofrecen ideas detalladas en temas seleccionados.

Figura 1.1 Componentes y estructura de la guía para la reducción de pérdidas de agua



El manual técnico termina con una *lista de referencias* que incluye toda la literatura que se ha utilizado para elaborar este manual. Las referencias están indicadas en el texto por medio de cifras entre paréntesis, por ejemplo [0].

Los contenidos del manual técnico siguen los cinco pasos principales descritos en la *Figura 1.2*. Esta secuencia se sigue desde los *Capítulos 2* hasta el *6* del manual. Sin embargo, cada capítulo es modular y se puede leer independientemente de los otros según las necesidades del lector. Todos los capítulos tienen la misma estructura y comienzan con los objetivos del capítulo. Cada capítulo termina con un resumen corto para evaluar las lecciones aprendidas y prever los pasos siguientes.

Figura 1.2 Contenidos del manual técnico

Foto: © A. Knobloch, 2009

Introducción a la reducción de pérdidas de agua

2

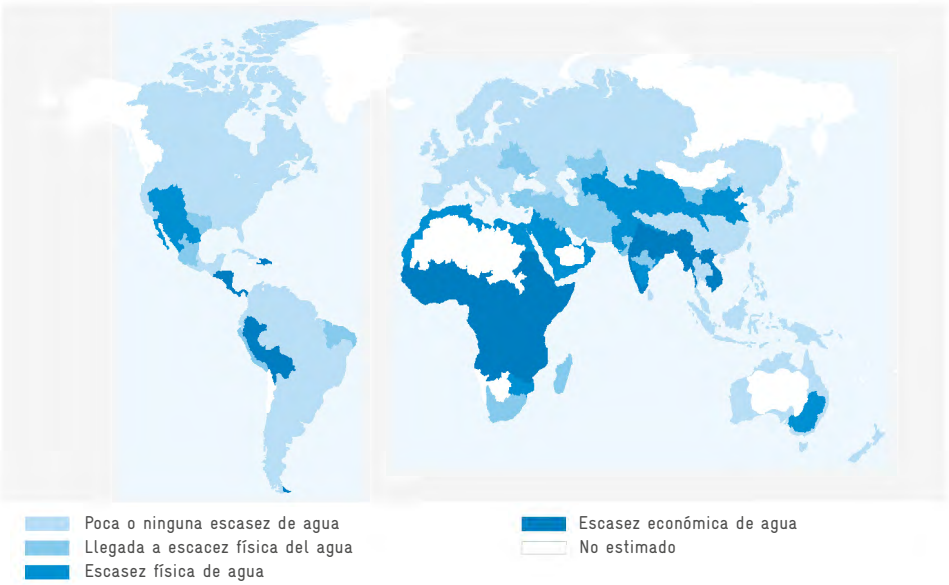
2.1 La necesidad de reducir las pérdidas de agua

2.1.1 Pérdidas de agua – un problema global

El agua es un recurso vital sin importar dónde vivamos en el mundo. El agua dulce no es solamente indispensable para la alimentación humana sino también un producto primario importante para la producción industrial y agrícola. Por lo tanto, la disponibilidad de agua dulce se relaciona directamente con el bienestar y la prosperidad de nuestra sociedad.

Sin embargo, el agua dulce es un recurso limitado y a veces incluso escaso. Los rápidos cambios mundiales, como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico, la migración y la urbanización están poniendo nuevas presiones sobre los recursos de agua y sobre la infraestructura que suministra agua potable a los ciudadanos, las empresas, las industrias y las instituciones. [91] Sin embargo las barreras políticas, financieras y/o técnicas pueden impedir una distribución igual del agua, incluso en regiones en donde la presencia física del agua es suficiente. Este efecto, que se conoce como escasez económica afecta a un gran número de países, especialmente en el África Subsahariana, el Medio Oriente y el Sur de Asia, pero también América del Sur y Central, como lo ilustra la *Figura 2.1*.

Figura 2.1 Distribución global de la escasez física y económica del agua, según [86]

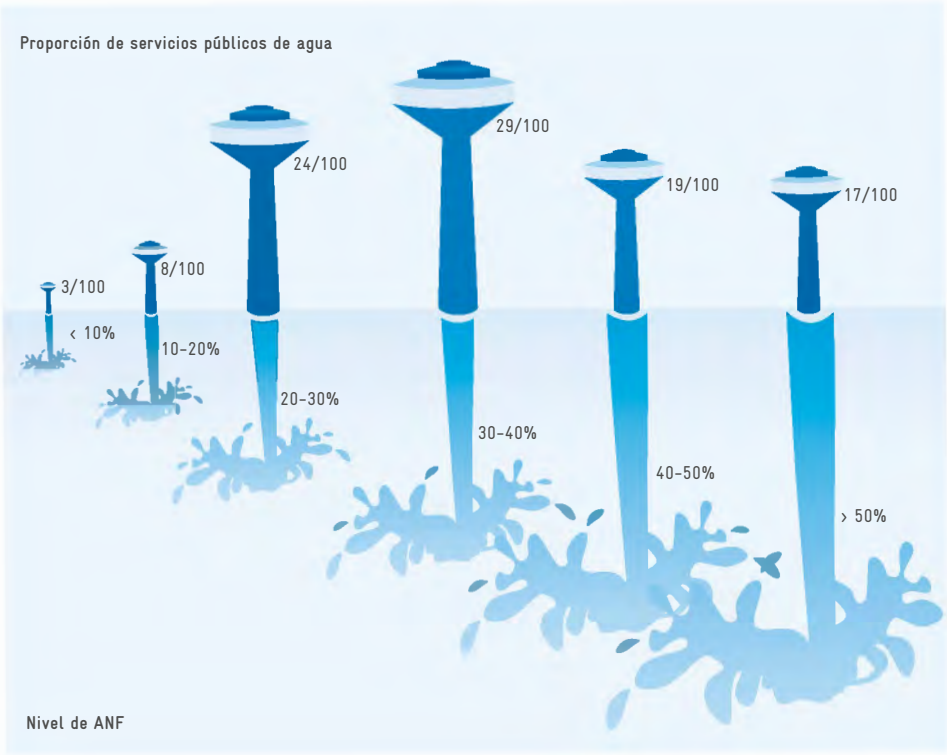


La enorme cantidad de agua perdida por fugas en las redes de distribución urbana de agua (pérdidas físicas o *reales* de agua) y los volúmenes de agua distribuidos sin facturación (pérdidas de agua *aparentes*) pueden ser los elementos que complican la situación de suministro de agua, especialmente en los países en desarrollo y en transición. Las pérdidas de agua reales y aparentes, junto con el consumo autorizado no facturado (por ejemplo para abastecer las troncales anti incendios), constituyen la cantidad de agua no facturada (ANF) en un sistema de suministro.

En base a un estudio que cubre 40 empresas de agua en el sudeste de Asia y a la base de datos IBNET sobre el desempeño de as empresas de agua que cubre más de 900 servicios públicos en el mundo, el Banco Mundial estima que *la cifra actual para todos los niveles de ANF en el mundo en desarrollo está probablemente en el rango de 40 - 50 % del agua producida.* [1] [39]

La *Figura 2.2* muestra la proporción de empresas de agua y su nivel respectivo de ANF según la base de datos IBNET.

Figura 2.2 Niveles de ANF en empresas de agua en el mundo en desarrollo, según la base de datos de IBNET [39]



La recuperación de parte del agua perdida a través de las medidas de reducción de pérdidas de agua representa a menudo una alternativa económica a explotar nuevos recursos a través de medidas de gran costo, como nuevas represas, pozos profundos o desalinización del agua de mar.

Incluso si se usa una cifra más conservadora que pone el nivel promedio de pérdidas de agua en 35% del insumo del sistema, el Banco Mundial estima que el volumen anual de ANF en los países en desarrollo está en el rango de 26,7 mil millones de m³, lo cual representa aproximadamente USD 5,9 mil millones que pierden las empresas de agua cada año. [39] La reducción de esta cantidad de pérdida de agua a la mitad generaría ganancias considerables y suficiente agua para suministrar agua a 90 millones de personas más en los países en desarrollo.

Estas cifras son asombrosas, pero puede ser difícil entenderlas debido a su enorme tamaño. Por lo tanto es útil mirar más de cerca el problema en una escala más pequeña: las pruebas de descarga por fuga muestran que la pérdida de agua de un agujero circular único con 6 mm de diámetro *(tal como se ilustra en la Figura 2.3)* en una tubería de distribución a una presión de 60 m resulta en 1,8 m³ por hora o 1.300 m³ al mes. Este caudal sería suficiente para llenar una piscina olímpica (50 x 25 x 2 = 2.500 m³) en menos de dos meses. El mismo caudal de agua teóricamente sería suficiente para atender a 317 habitantes en la ciudad de Moshi, Tanzania. [37]

Figura 2.3 La tasa del flujo de fuga de un único agujero de 6 mm y el volumen equivalente de agua

Se debe recordar que estas enormes cantidades perdidas se deben a un pequeño agujero. Considerando cuántos de estos huecos puede tener una gran red de distribución de agua,

resulta claro que tomar acción contra las pérdidas de agua es crucial. No solamente es esencial por razones éticas para suministrar agua potable segura a más gente y para reducir la expansión de enfermedades provenientes del agua, sino que también mitigaría problemas ambientales y aliviaría la presión sobre fuentes de agua escasas. Más aun, esta acción ahorraría energía para el tratamiento del agua y el bombeo. Por último, la reducción de pérdidas de agua incrementará los ingresos generados por los servicios públicos de agua privados o municipales, y mejorará la prosperidad de los clientes comerciales y domésticos.

2.1.2 Reducción de las pérdidas de agua para el desarrollo sostenible

El término *desarrollo sostenible* significa nada menos que empresas exitosas que faciliten una mayor prosperidad y oportunidades más equitativas así como usos de los recursos naturales de una manera que los preserve para las generaciones futuras. La sostenibilidad requiere que se consideren los aspectos económicos, técnicos, sociales y ecológicos y que se relacione varios campos y niveles de la sociedad.

El *Consenso sobre el Agua de Estambul (5to Foro Mundial del Agua, Estambul, 2009)* también enfatiza la importancia de una *gestión equitativa, óptima y sostenible de los recursos de agua* para manejar las crecientes demandas debido a *el crecimiento poblacional, el desarrollo económico, la migración y la urbanización*, así como a los efectos negativos del cambio climático. [91]

En cuanto a operar sistemas de suministro de agua, las pérdidas de agua son un claro obstáculo a la sostenibilidad, como lo muestra la siguiente lista de impactos potenciales:

- **Impactos económicos:** Costos de explotar, tratar y transportar agua perdida en su camino al cliente sin generar ningún ingreso para la empresa de agua. Los estallidos de tuberías y las fugas necesitan obras de reparación caras y también pueden causar daños considerables a la infraestructura adyacente.
- **Impactos técnicos:** Las fugas llevan a una cobertura reducida de la demanda existente de agua, posiblemente tanto que el sistema ya no pueda operar continuamente. El suministro intermitente causará problemas técnicos adicionales debido a que los clientes penetran las tuberías desde afuera e instalan tanques de almacenamiento privados.
- **Impactos sociales:** Las pérdidas de agua resultan en una afectación adversa a los clientes por fallas en el suministro, como presión baja, interrupciones del servicio y suministro desigual, pero también por riesgos a la salud que pueden surgir de la infiltración de aguas residuales y otros contaminantes en los sistemas de tuberías con baja presión o suministro intermitente.

- **Impactos ecológicos:** La compensación de las pérdidas de agua aumentando cada vez más la extracción de agua pone una presión adicional sobre los recursos de agua y requiere energía adicional, causando de este modo emisiones de dióxido de carbono que se podrían haber evitado.

Estos pocos ejemplos demuestran de manera impresionante que la pérdida de agua perjudica todos los aspectos de operar un sistema de suministro de agua sosteniblemente. Las empresas de agua en todo el mundo deberían por lo tanto esforzarse por analizar, cuantificar, combatir y reducir las pérdidas físicas y aparentes de agua en sus sistemas de suministro de agua. Una reducción exitosa y sostenible en las pérdidas de agua requiere un marco político y financiero que aliente las actividades de reducción de pérdidas de agua por medio de regulaciones vinculantes, incentivos, comparaciones y fijación de metas de reducción de fugas.

2.1.3 Marco político y financiero para una gestión eficiente y sostenible de las pérdidas de agua

El marco que rodea la gestión de pérdidas de agua y la reducción de pérdidas de agua (RPA) es complejo e involucra muchos componentes. Una gestión eficiente y sostenible de las pérdidas de agua necesita no sólo que se encuentre e implemente soluciones técnicas, sino también que se considere los aspectos financieros y gerenciales. Se debe tomar en cuenta los siguientes factores, que son cruciales para el éxito de la gestión de pérdidas de agua, cuando se comienza a desarrollar un proceso exitoso:

- ¿Qué condiciones marco pueden considerarse como una oportunidad o como un obstáculo a la RPA? (Leyes y políticas sobre el agua; estructura de las empresas de agua incluyendo la participación del sector privado)
- ¿Es la RPA un objetivo para las empresas de agua y lo promueven activamente?
- ¿Cuáles son los posibles incentivos para que las empresas de agua implementen la RPA?
- ¿Qué instrumentos financieros favorecen o inhiben las medidas de RPA? (Subsidios, estructura tarifaria del agua, inversiones privadas, recuperación del costo)
- ¿Qué instituciones y partes privadas promueven la RPA? ¿Qué situaciones institucionales o estructurales son oportunidades u obstáculos para la RPA?
- ¿Debe considerarse los factores externos, como las especificidades culturales o asuntos ambientales?

Aspectos políticos

Muchos países ya tienen una estrategia del agua y consideran que la reducción de pérdidas de agua es importante. Sin embargo, su implementación a menudo es compleja ya que requiere nuevas formas de compartir responsabilidades y un cambio en el comportamiento tradicional de los consumidores.

Los procesos de reforma relacionados al buen gobierno del agua son usualmente complejos y lentos. La estrategia del sector agua del Ministerio Federal Alemán para la Cooperación y el Desarrollo Económicos también enfatiza esto: *« incluso si existen buen gobierno, participación, instituciones y capacidades, la implementación de procesos de reforma integrales puede tomar muchos años. Los factores de éxito incluyen una base viable y robusta para cooperar con quienes toman las decisiones y con el personal de instituciones sectoriales clave, el involucramiento apropiado de los representantes de grupos de interés, especialmente los grupos de personas pobres y desfavorecidas, así como suficiente voluntad por parte de los participantes para realizar la reforma. »* [24] La reducción de pérdidas de agua se deja de lado en algunas ocasiones, incluso si presenta soluciones más económicas que explotar recursos alternativos de agua como por ejemplo la desalinización.

Aspectos financieros

Los costos fijos pueden representar alrededor de 80% de los costos de suministro del agua, mientras que los costos variables a menudo representan alrededor del 20%. Esto implica efectos en la motivación de distintos actores ya que los ahorros de costos pueden considerarse a menudo como marginales. Sin embargo, la capacidad que tiene la RPA de mejorar el desempeño de las empresas y reducir los costos operativos debe comprenderse de manera inmediata.

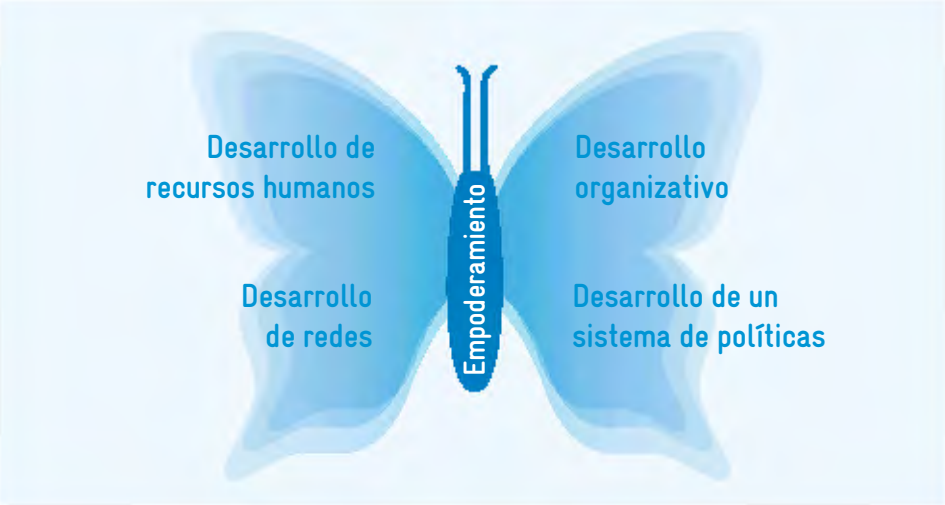
Aspectos gerenciales y otros

La reducción de pérdidas de agua en el largo plazo será exitosa solamente si se compromete plenamente a la alta gerencia de las empresas de agua. Los beneficios e incentivos apropiados son factores adicionales que pueden motivar a todo el personal. Las mejoras organizativas como la sectorización de las redes con flujos ingresantes medidos en sectores de gestión de la presión (SGP) y distritos hidrométricos (DHM) ayudan a identificar, definir y manejar las pérdidas reales. La medición eficaz de los clientes ayuda a cuantificar el agua que no produce ingreso y a reducir el desperdicio. La mejora de la consciencia pública puede contribuir a reducir las pérdidas de agua, por ejemplo, a reportar fugas y reducir el desperdicio del agua.

2.1.4 Desarrollo de capacidades en el campo de reducción de pérdidas de agua

El desarrollo de capacidades es el proceso de fortalecer las habilidades de los individuos, organizaciones, compañías y sociedades para hacer uso eficaz y eficiente de los recursos de modo que alcancen sus propias metas sobre una base sostenible. Se puede distinguir varios aspectos interconectados del desarrollo de capacidades, como lo ilustra la *Figura 2.4*.

Figura 2.4 Interconexión entre varios elementos del desarrollo de capacidades, según [94]



En el contexto de esta guía el desarrollo de capacidades primero que nada comprende la transferencia de conocimiento, experiencia, habilidades y valores para empoderar a las partes interesadas del país a cosechar los beneficios de una reducción exitosa de las pérdidas de agua. Además implica mejorar los sistemas de gestión y extender la red. La gestión del cambio y la mediación en situaciones de conflicto son partes esenciales del desarrollo organizativo.

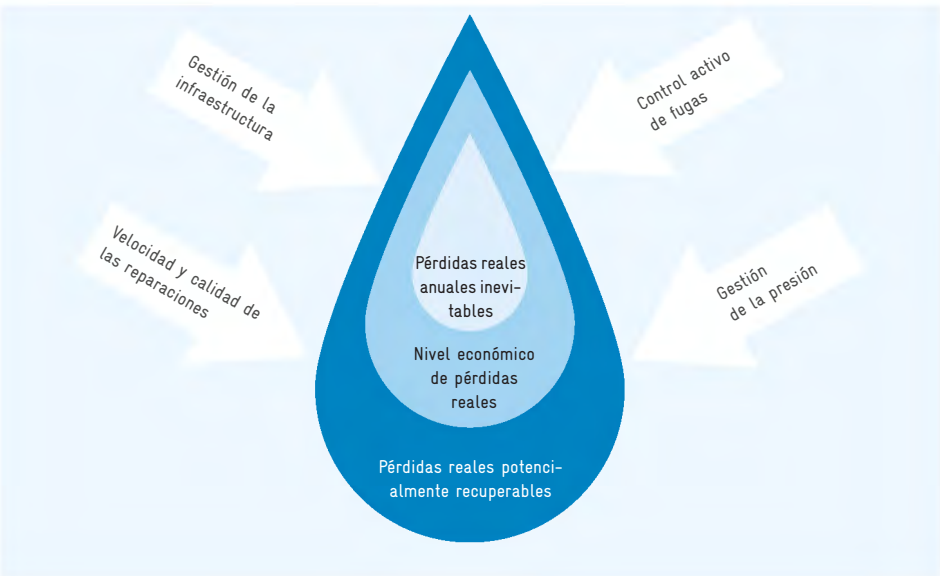
Cuando los que toman las decisiones a nivel nacional y local eligen integrar los métodos e instrumentos de reducción de pérdidas de agua en sus sistemas de gestión del agua, se debe adaptar el marco legal e institucional. Además, las partes interesadas del gobierno y las empresas necesitan comprender profundamente las implicaciones de su decisión. Se debe diseñar y acordar con las partes interesadas una estrategia integral de desarrollo de capacidades. Se puede realizar la capacitación por medio de organismos bilaterales y multilaterales o en cooperación con ellos. Dependiendo del grupo objetivo (quienes toman las decisiones, personal ejecutivo y/u operadores), los objetivos de la estrategia de desarrollo de capacidades podrían

incluir el adquirir mayor información sobre asuntos legales, técnicos, ambientales y financieros relacionados a la reducción de pérdidas de agua en general y a la gestión de la presión en particular. Debido a que las condiciones varían de un país a otro, debe acordarse una estrategia de desarrollo de capacidades individual y diseñada cuidadosamente, incluyendo un concepto de capacitación integral.

2.1.5 Los cuatro métodos centrales de intervención para combatir las pérdidas reales de agua

A lo largo de las dos décadas pasadas, se ha desarrollado muchos métodos que hoy en día se reconocen como tecnologías de última generación para reducir las pérdidas de agua. No obstante, muchas empresas de agua en todo el mundo todavía no han implementado estrategias sostenibles de gestión de pérdida de agua a pesar de los obvios beneficios. Esta guía resume la situación actual de las tecnologías de reducción de pérdidas de agua y deberá servir como incentivo y guía para aquellas empresas de agua que quieran utilizar el enorme potencial oculto de la reducción de pérdidas de agua.

Figura 2.5 Los cuatro métodos de intervención centrales para combatir las pérdidas reales de agua, según [69]



Como este manual técnico mostrará más adelante en mayor detalle, hay muchos factores diferentes que influencian la ocurrencia y tamaño de las pérdidas reales en una red de distribución de agua. Antes de decidir qué métodos de intervención son apropiados, una empresa de agua tiene que comprender entonces qué factores se atribuyen a las pérdidas reales en su sistema particular. Un método único o una combinación de distintos métodos constituirán el instrumento más eficiente y económico para la reducción de las pérdidas de agua dependiendo de la situación local.

En 2003, el IWA Water Loss Task Force (grupo de trabajo en pérdidas de agua de la IWA) definió los cuatro métodos principales de intervención para combatir las pérdidas de agua reales tal como se ilustra en la *Figura 2.5 en la página anterior:* gestión de la presión, control activo de fugas, velocidad y calidad de las reparaciones, así como gestión de la infraestructura. [69]

El *Capítulo 6* de este manual explica las cuatro metodologías en detalle. Se coloca énfasis especial en la gestión de la presión como un método de intervención muy eficiente en el corto y mediano plazo, el que también se presentará brevemente en la siguiente sección.

2.2 Gestión de la presión

2.2.1 Principios

Se puede definir la gestión de la presión como la *práctica de manejar presiones del sistema a niveles óptimos de servicio a la vez que se asegura un suministro suficiente y eficiente para usos legítimos*. [78] Los efectos positivos de la gestión de la presión son el reducir las pérdidas reales de agua, disminuyendo las presiones innecesarias o excesivas así como eliminando la fluctuación de presiones fuertes o transitorias. Estos factores frecuentemente causan nuevas roturas y estallidos de tuberías dentro de las redes de distribución del agua. La relación directa entre el caudal de las fugas y la presión significa que la gestión de la presión es el único método de intervención que permite tener un impacto positivo en los tres componentes de las pérdidas reales de agua: las fugas de fondo, las fugas reportadas y las no reportadas *(véase Capítulo 3.4)*.

La tasa del flujo de las fugas está conectada directamente a la presión del agua en la tubería defectuosa y se puede calcular utilizando la *Ecuación 3.1 en la página 52* para una fuga en particular. Para regresar al ejemplo del agujero de 6mm del *Capítulo 2.1.1*, el impacto de la reducción de la presión en el caudal de la fuga se puede calcular fácilmente tal como se ilustra en la *Tabla 2.1*.

Tabla 2.1 Caudales de fuga de un agujero de 6mm para distintas presiones y materiales de tuberías

Ø Agujero	Material del tubo	Exponente de fuga	Caudal de fuga a presión de		
			50 m	40 m	30 m
6 mm	Rígido (por ejemplo acero, fierro forjado,...)	0,5	1.800 m³/h	1.610 m³/h	1.394 m³/h
6 mm	Flexible (por ejemplo, PE, PVC...)	1,5	1.800 m³/h	1.288 m³/h	837 m³/h

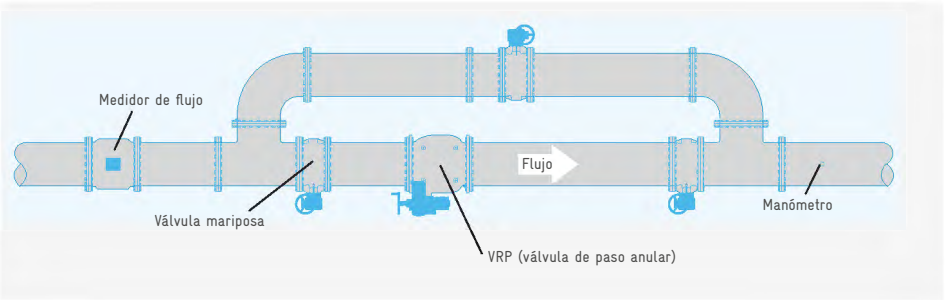
También se puede utilizar la misma ecuación para estimar los efectos de la gestión de la presión en toda una red consistente de materiales combinados de tuberías donde el exponente de fuga general promedio está cerca a 1.0. La relación presión-fuga significa que, como regla general, la proporción de la reducción de la presión equivale aproximadamente a la proporción de reducción del flujo de fuga en las grandes redes.

La relación entre presión y fuga explica por qué todavía puede ser económico manejar o reducir la presión en una red de distribución donde la presión ya es baja: el promedio de reducción de 30 m a 27 m (10%) podría reducir el caudal de fuga en 5% - 15%, lo cual podría ser significativo en regiones con recursos de agua escasos o grandes fugas. [36]

2.2.2 Tecnología y modo de operación

Mientras que existan distintos tipos de gestión de la presión, los pasos e instalaciones básicos son siempre similares: primero, tiene que seleccionarse un sector de gestión de la presión (SGP) conveniente y se lo debe separar de zonas vecinas cerrando válvulas de aislamiento. Enseguida, se debe instalar en el punto de ingreso al SGP una válvula reductora de la presión (VRP) un sensor de presión y un medidor de flujo. En sistemas avanzados de gestión de la presión, un controlador lógico programable (CLP) registra, procesa y archiva los datos de sensores medidos que se necesitan para controlar la VRP.

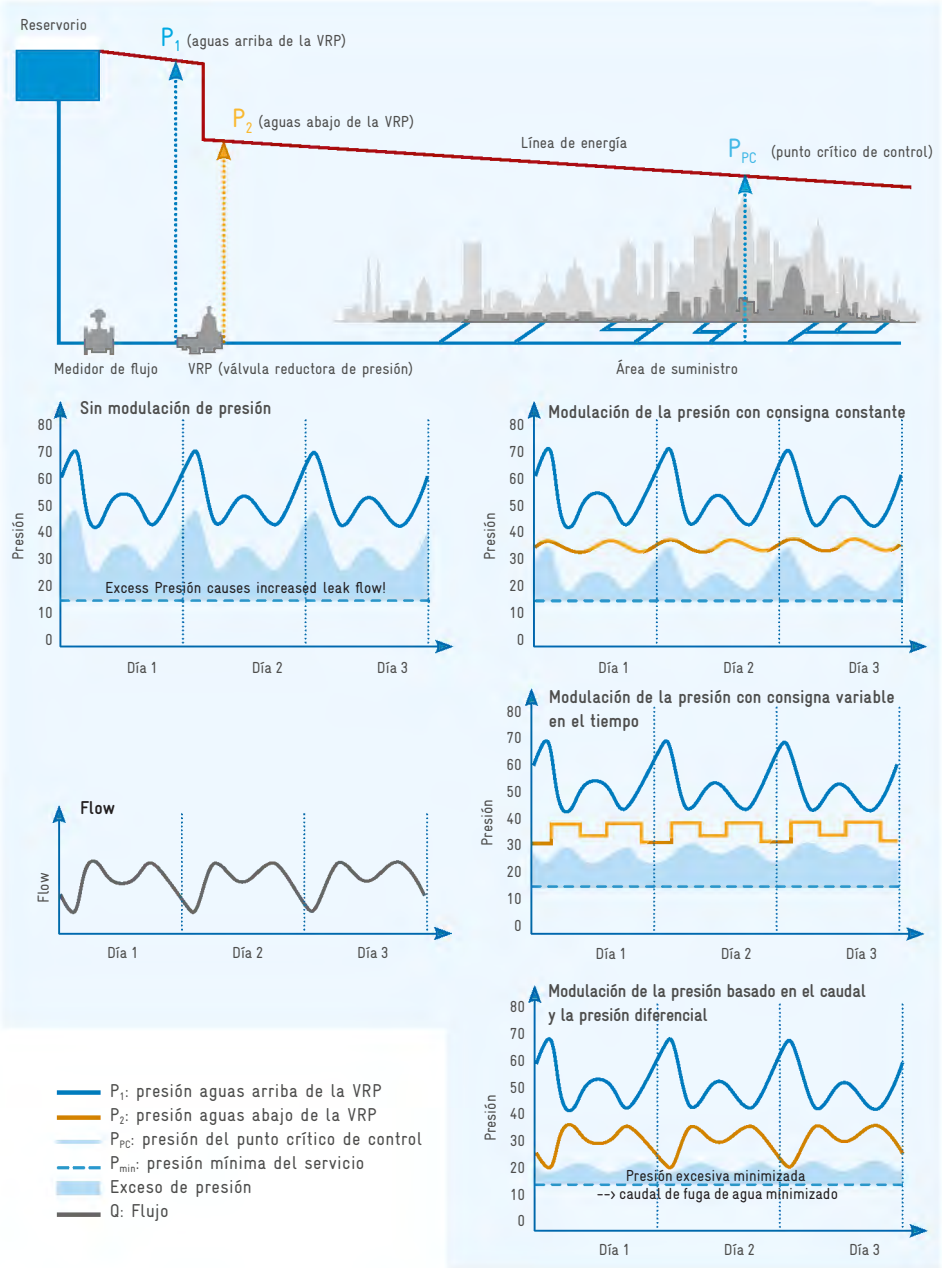
Figura 2.6 Instalación típica de VRP con un bypass y un medidor de flujo (Fuente: VAG-Armaturen)



Hay cuatro maneras básicas de operar la VRP y modular la presión del sistema: [22]

- **Salida fija:** el sistema de control de presión más básico donde se mantiene la presión de salida de la VRP a un nivel elegido en toda ocasión.
- **Modulación de la presión basada en el tiempo:** la presión de salida de la VRP se modula de acuerdo al tiempo, usualmente para reducir la presión durante la noche cuando los caudales son bajas.
- **Modulación de la presión basada en el flujo:** se puede fijar distintas presiones de salida para distintas tasas de flujo de manera que se mantenga la presión requerida mínima en la zona durante flujos pico o para abrir la VRP cuando se excede un flujo umbral (por ejemplo flujo contra incendios).
- **Modulación de la presión de control remoto:** utilizando el tipo más avanzado de modulación de la presión, la presión de salida de la VRP se ajusta continuamente por telemetría desde sensores de presión en uno o más puntos cruciales en el SGP en donde la presión se mantiene estable al nivel deseado.

Figura 2.7 Efectos de distintos conceptos de modulación en presión excesiva en el punto crítico



En redes de distribucción con alimentación directa de bomba, se puede usar bombas centrífugas con velocidad de rotación variable para reducir la presión excesiva en las horas de consumo bajo.

La *Figura 2.7 en la página anterior* ilustra los efectos de estos conceptos de modulación sobre presión excesiva en el punto crítico de una zona de gestión de presión. El punto crítico de una red marca el punto de presión más baja en una zona. Si se puede asegurar una presión mínima de servicio en el punto crítico, la presión será suficiente en todas las demás ubicaciones en la zona. La existencia de una presión excesiva en el punto crítico implica que la gestión de la presión podría reducir las pérdidas evitables de agua.

Los flujos al SGP y la presión de suministro se monitorean constantemente y están disponibles para su revisión y análisis ulterior. Se requiere de ingeniería subterránea para instalar la VRP y los aparatos de medición, pero la inversión inicial es muy pequeña en comparación con los grandes ahorros potenciales. Una tubería de bypass y un gabinete de control local permiten usualmente al operador del sistema invalidar el aparato de control mecánicamente en cualquier momento.

Además de la instalación básica para manejar la presión, se dispone de otras funciones opcionales: se puede utilizar tecnología celular segura para transferir datos a una sala de control donde el operador puede seguir la operación de la VRP en línea. Se puede enviar las fallas al equipo de servicio responsable a manera de una alerta por mensaje de texto reduciendo así significativamente los esfuerzos de operación y mantenimiento.

2.2.3 Beneficios de la gestión de la presión

La gestión de la presión puede ser una solución inmediata y económica para reducir las pérdidas reales de agua en una red de distribución, incluso a presiones iniciales bajas. Sin embargo, la reducción de las fugas no es el único beneficio, tal como ilustra la *Tabla 2.2*:

Tabla 2.2 Beneficios del manejo de la presión [47]

Gestión de presión: reducción de presiones promedio y máximas en exceso						
Beneficios para la conservación		Beneficios para la empresa de agua			Beneficios para el cliente	
Fugas reducidas		Frecuencia reducida de estallidos y fugas				
Consumo reducido	Caudales reducidos de fugas y estallidos	Costos de reparación reducidos en las troncales y servicios	Renovaciones diferidas y mayor vida de activos	Costo reducido del control activo de fugas	Menos quejas de clientes	Menos problemas en las tuberías y aparatos de los clientes

También ofrece beneficios para la conservación del agua porque algunos tipos de consumo de agua declinarán debido a la presión promedio reducida de la zona, por ejemplo de caños, duchas y sistemas de irrigación de jardines. Un estudio del IWA Water Loss Task Force (Grupo de trabajo en pérdidas de agua) descubrió que la reducción de la presión resulta en una disminución significativa de nuevas roturas y estallidos de tuberías. [79] Los beneficios adicionales incluyen reemplazos diferidos y una vida de servicio mayor para las tuberías, uniones y accesorios así como menos problemas en los tubos y aparatos de los clientes.

Material suplementario 2.1

Lista de control para la implementación de la gestión de la presión

Todos estos efectos positivos de la gestión de la presión resultan usualmente en grandes ahorros de agua y de esta manera tienen tiempos muy cortos para recuperar la inversión, tal como se ilustra en las figuras de las cuatro grandes instalaciones de gestión de la presión en Ciudad del Cabo, Sudáfrica que se muestran en la *Tabla 2.3*:

Tabla 2.3 Resumen de ahorros provenientes de cuatro instalaciones de Ciudad del Cabo [56]

Área	Ahorros de agua (m³/año)	Costos de construcción (USD)	Valor de los ahorros (USD / año)
Khayelitsha	9,0 millones	335.000 (en 2001)	3.352.000
Mfuleni	0,4 millones	212.000 (en 2007)	170.000
Gugulethu	1,6 millones	188.000 (en 2008)	603.000
Mitchells Plain	2,4 millones	967.000 (en 2009)	904.000
Total	**13,4 millones m³/año**	**USD 1.702 millones**	**USD 5.029 millones / año (± 600.000)**

Aparte de estos efectos positivos, la gestion de la presión puede generar beneficios adicionales e indirectos:

- un mayor número de hogares con acceso a suministro público de agua
- una mayor duración del suministro de agua (horas/día)
- distribución igual y justa del suministro de agua considerando las restricciones sociales
- costos de producción y consumo de energía reducidos.

Sin embargo, las empresas de agua deberían recordar que la gestión de la presión solamente alivia los impactos, pero no remedia las causas de la pérdida de agua. Por lo tanto, la gestión de la presión debe verse siempre como un componente de un conjunto de medidas requeridas para una reducción exitosa de las pérdidas de agua en el largo plazo. La gestión de la presión puede ser un buen punto de partida para empresas de agua que tienen altos niveles de fuga debido a los ahorros relativamente altos y a los periodos de recuperación de la inversión cortos.

Foto: © T. Tkaczick, 2003

Entender las pérdidas de agua

3

3.1 Objetivos

Al final de este capítulo el lector debería poder:

- utilizar una terminología de pérdidas de agua sin ambigüedad
- comprender el significado y escala de los problemas relacionados a las pérdidas de agua
- distinguir los distintos impactos de las fugas
- comprender el contexto hidráulico
- identificar las razones y los factores más importantes detrás de las pérdidas de agua reales.

3.2 Definiciones y terminología

Establecer un balance hídrico a intervalos regulares proporciona la base para eliminar las pérdidas de agua. En el pasado se utilizó una gran variedad de formatos y definiciones para estos cálculos. La Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés) formó un grupo de trabajo sobre indicadores de desempeño y pérdidas de agua para lograr cifras internacionalmente comparables. En el año 2000 se publicó un documento sobre las mejores prácticas internacionales para calcular los balances hídricos. [48] Un número de países y empresas de agua que se incrementa continuamente en todo el mundo ha reconocido y adaptado desde entonces este balance hídrico. Se aconseja a las empresas de agua seguir la terminología de la IWA, particularmente respecto de las comparaciones nacionales e internacionales.

Los componentes del balance hídrico estándar se ilustran en la *Tabla 3.1*. Los componentes del balance hídrico siempre se deben calcular y expresar sobre un determinado período (usualmente por año). En un segundo paso, se pueden convertir en indicadores de desempeño *(ver Capítulo 4.3.6)*.

Tabla 3.1 Terminología estándar para el balance hídrico de acuerdo con la IWA [48]

Volumen de entrada al sistema Q_I	**Consumo autorizado Q_A**	**Consumo autorizado facturado Q_{AF}**	Agua facturada exportada	**Agua facturada**
			Consumo facturado medido	
			Consumo facturado no medido	
		Consumo autorizado no facturado Q_{AuNF}	Consumo no facturado medido	**Agua no facturada**
			Consumo no facturado no medido	
	Pérdidas de agua Q_P	**Pérdidas aparentes Q_{PA}**	Consumo no autorizado	
			Inexactitudes de los medidores y errores de manejo de datos	
		Pérdidas reales Q_{PR}	Fugas en las tuberías de adducción y distribución	
			Fugas y reboses en tanques de almacenamiento	
			Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente	

Los elementos del balance hídrico se definen de la manera siguiente:

- **Volumen de ingreso al sistema:** el ingreso al sistema medido a una parte definida del sistema de suministro de agua. En sistemas con exportaciones sustanciales de agua es importante determinar el volumen de agua suministrada (volumen de ingreso al sistema menos agua exportada facturada). [48]
- **Consumo autorizado:** el volumen de agua medida y/o no medida tomada por los clientes registrados, la empresa de agua y otras partes autorizadas. Incluye el consumo autorizado facturado (como el consumo medido facturado, el consumo no medido facturado y el agua exportada) (así como el consumo autorizado no facturado como consumo medido no facturado y consumo no medido no facturado). Esta parte del balance hídrico también comprende fugas y reboses luego del punto de medición del cliente *(ver Capítulo 3.6)* así como los propios requisitos de la empresa de agua, por ejemplo para lavar tuberías o lavar los filtros.
- **Agua facturada (correspondiente al consumo autorizado facturado):** el volumen de agua que se entrega y se factura al cliente exitosamente, el cual genera entonces ingreso para la empresa de agua.
- **Agua no facturada (ANF):** el volumen que permanece no facturado y por lo tanto no genera ningún ingreso para la empresa de agua. Se puede expresar como la diferencia de volumen de ingreso al sistema y el consumo autorizado facturado o como la suma de consumo autorizado no facturado y las pérdidas de agua. En la *Tabla 3.1*. se resaltan todos los elementos que contribuyen a la ANF.
- **Pérdidas de agua:** el volumen de agua perdida entre el punto de suministro y el medidor del cliente debido a varias razones. Se puede expresar como la diferencia entre el volumen de ingreso al sistema y el consumo autorizado y consiste de pérdidas aparentes y reales. Las pérdidas aparentes se pueden subdividir en consumo no autorizado, inexactitudes de medición y errores de manejo de datos. Las pérdidas reales se constituyen de fugas desde tuberías de transmisión y distribución, fugas desde conexiones de servicio y fugas desde tanques de almacenamiento.

Material suplementario 3.1

Componentes del balance hídrico

Las pérdidas reales y aparentes están definidas en los *Capítulos 3.4.1* y *3.5.1*. Adicionalmente, se debe mencionar que el grupo de trabajo de la IWA recomienda descontinuar el uso del término *agua no contabilizada* (en inglés: unaccounted-for water, UFW) debido a las interpretaciones que varían ampliamente de este término en todo el mundo. [2]

3.3 Factores clave de influencia

Las pérdidas de agua ocurren en toda red de distribución de agua (RDA) en el mundo. Por razones económicas y técnicas se tiene que aceptar que las pérdidas reales de agua no pueden eliminarse por completo. No obstante, ha habido un gran incremento en el conocimiento y desarrollo de equipo de última generación, lo que nos permite manejar las pérdidas de agua dentro de límites económicos. De acuerdo con el *Manual de manejo de fugas de la OMS (2001)*, hay cuatro factores clave que influencian el grado de fugas dentro de la red de tuberías de ua empresa de agua. Estos cuatro factores se muestran en la *Figura 3.1*.

Figura 3.1 Factores clave que influencian las fugas, según [22]

La *Figura 3.1* demuestra que la reducción de pérdidas de agua requiere un enfoque integral: una mayor actividad de detección de fugas por sí sola no resolverá el problema si las condiciones de infraestructura se deterioran al mismo tiempo. Además, incluso si se dispone de recursos financieros, no tendrán un efecto positivo salvo que la empresa de agua tenga estructuras adecuadas y tome un enfoque proactivo hacia el manejo de las pérdidas de agua.

3.4 Pérdidas reales

3.4.1 Clasificación

Las pérdidas reales son volúmenes de agua perdidos dentro de un determinado periodo a través de todo tipo de fugas, estallidos y reboses. Las pérdidas reales se pueden clasificar de acuerdo a (a) su ubicación dentro del sistema y (b) su tamaño y al tiempo durante el cual fugan.

(a) Ubicación

Fuga desde las troncales de transmisión y distribución, puede ocurrir en tuberías (estallidos debido a causas foráneas o a corrosión), uniones (desconexión, empaquetaduras dañadas) y válvulas (falla operativa o de mantenimiento) y usualmente tiene tasas de flujo medianas a altas y tiempos de fuga de cortos a medianos.

Fuga desde conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente. A veces nos referimos a las conexiones de servicios como los puntos débiles de las redes de suministro de agua porque sus uniones y accesorios exhiben tasas de falla altas. Las fugas en las conexiones de servicio son difíciles de detectar debido a sus tasas de flujo comparativamente bajas y por lo tanto tienen tiempos de fuga largos.

Fuga y reboses de tanques de almacenamiento. Estas están causadas por controles del nivel que son deficientes o están dañados. Además, puede ocurrir filtración de las paredes de concreto o de la construcción que no son herméticas. A menudo se subestiman las pérdidas de agua desde tanques y aunque son fáciles de detectar, la reparación a menudo es complicada y cara.

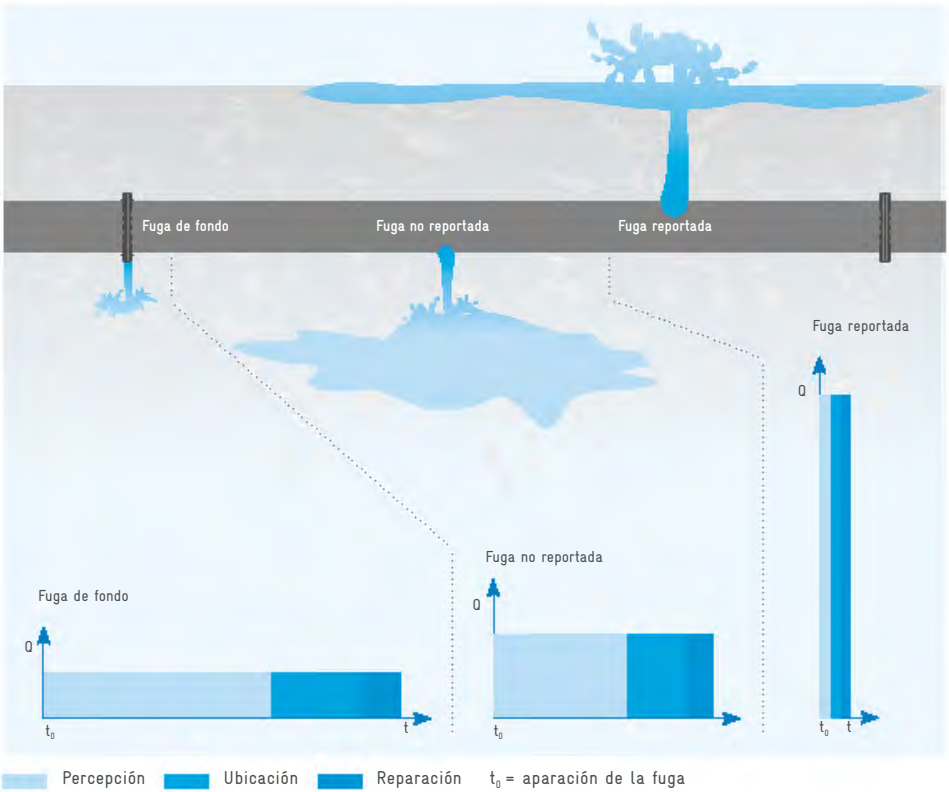
(b) Tamaño y tiempo de la fuga

Las fugas reportadas o visibles provienen principalmente de estallidos súbitos o rupturas de uniones en grandes troncales o tuberías de distribución. El agua que fuga aparecerá en la superficie rápidamente dependiendo de la presión del agua y el tamaño de la fuga así como de las características del suelo y la superficie. No se requiere equipo especial para ubicar las fugas.

Fugas no reportadas u ocultas. Estas por definición tienen caudales mayores a 250 l/h a 50 m de presión pero debido a las condiciones no favorables no aparecen en la superficie. [22] La presencia de fugas ocultas se puede identificar analizando tendencias en el comportamiento del consumo de agua dentro de una zona definida de suministro de agua. Existe una amplia gama de instrumentos acústicos y no acústicos para detectar las fugas no reportadas *(ver Capítulo 6.5)*.

Fugas de fondo. Comprende pérdidas de agua con caudales menores a 250 l/h a 50 m de presión. Estas fugas muy pequeñas (filtración o goteo de uniones, válvulas o accesorios no herméticos) no se pueden detectar utilizando métodos de detección acústicos de fugas. Por lo tanto se asume que muchas fugas de fondo nunca se detectan ni reparan sino que fugan hasta que se reemplaza eventualmente la parte defectuosa. Las fugas de fondo a menudo causan una buena parte de las pérdidas reales de agua debido a su gran número y el largo tiempo durante el que ocurren.

Figura 3.2 Relación entre tasa de fuga (Q) y tiempo de fuga (t). Según [22] [77]



Aunque las pérdidas aparentes pueden eliminarse casi totalmente, siempre habrá un cierto nivel de pérdidas reales en cualquier sistema de suministro de agua. Esta cantidad se conoce como pérdidas reales anuales inevitables (PRAI). La diferencia entre las pérdidas reales anuales actuales (PRAA) y las pérdidas reales anuales inevitables se considera como las pérdidas reales

potencialmente recuperables. La *Figura 4.5 en la página 100* proporciona una ilustración de la interacción entre PRAA y PRAI. Las pérdidas reales se deben valorizar al costo de producir agua o al precio de compra si el agua se importa.

En los países desarrollados, las pérdidas reales representan usualmente el componente más importante de pérdidas de agua. Sin embargo, en los países en desarrollo y emergentes debido a las conexiones ilegales, a menudo los errores de medición y contabilidad pueden ser de gran importancia para las empresas de agua.

3.4.2 Hidráulica de las fugas

Las pérdidas reales normalmente constituyen una proporción importante de las pérdidas totales de agua. Las pérdidas de distintos tipos (agujeros, rajaduras longitudinales y circunferenciales, uniones que fugan, etc.) en los tubos de la red de distribución son el factor principal de las pérdidas reales. Varios estudios de campo y laboratorio han probado la alta sensibilidad de la fuga a la presión: elevar la presión incrementará la fuga de acuerdo con la función de potencia que se muestra en la *Ecuación 3.1*. Al contrario, la fuga se reduce a menor presión en el tubo. Las explicaciones siguientes imparten conocimiento básico sobre la relación entre presión y fuga. El comportamiento hidráulico de las fugas en los tubos se puede describir comúnmente utilizando una versión simplificada de la ecuación del orificio, tal como se ilustró en la *Ecuación 3.1*.

Ecuación 3.1

$$q = c\,h^{\alpha}$$

Donde:

- q Caudal de fuga
- c Coeficiente de fuga
- h Presión
- α Exponente de fuga

El exponente de fuga α es el factor que más influencia el caudal desde una fuga debido a su posición como exponente en la *Ecuación 3.1*. Los estudios de campo sobre análisis de fugas por presión han mostrado que α normalmente varía entre 0,5 y 2,79 y promedia 1.0 [23] [78]. Esto significa que la fuga en los sistemas de distribución de agua es incluso más sensible a la presión que lo que se asume tradicionalmente. Hay varios factores que tienen un impacto significativo sobre el rango de exponentes de fuga:

→ El tamaño y la forma del orificio de fuga, el cual depende del material del tubo y el tipo de falla (rajaduras longitudinales o circunferenciales, orificios redondos, etc.).

- La capacidad que tiene la fuga de expandirse con una presión que se va elevando, lo cual depende del material del tubo y la forma de la fuga (los orificios redondos se expanden menos que las rajaduras longitudinales a medida que se eleva la presión).
- El suelo circundante.
- Las condiciones de flujo en el orificio de fuga (laminar, transitorio o turbulento), el cual depende del número Reynolds y de la forma del orificio.

El material del tubo tiene una gran influencia en la relación presión-fuga. La presión del agua causa esfuerzos en las paredes del tubo. Dependiendo de las propiedades del material (por ejemplo el módulo de elasticidad), los tubos hechos de diferentes materiales fallarán en ciertas maneras características y reaccionarán de manera distinta a las variaciones de presión. El incrementar la presión interna del tubo produce dos efectos: las fisuras y pequeñas rajaduras que no fugan a baja presión y se pueden abrir y comenzar a fugar una vez que se eleva la presión. Consecuentemente, la fuga de fondo de las pequeñas fugas puede sufrir la influencia, en gran medida, de los cambios en la presión del sistema. Además, el área de las fugas existentes se puede incrementar y resultar en una elevación del caudal de las fugas. Esto también depende de la forma de la fuga y de su capacidad para expandirse con una presión que se eleva. De acuerdo con *Thornton* y *Lambert*, el exponente de fuga α tenderá hacia 1,5 por fugas de fondo en tubos flexibles (por ejemplo, PE, PVC), y 0,5 por fugas de tubos rígidos (por ejemplo acero, fierro forjado). En redes con una mezcla de materiales, α tendrá un rango entre 0,5 y 1,5 dependiendo del tipo de materiales y del Índice de fugas estructurales (IFE). [78] Se puede asumir una relación lineal (α = 1,0) entre presión y caudal de fuga para las redes grandes de abastecimiento de agua. [48] [78]

De acuerdo con *Morrison et al. (2007)*, [58] la eficiencia en la gestión de la presión se puede expresar utilizando la *Ecuación 3.2*.

Ecuación 3.2

$$L_1 = L_0 \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\alpha}$$

Donde:

L_0 Caudal de fuga inicial a presión P_0

L_1 Caudal de fuga a presión ajustada P_1

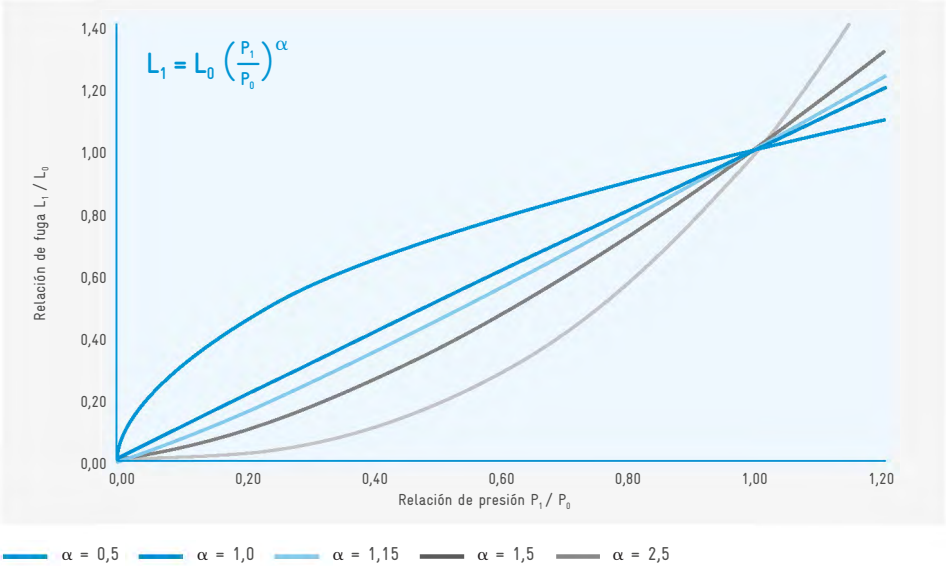
P_0 Presión promedio inicial en la zona

P_1 Presión promedio ajustada en la zona

α Exponente de fuga

La *Figura 3.3 en la página siguiente* ilustra de manera gráfica el efecto de la presión reducida en el caudal de fuga para redes con valores de α entre 0,5 y 2,5.

Figura 3.3 Interacción entre presión y fuga para diferentes valores de α. Según [52]



A partir de esto podemos concluir que la eficiencia de la gestión de la presión depende de la composición del material de la red (el impacto de la gestión de la presión se incrementa con la proporción de tubos plásticos) y la condición general del sistema debido a su alto impacto en las fugas de fondo *(ver Capítulo 6.4)*.

3.4.3 Causas de las pérdidas reales

Los tubos y los accesorios de distintas dimensiones, material y edad se instalan bajo tierra donde están sujetos a una multiplicidad de factores que no se pueden registrar y controlar regularmente.

Adicionalmente, *Lambert* y *McKenzie* [49] puntualizan cuatro factores específicos al sistema que son clave para las pérdidas reales de agua, es decir, la longitud de las troncales, el número de conexiones de servicio, la ubicación del medidor del cliente y la presión operativa promedio en el sistema (cuando el sistema está presurizado). Estos factores varían de un sistema a otro.

La multitud de interacciones activas y pasivas entre los tubos y su entorno lleva frecuentemente a daños y fugas. En términos simples, los activos de las redes de distribución de agua comprenden (a) tuberías y uniones, (b) válvulas y accesorios, y (c) tanques de almacenamiento y bombas. Las causas y factores que influencian las pérdidas de agua por lo tanto se pueden clasificar de acuerdo al tipo de activo.

(a) Tubos y uniones defectuosos

Material, condición y edad del tubo

Material: Aparte de las fallas del material causadas durante la fabricación (insuficiente espesor de pared, ausencia de protección contra la corrosión en los tubos de acero, mal revestimiento de refuerzo en los tubos de concreto), el daño también se causa debido al uso inapropiado de ciertos materiales: el agua blanda (especialmente agua no tratada de las represas) con mucho ácido carbónico (CO_2) y las bajas concentraciones de calcio o las altas concentraciones de sulfatos afectan agresivamente el concreto. Los tubos de concreto armado así como el revestimiento de mortero de cemento interno y externo en los tubos de fierro forjado quedan afectados.

Condición: Todos los tubos metálicos están expuestos a la corrosión física y electroquímica. La corrosión reducirá el espesor de la pared y reducirá la capacidad que tiene el tubo de soportar presión de agua y esfuerzo externo. Las causas más comunes de corrosión son el agua y la tierra agresivas así como las corrientes desviadas.

Edad: Muchos factores que influencian las fugas dependen de la edad. Consecuentemente, la edad de una sección de tubo puede aparecer como el factor más significativo para las fugas. No obstante, la edad no es necesariamente un factor si se ha diseñado e instalado cuidadosamente el tubo y si se realiza mantenimiento a intervalos regulares y las condiciones externas son favorables.

Diseño e instalación / calidad de la mano de obra

Diseño: Los errores durante la fase de planeamiento pueden influenciar las fugas de los tubos como son los casos de mala elección de materiales, dimensionamiento insuficiente para la presión real, medidas de protección inadecuadas contra la corrosión o alineamiento incorrecto (por ejemplo a lo largo de laderas tendientes a los deslizamientos de tierra o adyacentes a raíces de árboles).

Almacenamiento y tendido de tuberías: El almacenamiento inadecuado puede dañar las tuberías incluso antes de su instalación. Las raíces del pasto pueden penetrar el revestimiento bituminoso de los tubos de acero. El arrastrar tubos de PE sobre superficies de concreto o piedras causará biselados que son más susceptibles a las fugas futuras. La larga exposición a la luz del sol hace que los tubos de PE se vuelvan quebradizos. La maquinaria pesada que se utiliza para el transporte y la instalación también puede causar daños.

Lecho: La selección de material inapropiado para tender la tubería en un lecho es una causa frecuente de daño: si el material del lecho es áspero o rocoso puede malograr los revestimientos externos de tubos de acero o fierro forjado y causar corrosión. Pueden aparecer rajaduras longitudinales y en espiral en tubos de PE y PVC como resultado de un material

pedregoso en los lechos. Puede causarse hundimiento si no se rellena y compacta de manera suficiente la zanja para el tubo. Estos movimientos de suelo no controlados también pueden desencadenar desconexión de los encajes o rupturas de tubos.

Uniones: Unir las tuberías deficientemente es una razón más para las fugas. Los tubos de acero soldados a menudo carecen de protección apropiada contra la corrosión interna y externa a lo largo de la costura de soldadura. Si los que ejecutan la técnica de soldadura de tubos PE, que es relativamente nueva, son soldadores no calificados o mal capacitados, habrá frecuentemente defectos debido al caldeamientoy la compresión insuficiente de los extremos del tubo. También pueden ocurrir fugas si los tubos del encaje exceden la curvatura angular máxima permitida o si el martillo de agua y las altas presiones afectan las uniones que no están cerradas

Presión

Presión alta: La presión creciente resultará en un caudal de fuga más alta proveniente de las fugas existentes y de una ocurrencia aumentada de nuevos estallidos de tubos y fugas a medida que sube la presión, las tasas de fuga se elevan a un nivel mucho más grande que lo que habría predicho la relación teórica de raíz cuadrada *(ver Ecuación 3.1, en la página 52)* entre las tasas de presión y de fuga. Las válvulas y accesorios viejos pueden carecer de un tamaño suficientemente robusto para las altas presiones.

Presión baja: La presión baja puede complicar los esfuerzos de detección de fugas porque el agua tiene menos probabilidad de alcanzar la superficie. Además los menores niveles de ruido provenientes de la fuga impiden que los métodos acusticos de ubicación de fugas funcionen y pueden causar tiempos de fuga más largos.

Variaciones de presión: Las marcadas variaciones de presión dentro del sistema pueden llevar a la fatiga de materiales y así a la fuga, principalmente en tuberías de plástico.

Aumento repentino de la presión: Los aumentos repentinos de la presión (martillo de agua) surgen principalmente de mecanismos de control inapropiados y pueden causar fracturas de tuberías, uniones desconectadas y daño en las válvulas y accesorios, lo cual lleva a las fugas.

La *Tabla 3.2* proporciona ideas sobre la influencia de la presión en el caudal de las fugas. Los factores en la *Tabla 3.3* sirven para la conversión de estas tasas de flujo a presiones del sistema diferentes a 50 m.

Los valores presentados en la *Tabla 3.2*, que se han determinado en experimentos, ilustran impresionantemente la capacidad y alto potencial de la gestión de la presión para reducir el caudal de las fugas en las redes de distribución de agua por medio de la reducción de la pre-

sión. Es igualmente importante comprender que las fugas pequeñas con caudales relativamente pequeños pueden causar la mayor parte de pérdidas de agua debido a sus largos e incluso ilimitados tiempos. Por lo tanto, es esencial manejar y minimizar la duración de todas las fugas y estallidos, incluso los más pequeños.

Tabla 3.2 Caudal de fugas para orificios circulares a una presión de 50 m [33]

	Orificio		Caudal de la fuga		
	[mm]	[l/min]	[l/hora]	[m³/día]	[m³/mes]
	0,5	0,33	20,00	0,48	14,40
	1,0	0,97	58,00	1,39	41,60
	1,5	1,82	110,00	2,64	79,00
	2,0	3,16	190,00	4,56	136,00
	3,0	8,15	490,00	11,75	351,00
	4,0	14,80	890,00	21,40	640,00
	5,0	22,30	1.340,00	32,00	690,00
	6,0	30,00	1.800,00	43,20	1.300,00
	7,0	39,30	2.360,00	56,80	1.700,00

Tabla 3.3 Factores de conversión para la Tabla 3.2 [33]

Presión	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Factor de conversión	0,45	0,63	0,77	0,89	1,00	1,10	1,18	1,27	1,34	1,41

Suelo y agua subterránea

Tipo de suelo: El tipo de suelo prevaleciente tiene un efecto significativo en el tiempo durante el cual el agua fuga. Mientras que el agua que escapa en suelos cohesivos (por ejemplo arcilla o limo) puede aparecer pronto en la superficie, las fugas en suelos no cohesivos (por ejemplo arena o grava) tienden a drenar por debajo de la tierra, lo que hace las fugas sean más difíciles de detectar.

Agresividad del suelo: La mayoría de suelos no cohesivos no son agresivos. Los suelos cohesivos pueden afectar negativamente la corrosión externa de los tubos metálicos debido a distintos niveles de sales disueltas, oxígeno, humedad, pH y actividad bacteriana.

Movimiento del suelo: El movimiento del suelo es causado por cambios en la temperatura y contenido de humedad (los niveles cambiantes de agua subterránea hacen que los suelos cohesivos se contraigan y expandan), las fuertes heladas así como el hundimiento causado por un lecho incorrecto para el tubo, las actividades mineras o terremotos, así como las obras de construcción incrementan las cargas de superficie y las obras de reparación de tubos también pueden desencadenar movimiento del suelo. El movimiento del suelo puede hacer que las uniones de tubos se desconecten y que los tubos se rompan.

Tráfico

Carga del tráfico: Muchas tuberías que originalmente se tendieron por debajo de los pavimentos se sitúan ahora debajo de las pistas ya que ha aumentado el tráfico y la anchura de las pistas. La mayor cantidad de vehículos y la alta capacidad de carga de los camiones modernos colocan un peso adicional sobre los tubos.

Pavimento: La salida de agua puede aparecer muy lejos del daño debido a los pavimentos de concreto y asfalto, lo que impide los esfuerzos de ubicación de fugas.

Corriente desviada: 1 amperio erosiona aproximadamente 10 kg de hierro cada año. Las corrientes desviadas de los sistemas de vías férreas con energía DC (tranvías) y los cimientos de concreto armado agravan la corrosión externa de los tubos metálicos. [62]

Influencia de terceros

La ausencia de documentación sobre la infraestructura (por ejemplo planos de la construcción original) o la ejecución impropia de obras de construcción pueden dañar los tubos, ya sea directamente a través de excavadoras o indirectamente a través de máquinas de construcción que vibran o vehículos pesados. Se puede detectar el daño instantáneamente o luego de un retraso haciendo que la causa sea más difícil de detectar.

Otros factores

Existen otros factores numerosos, por ejemplo el número de válvulas y conexiones de servicio (conocidos como los puntos débiles dentro del sistema de distribución) por kilómetro de tubo, la longitud y el diámetro de las troncales, la longitud promedio de las conexiones de servicio, la profundidad en la que se tendieron los tubos así como las fugas de fondo de las uniones, accesorios y válvulas. El manejo operativo del sistema también influencia las fugas, por ejemplo en términos de agua proveniente de distintas fuentes que se mezcla dentro del sistema de tubos (riesgo de corrosión) el porcentaje del tiempo en que el sistema está presurizado [48] y la inspección, mantenimiento y estrategias de detección de fugas que influencian el tiempo de fuga de las fugas detectadas y no detectadas.

(b) Válvulas y accesorios defectuosos

Las fugas desde válvulas y accesorios incluyen ruptura, deformaciones o fallas materiales en el cuerpo de la válvula así como empaquetaduras que fugan en las uniones, sombreretes o boquillas. Una manipulación poco cuidadosa o una ausencia de mantenimiento a menudo causan estas fugas. Las válvulas y accesorios defectuosos pueden contribuir significativamente a las pérdidas reales de agua a pesar de tener tasas de fuga relativamente bajas. Estos daños a menudo siguen sin descubrirse por un largo tiempo sin un programa de servicio regular. También pueden ocurrir pérdidas considerables de agua por los grifos contra incendios y las tuberías de las fuentes públicas.

(c) Bombas y tanques de almacenamiento defectuosos

Las pérdidas de agua de los tanques de almacenamiento están causadas tanto por daño estructural como por fallas operativas, como controles de sistemas defectuosos o inexistentes que pueden resultar en el rebose. El daño estructural involucra rajaduras, huecos o peladuras en las paredes o pisos de los tanques, fugas debido a una calidad inferior del concreto, así como sellos y penetraciones de tubos que no son a prueba de agua. A menudo se subestiman las pérdidas de agua de los tanques y, aunque son fáciles de detectar, las reparaciones a menudo son complicadas y caras. Las pérdidas de agua de las bombas generalmente son causadas por sellos defectuosos del eje de la bomba. La cantidad de fugas en la mayor parte de casos es insignificante, pero las inundaciones de las cámaras de bombas y del equipo eléctrico son un fastidio y se deben evitar realizando el mantenimiento apropiado.

3.4.4 Impactos de las pérdidas reales

El objetivo principal de los sistemas de abastecimiento de agua es proveer agua potable de calidad y en cantidad adecuada a todos los clientes, con suficiente presión y en cualquier momento. [61] En muchos casos, la fuga presenta la mayor barrera a estos objetivos. Los efectos negativos de las fugas se pueden dividir en (a) impactos económicos, (b) impactos técnicos, (c) impactos sociales e (d) impactos ambientales.

(a) Impactos económicos

La pérdida de agua en su camino hacia el consumidor incurre en costos de explotación, tratamiento y transporte sin generar ningún ingreso para la empresa. La cantidad de agua perdida puede proporcionarse nuevamente para satisfacer la demanda del cliente. Consecuentemente se deben incrementar las capacidades de las instalaciones técnicas.

Las reparaciones de fugas detectadas son caras en términos de los costos y personal que se requieren y usualmente interrumpen el servicio a los clientes.

Finalmente, los estallidos de tubos, las fugas y reboses pueden causar daños considerables a la infraestructura: el suelo circundante se horada y se erosiona, esto hace que los caminos, vías férreas o edificios colapsen. Las inundaciones hacen peligrar los estacionamientos subterráneos o las salas de ingeniería que contienen equipo caro. Se debe imponer grandes pagos compensatorios si la empresa de agua es responsable de los daños. La *Tabla 3.4* ilustra las posibles dimensiones de tales impactos económicos para una empresa de agua.

Tabla 3.4 Impactos económicos de las fugas (ciudad de Zurich, Suiza) [70]

Extensión de los daños	Descripción	Costos potenciales
Catastrófica	Fatalidades o problemas de salud permanentes	› USD 10 millones
Crítica	Lesiones a personas, daños a infraestructura e interrupciones de la producción, publicidad negativa	› USD 5 millones
Significativa	Interrupción del suministro a la población y los clientes, fallas en el abastecimiento local	› USD 1 millón
Menor	Interrupción corta del suministro, posible cobertura mediática	› USD 0,3 millones
Insignificante	Interrupciones temporales del suministro	› USD 0,1 millón
Imperceptible	No hay interrupción directa, los impactos locales son limitados	‹ USD 0,1 millón

(b) Impactos técnicos

Los tubos de agua potable que fugan pueden incrementar las cargas sobre las aguas servidas municipales y/o los sistemas de recolección de agua de tormenta debido a infiltración, lo cual lleva a sobre-diseñar los tubos del alcantarillad. En consecuencia, las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden recibir agua adicional, lo cual genera costos de tratamiento adicionales.

Las grandes fugas pueden disminuir la cobertura de la demanda de agua existente, tanto que el sistema ya no puede operar continuamente. El suministro intermitente causará posteriores problemas técnicos por la intromisión del aire en los tubos (riesgo de martillos de agua, daño a los medidores de agua, errores de medición, etc.) y agua contaminada (riesgo de que la infección bacteriana expanda enfermedades contagiosas). Se tiene que mantener disponibles alternativas de abastecimiento costosas, como los camiones cisterna.

En el largo plazo un abastecimiento intermitente o poco confiable tentará a los clientes a instalar tanques en el techo, los que a su vez impiden la restauración de un suministro de

agua continuo. La conexión entre el suministro intermitente y el nivel de fuga significa que las pérdidas de agua generalmente son más altas en sistemas operados intermitentemente que en sistemas operados continuamente. Se debe enfatizar que el suministro intermitente nunca debe percibirse como una solución técnica, sino como un obstáculo para combatir las pérdidas de agua.

(c) Impactos sociales

Las fallas de abastecimiento, como la presión baja y las interrupciones del servicio al punto de suministro intermitente son los impactos más comunes sobre el cliente. Estos inconvenientes llevarán a la insatisfacción y a las quejas de los clientes y pueden afectar negativamente la voluntad de pago de los clientes. Un mal suministro en combinación con estallidos frecuentes (visibles) de tubos afectará la reputación de la empresa y puede desencadenar mala publicidad.

Los riesgos potenciales de salud provenientes de aguas residuales y otros contaminantes que infiltran los sistemas de tubos con presiones bajas o el abastecimiento intermitente son incluso más serios. El agua contaminada puede causar brotes de enfermedades provenientes del agua, como el cólera, el tifus, la hepatitis A o la diarrea.

(d) Impactos ambientales

El manejo sostenible requiere que todos los recursos de aguas naturales se manejen económicamente. El agua contaminada ya es escasa en muchas regiones, pero incluso las regiones con cantidades abundantes de agua no tienen recursos infinitos. La compensación de las pérdidas de agua incrementando más la extracción de agua pone más presión sobre los cuerpos de agua de superficie y subterráneos y esto es lo que los sistemas seguros de abastecimiento de agua evitarían. [62]

Adicionalmente, el bombeo y el tratamiento químico del agua perdida a través de las fugas desperdician energía y causa así emisiones de dióxido de carbono innecesarias. Las grandes fugas a menudo pueden ser responsables de más del 25% del consumo de energía de una empresa de agua.

Se puede requerir cantidades sustanciales adicionales de energía para la decocción así como para el transporte de agua potable en botellas o cisternas en caso en que el abastecimiento intermitente esté bajando la calidad del agua. Los sistemas de suministro intermitente incurren en altos costos de energía porque la presión se pierde cada vez que el sistema drena y se tiene que rellenar. Finalmente, se requiere más energía para el bombeo de larga distancia o para las tecnologías complejas de tratamiento, como la desalinización o la reutilización de aguas servidas si los recursos de agua existentes ya no son suficientes. [65]

3.5 Pérdidas aparentes

3.5.1 Clasificación

Las pérdidas aparentes son pérdidas que no se deben a fugas físicas en la infraestructura, sino que están causadas por otros factores. Las pérdidas aparentes se pueden agrupar en las siguientes categorías en base a su origen:

- inexactitudes de medición debido a contadores incorrectos de agua de los clientes o medidores de flujo incorrectos
- manejo de datos y errores de contabilidad así como mala rendición de cuentas de los clientes en los sistemas de facturación
- consumo no autorizado debido al robo de agua y a las conexiones ilegales.

Para resumir lo anterior, las pérdidas aparentes comprenden toda el agua que se entrega exitosamente al cliente pero que no se mide o registra con exactitud, lo que causa un error en la cantidad que consumen los clientes. En las redes de suministro de agua sin medición consecuente de todo el sistema y con muchas conexiones ilegales, las pérdidas aparentes pueden representar cantidades significativas de agua. Las pérdidas aparentes están creando costos de producción sin generar ingreso para la empresa. Así, las pérdidas aparentes se pueden valorizar al costo de venta del agua y por lo tanto en muchos casos son las pérdidas más caras que pueda encontrar una empresa de agua. La reducción de las pérdidas aparentes de agua se puede lograr en muchos casos a costos relativamente bajos y por lo tanto es usualmente un buen punto de partida que devuelve rápidamente la inversión a la empresa de agua. [77]

3.5.2 Razones de las pérdidas aparentes

Las pérdidas aparentes son causadas por (a) inexactitudes del medidor de agua (b) errores en los manejos de los datos, (c) cualquier forma de consumo no autorizado. Las pérdidas aparentes no deben subestimarse porque no generan ingreso por agua que ya ha sido producida, tratada, transportada y entregada al cliente. Las razones de las pérdidas aparentes se pueden agrupar tal como se describe a continuación:

(a) Inexactitudes del medidor

Las pérdidas de medición son frecuentemente la pérdida más común de las pérdidas aparentes. La experiencia muestra que un pequeño porcentaje de agua no se mide o se mide de manera incorrecta debido a errores de medición o a pérdidas crecientes en los medidores de agua. Esto afecta tanto a los medidores de los clientes como a los medidores de flujo de la empresa y puede estar causado por seleccionar medidores inconvenientes, medidores demasiado grandes, por una instalación no correcta y por la no calibración de los medidores, así como debido a un deterioro en el desempeño de muchos medidores a lo largo del tiempo.

(b) Errores en el manejo de los datos

El personal que lee medidores puede cometer errores de lectura del medidor. Se puede perder los datos del consumo de agua o se los puede cambiar debido a errores sistemáticos en el procesamiento de datos y a los procedimientos de facturación. El consumo no medido (necesidades propias y abastecimiento gratuito para los bomberos, riego de áreas verdes, limpieza de calles, etc.) puede subestimarse mientras que se puede sobreestimar la producción no medida. Las tarifas planas pueden causar un consumo de agua doméstico excesivo que excede de lejos la cantidad presupuestada.

(c) Consumo no autorizado

La extracción de agua no autorizada representa una fuente considerable de pérdidas en muchos países y aparece de maneras muy diferentes, por ejemplo en las conexiones ilegales o en los medidores vandalizados o manipulados de los clientes o en los medidores que los clientes evitan, en la extracción ilegal del agua de las tuberías contra incendios así como en los sobornos y corrupción a los empleados que leen los medidores u a otro personal de la empresa.

3.6 Desperdicio

El desperdicio de agua no se cuenta como un componente de las pérdidas de agua en el balance hídrico de la IWA porque ocurre luego del punto de medición al cliente. No obstante, el desperdicio puede representar una proporción significativa del consumo medido o no medido: se puede desglosar en desperdicio deliberado, por ejemplo vandalismo o caños abiertos y en pérdidas en la vivienda causadas por una plomería defectuosa o por grifos que corren. Esto último se puede reducir significativamente reemplazando las tarifas planas subsidiadas con una política eficaz de medición de hogares que incentiva a reparar la plomería defectuosa. [22]

Más aún, el desperdicio puede ocurrir dentro de la propia empresa de agua a través del uso excesivo o negligente del agua para propósitos operativos, por ejemplo lavado de tubos o enjuagado de filtros y se incrementará así la cantidad de consumo autorizado no facturado.

El desperdicio de agua puede implicar un problema económico serio para las compañías de agua que tienen que importar o comprar agua de un proveedor de agua a granel y que por lo tanto tienen que pagar todo el costo de cada m^3 desperdiciado (no medido). En las regiones donde los recursos de agua son escasos o donde hay zonas que se abastece intermitentemente, la reducción del desperdicio puede ayudar a la seguridad del abastecimiento. [68]

3.7 Resumen y pasos siguientes

Este capítulo tiene por fin impartir conocimientos fundamentales sobre las pérdidas de agua. Los contenidos del *Capítulo 3* de este manual técnico permitirán al lector:

- ☑ Emplear terminología y definiciones claras para todos los componentes de pérdidas de agua y de agua no facturada.
- ☑ Conocer los componentes del balance hídrico estandarizado de la IWA.
- ☑ Identificar los factores clave que influencian las pérdidas de agua.
- ☑ Clasificar las pérdidas de agua reales de acuerdo con su ubicación, tamaño y tiempo de pérdida.
- ☑ Comprender la hidráulica de las fugas y el impacto de la presión en el flujo de la fuga.
- ☑ Conocer todas las causas potenciales de los estallidos y roturas de tubos.
- ☑ Comprender los impactos económicos, técnicos, sociales y ambientales de las pérdidas de agua.
- ☑ Conocer las causas e impactos de las pérdidas aparentes.

Este conocimiento provee la base para desarrollar una estrategia de reducción de pérdidas de agua hecha a la medida, lo cual se describirá en el *Capítulo 4*,

Foto: © D. Heer, 2004

Desarrollo de una estrategia técnica para la reducción de pérdidas de agua

4

4.1 Objetivos

Al final de este capítulo el lector conocerá los principales métodos para

- evaluar y cuantificar la situación actual de las pérdidas de agua
- determinar y analizar indicadores de desempeño relevantes
- fijar metas de fuga
- diseñar un programa de control apropiado de pérdidas de agua.

El lector podrá realizar los métodos descritos independientemente luego de completar los materiales suplementarios. Las definiciones, terminología y los indicadores de desempeño mencionados en el *Capítulo 4* se basan en gran medida en el trabajo del grupo de trabajo en pérdidas de agua de la IWA. Se puede encontrar más información sobre este tema en *Alegre et al.* [2] y en *Lambert y Hirner.* [48]

4.2 La necesidad de manejar las pérdidas de agua

La reducción de las pérdidas de agua debe ser el objetivo de cualquier empresa de agua ya que lleva a una mayor eficiencia económica y ecológica y a un mejor servicio para los clientes. [77] Antes de desarrollar una estrategia de reducción de pérdidas de agua, quienes toman las decisiones deben ser conscientes de por qué tiene sentido proveer recursos financieros y personales para reducir las pérdidas de agua. Desde la perspectiva de una empresa de agua, existen al menos diez razones que pueden justificar un mayor gasto en el manejo de las pérdidas de agua:

- **Eficiencia en el costo operativo:** Un sistema de distribución de agua bien mantenido requerirá menos reparaciones, costos de producción más bajos y prevendrá los pagos por compensaciones.

- **Eficiencia del costo de capital:** Una falta de mantenimiento y la operación intermitente incrementarán el desgaste en los tubos, válvulas y medidores. Un mejor suministro extenderá la vida de servicio de los componentes del sistema y llevará a menores costos fijos para la empresa de agua en el largo plazo.

- **Mejor medición y facturación:** Menos fugas y una mejor situación de abastecimiento pueden también tener efectos positivos en las pérdidas de agua aparentes porque el aire dentro del sistema de distribución puede causar errores de medición.

- **Menos riesgos a la salud:** El agua residual y otros contaminantes pueden infiltrar el sistema de tubos a través de fugas y desencadenar enfermedades provenientes del agua en sistemas de baja presión o en el caso de operación intermitente.

- **Mayor seguridad de abastecimiento:** Un sistema bien mantenido con menos fugas y estallidos incrementará la garantía de abastecimiento.

- **Menos daños infraestructurales:** Las fugas pueden crear vacíos debajo de la tierra que pueden llevar al colapso de las vías y los edificios.

- **Menores cargas sobre el alcantarillado:** La infiltración de agua que se pierde en el sistema de alcantarillado pone una carga adicional en los tubos de canalisation y en las plantas de tratamiento de aguas servidas.

- **Mayor satisfacción del consumidor:** Además de la mala calidad del agua, de la cantidad inadecuada y de los riesgos de salud, las fugas también reducen la presión en los aparatos de los clientes. El mejorar el servicio de suministro mejorará la satisfacción del cliente y su voluntad de pago.

- **Publicidad y voluntad de pago:** Los menores estallidos, la mayor seguridad de suministro y condiciones higiénicas mejorarán la percepción que el público tiene de la empresa de agua. Esto también puede afectar positivamente la voluntad que tengan los clientes de pagar.

- **Estrés ecológico reducido:** Finalmente, el desarrollo de una estrategia de reducción de las pérdidas de agua tiene sentido desde un punto de vista ecológico. En caso de escasez o sobre-explotación de los recursos de agua, las pérdidas de agua deben reducirse para disminuir la presión sobre esos recursos.

4.3 Análisis de la situación actual

4.3.1 Diagnóstico preliminar del sistema

Es inevitable tener un cierto nivel de pérdidas, incluso en los sistemas de distribución de agua mejor mantenidos y operados. Así, una empresa de agua debe determinar dos características de su sistema para implementar un programa de reducción de pérdidas de agua exitoso y sostenible: la situación actual de fugas y el nivel económico predeterminado de fugas.

Consecuentemente, las actuales pérdidas de agua deben comprenderse y evaluarse utilizando un enfoque de diagnóstico antes que se pueda desarrollar una estrategia adecuada de reducción de pérdidas de agua. Es útil realizar el diagnóstico poco a poco con la ayuda de una lista de verificación como la que se muestra en la *Tabla 4.1.*

Tabla 4.1 Diagnóstico del sistema existente, basado en [22]

Pregunta	Métodos disponibles	Capítulo
¿Conocemos nuestro sistema?	Registro de la red basado en SIG y modelación hidráulica	5.5, 5.6
¿Cuánta agua se pierde?	Cálculo del balance hídrico	4.3.2
¿Dónde se pierde?	Medición (permanente o temporal)	4.3.2, 5.8
¿Cómo determinar las pérdidas?	Métodos de evaluación de pérdidas	4.3.4, 4.3.5
¿Por qué se pierde?	Revisión de la red y práctica operativa	6.3, 6.4, 6.5

4.3.2 Determinación del balance hídrico

Un balance hídrico tiene como objetivo rastrear y contabilizar cada componente de agua que se añade y se deduce de un sistema de abastecimiento de agua dentro de un periodo definido. Un balance hídrico busca así identificar todos los componentes de consumo y pérdidas en un formato estandarizado. [77] Un balance hídrico claramente definido es el primer paso en evaluar el agua no facturada y en manejar las fugas en las redes de distribución de agua. La terminología que se utiliza para un balance hídrico se introdujo en el *Capítulo 3.2*. La *Tabla 4.2*. *en la página siguiente* muestra abreviaciones de la terminología del balance hídrico.

Cuando se elabora el cálculo del balance hídrico, es extremadamente importante recordar que la exactitud de los volúmenes de pérdida de agua depende de la exactitud y calidad de datos utilizados en el cálculo. Por tanto, una medición confiable de todos los volúmenes de agua que ingresan y salen del sistema de abastecimiento es un requisito fundamental. La

Tabla 4.2 Terminología del balance hídrico (abreviada)

Volumen de ingreso al sistema Q_I	**Consumo autorizado Q_A**	Consumo autorizado facturado Q_{AF}
		Consumo autorizado no facturado Q_{AuNF}
	Pérdidas de agua Q_P	Pérdidas aparentes Q_{PA}
		Pérdidas reales Q_{PR}

validación de los datos también desempeña un papel clave en determinar los volúmenes de pérdidas de agua. Se recomienda el diseño de una hoja de cálculo para realizar los cálculos de balance hídrico. También existe software comercial para apoyar la recolección de datos necesaria y para realizar los cálculos. Existe una serie de técnicas para calcular el balance hídrico y deben combinarse para lograr resultados confiables [20] Las técnicas más importantes son (a) el balance hídrico anual desde arriba hacia abajo y (b) la evaluación de pérdidas reales desde abajo hacia arriba.

(a) El balance hídrico anual desde arriba hacia abajo

La IWA desarrolló el balance hídrico anual desde arriba hacia abajo como un método de buenas prácticas. El método desde arriba hacia abajo requiere que los medidores de flujo y los contadores de agua del cliente se instalen y lean por un periodo de al menos un año. Este método apunta a determinar las pérdidas reales anuales en general en m^3/a. El procedimiento estándar de acuerdo con la Asociación Alemana del Gas y el Agua (DVGW, por sus siglas en alemán) [13] se puede aplicar de la manera siguiente.

Material suplementario 4.1

Anualización de los datos de contadores de agua

Paso 1

El **volumen de ingreso al sistema** Q_I debe determinarse utilizando mediciones anuales desde los medidores de flujo principales. La exactitud de los medidores instalados debe determinarse por medio de pruebas de campo, por ejemplo a través de pruebas volumétricas o inserción de medidores de flujo portátiles. Se tiene que hacer un estimado apropiado de cantidades si no se mide los volúmenes de ingreso al sistema. Las investigaciones muestrales pueden mejorar las determinaciones. El volumen anual total puede entonces estimarse en consideración de las curvas de fluctuación anual. Se tiene que identificar y verificar los medidores de flujo para las exportaciones de agua (estos son los insumos en otros sistemas) para calcular la cantidad de agua suministrada al sistema.

Paso 2

Se tiene que identificar a todos los clientes registrados en los registros de facturación (hogares, comercios y consumidores industriales, etc.) para determinar **el consumo autorizado**

facturado Q_{AF}. Se puede determinar el consumo anual por medio de lecturas del medidor en la fecha de referencia y anualizando apropiadamente el consumo medido.

Material suplementario 4.2

Determinación del consumo no medido

Se tiene que hacer un estimado apropiado para los clientes facturados sin medidores de agua. No se recomienda simplemente asignar cifras de consumo de usuarios medidos porque las tarifas medidas usualmente crean comportamientos de consumo diferentes que las tarifas planas. Por lo tanto, se debe determinar el consumo doméstico no medido promedio utilizando monitoreos individuales de usuarios (MIU) para una muestra al azar de usuarios. Un método alternativo es usar monitoreos de zona (MZ) si el área en investigación no está sujeta a grandes volúmenes de fugas no detectadas. [89]

Paso 3

Consumo autorizado no facturado o Q_{AuNF}, tiene que determinarse por medio de un estimado apropiado. Primero, todos los consumidores tienen que identificarse. Estos pueden ser hogares, edificios municipales, parques, servicios de bomberos, tanques de agua o áreas de barrios marginales. Se tiene que hacer un estimado del consumo anual para cada grupo de consumidores. Un método puede ser el utilizar figuras de clientes comparables o literatura. En algunos casos, tiene sentido tomar pruebas en una investigación de campo. Finalmente, se tiene que identificar el volumen utilizado por la empresa de agua para propósitos operativos (limpieza de troncales, lavado, etc.). Se debe realizar un estimado calificado si no se dispone de valores medidos.

Paso 4

El **consumo autorizado** Q_A se puede calcular ahora añadiendo Q_{AF} y Q_{AuNF}. Las pérdidas totales de agua Q_P se pueden derivar luego de Q_I - Q_A.

Paso 5

Estimar las pérdidas aparentes Q_{PA} es bastante difícil y está sujeto a un alto grado de incertidumbre. Se debe desglosar las pérdidas aparentes en sus componentes para lograr un estimado conveniente. Primeramente, se tiene que estimar el número de conexiones ilegales. Esto se puede hacer ya sea consultando registros anteriores o conduciendo una investigación casa por casa dentro de una zona muestral. Sin datos específicos, *Thornton* [77] recomienda utilizar 0,25% del volumen que ingresa al sistema como un enfoque inicial. En segundo lugar tiene que estimarse las pérdidas debidas a la transferencia de datos y los errores de manejo así como las inexactitudes de medición. Durante las lecturas de medidores debe registrarse el número de medidores de agua averiados. Se puede determinar los volúmenes utilizando estimados per capita.

En Alemania, las pérdidas aparentes se estiman en un rango de 1,5 a 2,0% del volumen de ingreso al sistema. [13] Para los países en desarrollo, la IWA recomienda utilizar 5% del consumo medido facturado como un estimado inicial hasta que se disponga de una evaluación más detallada. De acuerdo con *Lambert (2010)*, las pérdidas aparentes excederán usualmente 5% en sistemas con tanques de almacenamiento de los clientes. Siempre es aconsejable para cada empresa de agua evaluar y cuantificar los componentes de pérdidas aparentes dentro de su propio sistema en vez de utilizar un porcentaje del volumen de ingreso al sistema, el cual se basa en cifras de otros servicios públicos. [43]

Material suplementario 4.3

Cálculo del balance hídrico

Paso 6

Finalmente, las pérdidas reales de agua Q_{PR} se pueden derivar restando las pérdidas aparentes Q_{PA} de las pérdidas de agua generales Q_P.

Una desventaja del balance hídrico desde arriba hacia abajo es que el procedimiento está sujeto a errores e incertidumbre. Cuanto más bajo es el número de medidores de flujo principales y contadores del cliente permanentemente instalados y regularmente verificados, más bajo será el nivel de exactitud. Los resultados mejoran con los años de experiencia y el incremento de la calidad y la cantidad de datos ingresantes. [77] Muchos cálculos utilizando el enfoque desde arriba hacia abajo han mostrado que los límites de confianza menores a ± 15% de pérdidas reales calculadas son difíciles de lograr, incluso en sistemas bien manejados con un bajo nivel de fugas y medición confiable. [46].

Un análisis desde abajo hacia arriba se basa en las mediciones de flujo nocturno y se recomienda como acompañamiento al balance hídrico anual para desarrollar una estrategia apropiada de reducción de las pérdidas de agua.[20]

Cada empresa de agua debe realizar un balance hídrico desde arriba hacia abajo anualmente. No obstante, se tiene que considerar que el balance hídrico anual es un enfoque de retrospectiva que no puede proporcionar un sistema de alerta temprana para identificar nuevas fugas y estallidos. Por lo tanto, se reconoce como mejor práctica el combinar los cálculos de balance hídrico con las mediciones del flujo nocturno de manera continua o según sea necesario para iniciar el control activo de fugas y para limitar el tiempo durante el cual se producen las fugas y limitar los estallidos. [46]

(b) Evaluación desde abajo hacia arriba de pérdidas reales de agua

La evaluación desde abajo hacia arriba es una herramienta útil para hacer verificaciones cruzadas de volúmenes de pérdidas reales obtenidos del balance hídrico desde arriba hacia abajo y del análisis de componentes. Incluye datos de pruebas de campo independientes adquiridos en áreas discretas de la red de distribución de agua. Esto se basa

usualmente en el análisis del caudal mínimo nocturno (CMN) *(ver Capítulo 4.3.4)* y toma en cuenta las evaluaciones diurnas en la presión del sistema. Un análisis de CMN para todo el sistema de distribución provee una determinación independiente del volumen real de las pérdidas que puede utilizarse para controlar los resultados del cálculo de balance hídrico. Idealmente, los dos volúmenes deben equilibrarse, pero la experiencia ha mostrado que generalmente no coinciden exactamente debido a los errores acumulativos respectivos.

Una ventaja adicional de la evaluación desde abajo hacia arriba es que las áreas de pérdidas reales se pueden identificar y priorizar dentro de la estrategia de reducción de agua. Otro subproducto positivo de recolectar datos de pruebas de campo durante la evaluación desde abajo hacia arriba es que se adquiere la información del sistema requerida para determinar las fugas de fondo y la relación entre presión y fugas. [20]

4.3.3 Confiabilidad de los cálculos de balance hídrico

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, los resultados de un cálculo de balance hídrico serán tan buenos como los datos utilizados para generarlo. En general, un balance hídrico se basa no solamente en mediciones, sino también en estimados de producción de agua, consumo y pérdidas. Por lo tanto, los volúmenes resultantes del agua no facturado ingresos, de las pérdidas reales y de las pérdidas aparentes siempre estarán sujetos a un grado de error mayor o menor. Los errores en determinar los volúmenes de pérdidas reales o aparentes influenciarán el análisis económico de las opciones y pueden llevar a una estrategia inapropiada de reducción de pérdidas de agua. Por lo tanto, es importante para todos los datos solicitados y todos los estimados necesarios estar tan cerca de las condiciones reales como sea posible de modo que se pueda lograr resultados válidos y útiles. La confiabilidad de la fuente de datos y de la exactitud de los datos es imprescindible, por lo tanto siempre se deberían evaluar de manera crítica. [2]

Bandas de exactitud

La confiabilidad describe la medida en que una fuente de datos rinde resultados consistentes, estables y uniformes cada vez a lo largo de mediciones repetidas en las mismas condiciones.

La exactitud se relaciona con errores de medición en los datos de ingreso y en la cercanía de las observaciones, cálculos o estimados, al valor verdadero. En la práctica, no habrá información detallada disponible sobre exactitud y confiabilidad de datos, pero las empresas de agua podrán proveer estimados competentes sobre la banda de exactitud de ciertos datos de ingreso. [2]

Tabla 4.3 Ejemplo de la relación entre el origen y la exactitud de los datos

Origen de los Datos	Descripción	Bandas de exactitud
Volúmenes medidos	Ingreso en el sistema consumo medido, exportación medida	± 0,1 a 2,0%
Volúmenes estimados	Consumo no medido, pérdidas aparentes	± 5 a 50%
Volúmenes derivados	Agua no facturada, pérdidas reales	Depende de la exactitud de datos de ingreso medido y estimado

Límites de confianza de 95 %

El uso de límites de confianza del 95% se ha establecido como un procedimiento para calificar el grado de incertidumbre de los componentes únicos del balance hídrico. Estos límites de confianza de 95% vienen originalmente del cálculo de incertidumbre y se basan en distribuciones normales que comparten la siguiente propiedad: 95% de las observaciones caen dentro del rango ± 1,96 de desviaciones estándar (σ) alrededor del valor promedio. [77]

En la práctica, el uso de límites de confianza de 95% significa que los cálculos basadas en datos aproximados tienen límites de confianza más amplios que los cálculos que se hacen con datos más confiables. [46] Para cada componente medido y estimado del balance hídrico, se debe definir bandas de exactitud (± ...%) dentro de las cuales el valor real reside en una probabilidad del 95%. Cuanto más exactos sean los datos, menores serán los límites superior e inferior de la banda de exactitud.

Además, la varianza (varianza $V = \sigma^2$) se puede determinar para cada componente del balance hídrico sobre la base de límites de confianza de 95%. Los componentes con gran varianza tendrán mayor impacto en la exactitud que los volúmenes derivados. Los volúmenes derivados del balance hídrico tendrán entonces un mayor nivel de incertidumbre en base a las varianzas de los datos ingresados respectivos.

Material suplementario 4.4

Uso de límites de confianza de 95 %

El uso de límites de confianza de 95% ayuda a identificar componentes con una gran varianza y por tanto los impactos más grandes en la exactitud de los resultados finales del balance hídrico. Una vez que se identifican se deben tomar medidas para mejorar la exactitud de los componentes con mayor impacto, es decir instalando dispositivos de medición adicionales.

Como demuestra la *Tabla 4.4*, la inexactitud en volúmenes derivados se acumula hacia valores significativos que pueden afectar las estrategias de manejo de fugas, incluso de sistemas en donde se mide el ingreso al sistema y los volúmenes de consumo.

Tabla 4.4 Ejemplos para determinar las bandas de exactitud [52]

	Origen de los datos*	Volumen [m³]	Banda de exactitud [%]		Desviación estándar σ	Varianza $V = \sigma^2$
Ingreso en el sistema Q_I	(M)	1.,996.139	± 1,0	→	10.184	103.721.650
Agua facturada Q_{AF}	(M)	1.801.146	± 0,2	→	1.838	3.377.891
Agua no facturada Q_{ANF}	(D)	194.993	± 10,4	←	10.349	107.099.541
Consumo autorizado no facturado Q_{AuNF}	(E)	30.000	± 20,0	→	3.061	9.371.095
Pérdidas de agua Q_P	(D)	164.993	± 12,8	←	10.792	116.470.637
Pérdidas aparentes Q_{PA}	(E)	32.999	± 50,0	→	8.418	70.862.896
Pérdidas reales Q_{PR}	(D)	131.994	± 20,3	←	13.687	187.333.533

* Donde: (M) = medido, (D) = derivado, (E) = volúmenes estimados.

4.3.4 Evaluación y cuantificación de pérdidas reales de agua

Este capítulo se referirá a la cuestión de cómo determinar las pérdidas reales. Se debe tomar este paso antes de ocuparse de los temas de dónde y cuánta agua se pierde. Se tiene que establecer los componentes del sistema utilizando mapas del sistema, modelos hidráulicos o el registro de la red antes de que se pueda comenzar este proceso.

En general, las fugas que llevan a pérdidas reales pueden ocurrir en (a) tanques de almacenamiento, (b) troncales de transmisión y (c) la red de distribución *(ver Capítulo 3.4)*. La mayoría de fugas ocurre dentro del sistema de distribución. Por lo tanto, las pérdidas en los tanques y troncales de transmisión a menudo son de importancia menor. No obstante, la búsqueda de pérdidas reales puede comenzar en estos puntos ya que se pueden medir con poco esfuerzo.

(a) Evaluación de pérdidas provenientes de los tanques de almacenamiento

Las fisuras o rajaduras en la construcción, las penetraciones de tuberías que no son a prueba de agua y los tubos que fugan en la cámara de válvulas son las razones típicas de fugas de un tanque. Conducir una prueba volumétrica o de goteo es un método común para identificar pérdidas en tanques de almacenamiento. Para desempeñar la prueba, el suministro del tanque debe interrumpirse. Por lo tanto, esta prueba se hace mejor durante las horas nocturnas. Si fuera posible, las áreas desconectadas deberían ser suministradas por un segundo tanque y reacomodando las válvulas de aislamiento de las zonas. El tanque debería

Material suplementario 4.5

Cálculo por prueba volumétrica

llenarse primero hasta su nivel máximo, antes de cerrar las válvulas de entrada y salida. Se observa fluctuaciones en el nivel de agua en un período de 4 a 12 horas. La duración exacta depende de los criterios locales de suministro. En general, un período de prueba largo proporciona resultados más confiables. Se puede derivar la tasa de fuga del tanque dividiendo el volumen de agua perdida por la duración de la prueba.

(b) Evaluación de pérdidas a partir de las troncales de transmisión

Las troncales de transmisión usualmente tienen sólo unas cuantas conexiones de rama, lo cual hace relativamente fácil determinar las pérdidas de agua potenciales. Si no se instala medidores de flujo principales en las troncales de transmisión, se puede realizar mediciones de flujo utilizando medidores de flujo portátiles. El caudal debe medirse simultáneamente corriente arriba y corriente abajo de una sección del tubo. Los resultados razonables requieren condiciones de flujo estables, tubos completamente llenos y que todas las conexiones laterales a la red secundaria se puedan cerrar. El resultado de estas mediciones dará una buena idea de las pérdidas generales a lo largo de las principales transmisiones. Debería tomarse mediciones detalladas si las pérdidas reales de agua son altas y se tienen que focalizar aun más, por ejemplo analizando gradualmente secciones de tubo más cortas.

En el lago plazo, tiene sentido instalar medidores de flujo permanentes en las troncales de transmisión. Todas las fuentes y puntos de entrega deben estar equipados con medidores de flujo para monitorear la producción y distribución de agua continuamente y controlar las pérdidas de agua en las troncales de transmisión.

(c) Evaluación de pérdidas en la red de distribución

Es más difícil medir las pérdidas dentro de la red de distribución porque normalmente esto tiene una estructura más compleja. Se puede realizar mejor las mediciones si se puede cambiar temporalmente los arreglos de suministro y si se puede separar el área de suministro en zonas discretas con límites designados. En este caso, se puede instalar medidores de flujo portables en los puntos de entrada (y salida) de las áreas discretas. La elección de método de medición para establecer las ubicaciones de la fuga debe basarse en el tipo de suministro y en las características de diseño del sistema de suministro y distribución, por ejemplo si el suministro es continuo o intermitente. [22]

Material suplementario 4.6

Análisis del caudal mínimo nocturno (CMN)

Se puede utilizar los métodos siguientes para medir las fugas:

Análisis del caudal mínimo nocturno (en sistemas con suministro continuo)

El método del caudal mínimo nocturno (CMN) es conveniente para sistemas que se operan continuamente. Este método se basa en el supuesto de que el consumo autorizado cae a un

mínimo durante las horas nocturnas (usualmente entre las 2 y las 4 am). Por lo tanto, las pérdidas reales representan el porcentaje máximo del flujo.

La cantidad alimentada en una zona discreta durante este período se mide continuamente y se analiza la participación del consumo legítimo y las pérdidas de acuerdo con la *Ecuación 4.1*:

Ecuación 4.1

$$Q_{in} = Q_{dom} + Q_{granel} + Q_{trans} + Q_{pérdida}$$

Donde:

Q_{in}	[m³/h]	Ingreso en el sistema
Q_{dom}	[m³/h]	Uso nocturno doméstico
Q_{granel}	[m³/h]	Uso nocturno no doméstico
Q_{trans}	[m³/h]	Transferencia de agua a zonas aledañas
$Q_{pérdida}$	[m³/h]	Pérdidas de agua

El consumo legítimo consiste de uso nocturno doméstico Q_{dom} (principalmente para los inodoros) y el uso nocturno no doméstico Q_{granel} (usuarios administrativos, industriales, comerciales o agrícolas) que pueden representar un gran porcentaje de caudal mínimo nocturno. Allí donde un estudio piloto puede estimar o determinar el uso doméstico nocturno, es importante identificar los consumidores a granel y determinar su consumo nocturno. También deben medirse las exportaciones y transferencias de agua a zonas aledañas Q_{trans} durante la evaluación de CMN. Para determinar las pérdidas diarias de agua de la zona en cuestión, debe tomarse en cuenta la proporción de presiones nocturnas y diurnas zonales calculando el factor día/noche (FDN). Los perfiles de presión en el punto promedio de zona (PPZ) deben medirse en el exponente α de fuga del sistema *(ver Capítulo 3.4.2)* y deben determinarse para calcular el FDN. El volumen de pérdidas de agua reales por día Qpérdida,d se puede determinar de acuerdo a la *Ecuación 4.2* y *4.3 en la página siguiente*.

Los valores típicos de FDN varían de 20 o menos en los sistemas alimentados por la gravedad a más de 30 horas al día en áreas de gestión de presión con sistemas modulados de flujo.

La medición puede tomarse ya sea para todo el sistema o para zonas discretas separadas por el cierre de válvulas de aislamiento. Las zonas más pequeñas producirán resultados más exactos porque el tamaño de la zona y el número de habitantes conectados tiene un efecto sobre la simultaneidad de las abstracciones de agua. Los flujos se pueden medir ya sea en uno o varios puntos dentro de la zona. Tomar medidas en distintos puntos hará más precisa la determinación de las pérdidas reales. El ingreso al sistema en zonas pequeñas directamente suministradas por uno o más tanques se puede determinar fácilmente utilizando la prueba volumétrica de tanque descrita anteriormente. La única diferencia es que la válvula de

salida se deja abierta. Si no, se puede medir las tasas de flujo utilizando medidores de flujo portátiles y los datos adquiridos deben registrarse en formato electrónico para su procesamiento posterior.

4.2

$$Q_{pérdida,d} = FDN \times Q_{pérdida}$$

4.3

$$FDN = \sum_{i=0}^{24} \left(\frac{P_i}{P_{CMN}}\right)^{\alpha}$$

Ecuación

Donde:

$Q_{pérdida,d}$	[m³/d]	Volumen de pérdida real diaria
FDN	[h/d]	Factor día/noche
$Q_{pérdida}$	[m³/h]	Caudal mínimo nocturno promedio
P_i	[m]	Presión promedio en PPZ durante 24 horas
P_{CMN}	[m]	Presión promedio en PPZ durante condiciones de CMN
α	[-]	Exponente de fuga

Método de interrupción de flujo en los caños (en sistemas con suministro intermitente)
Los sistemas suministrados de manera intermitente se tienen que tratar con atención especial porque solamente son operados a presiones bajas y por períodos cortos. Debido a que los clientes en sistemas intermitentes usan comúnmente tanques de almacenamiento privados el llenado del tanque distorsiona las características del caudal nocturno. Los métodos convencionales, como el sistema de CMN, por lo tanto no se pueden utilizar para evaluar las fugas.

Este método ofrece una alternativa. Este método se tiene que aplicar en áreas pequeñas, aisladas que se pueden crear cerrando válvulas de aislamiento. Como paso siguiente, todas las conexiones de los clientes tienen que cerrarse para evitar el llenado de tanques privados. Este sistema entonces se presuriza y se puede medir las pérdidas tal como se describe anteriormente. Este enfoque dará una idea de dónde se ubican las pérdidas pero un balance hídrico apropiado no puede desarrollarse aún ya que el modo de operación no está en línea con las condiciones normales *(ver Capítulo 3.4.2)*. Una desventaja de este método es que se perderán volúmenes considerables de agua en el punto de fuga y todas las fugas no se pueden identificar durante el corto período de prueba. Además, los clientes se quedan sin suministro por varias horas.

Material suplementario 4.7

Determinación de pérdidas reales en sistemas con suministro intermitente

Método de cisternas móviles (en sistemas con suministro intermitente)
Este método se basa en una fuente de agua extra, que se utiliza para suministrar el área durante el período de prueba. Se desarrolló para superar la dificultad de desviar el suministro a áreas pequeñas y aisladas. Adicionalmente, no se perturba la operación normal y se puede limitar la cantidad de agua perdida. Se alimenta el agua al sistema desde una camión cisterna común de agua. [22] Se mantiene la presión de prueba deseada utilizando una bomba montada. En este caso tampoco se puede abastecer a los clientes de agua durante el período de prueba.

Medición continua
El mejor método para determinar las pérdidas reales de agua en la red de distribución es la organización constante de la red en zonas discretas con medidores de flujo permanentes instalados en todos los puntos de entrada y contadores de agua domiciliarios. La empresa de agua obtendrá una buena imagen general de la condición de su sistema de suministro de agua y podrá detectar las rupturas de tubería casi instantáneamente al monitorear continuamente el ingreso al sistema y leer regularmente los contadores de los clientes.

Los métodos descritos hasta el momento son convenientes para evaluar y cuantificar las pérdidas de agua en zonas o redes. Este paso permitirá a la empresa de agua adquirir una imagen general de la situación actual y priorizar las contramedidas para zonas en donde las pérdidas son más drásticas. Una vez que sabemos que las pérdidas de agua existen en una zona, todavía hay que detectar las fugas. Los métodos e instrumentos para la detección de fugas se describen en *el Capítulo 6.6.*

4.3.5 Evaluar y cuantificar las pérdidas aparentes de agua

Como se afirma en la *Capítulo 3.5.2*, las pérdidas aparentes son pérdidas no físicas causadas por (a) inexactitudes de los medidores de agua (b) errores en el manejo de datos y (c) cualquier forma de consumo no autorizado (robo de agua y uso ilegal). La cuantificación de las pérdidas aparentes en una red de distribución es una tarea difícil que se tiene que basar principalmente en supuestos y estimados. Estos supuestos deberían separarse para cada una de las tres fuentes de pérdidas aparentes tal como se describe a continuación. [77] Aunque los volúmenes asumidos de pérdidas aparentes estarán sujetos a errores y por lo tanto serán aproximados en cierto grado, se requiere este paso para determinar el balance hídrico. [48]

(a) Evaluación de inexactitudes del medidor

Las pérdidas aparentes debidas a inexactitudes del medidor se pueden estimar seleccionando un grupo representativo de contadores domésticos a la vez que se toma en cuenta los distin-

tos tipos, marcas, tamaños y grupos de edad de contadores y se los verifica en un banco de pruebas. Los grandes medidores de flujo también se pueden probar in-situ y en operación por medio de medidores de flujo portables calibrados. Las inexactitudes del medidor promedio (porcentaje de sobre-registro o sub-registro) para cada grupo de medidores se pueden aplicar entonces a todo el parque de medidores. [77]

(b) Evaluación de los errores de manejo de datos

Los errores de manejo de datos se pueden detectar y cuantificar por medio de software de base de datos estándar. Los errores de lectura de los medidores se pueden reducir capacitando continuamente a los lectores de medidores e introduciendo rutinas de trabajo estandarizadas.

(c) Evaluación del consumo no autorizado

La empresa de agua necesita estimar el número de conexiones ilegales para cuantificar el uso no autorizado del agua, por ejemplo conduciendo una encuesta casa por casa en una zona piloto. Luego, el número estimado de conexiones ilegales tiene que multiplicarse por el tamaño del hogar típico y el consumo de agua per capita. Las conexiones ilegales que los trabajadores de la empresa de agua descubren accidentalmente deberían así registrarse siempre. El número de medidores rotos, evitados o manipulados también se debería tomar en cuenta en base a información de los lectores de medidores u otro personal de la empresa. [22]

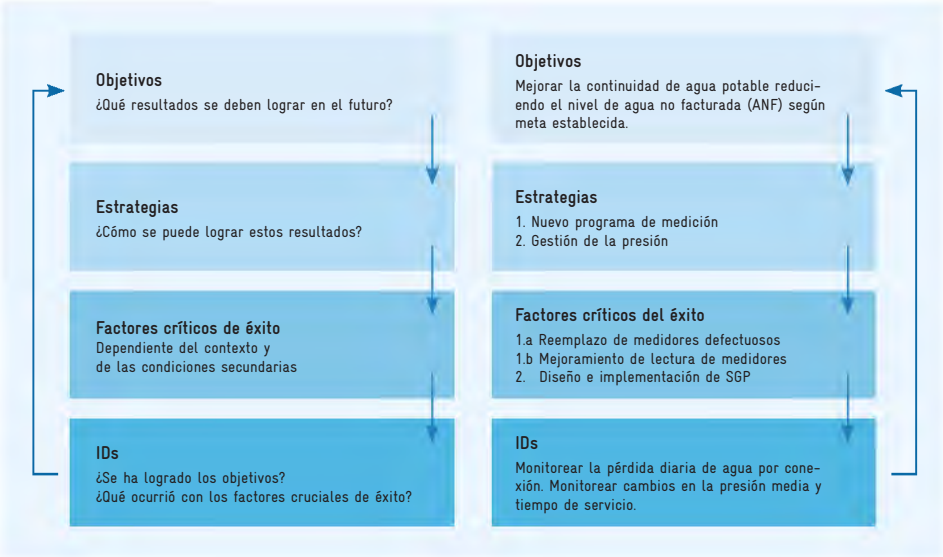
4.3.6 Cálculo y análisis de los indicadores de desempeño relevantes

El establecimiento de un balance hídrico estandarizado proporciona a la empresa de agua cifras confiables respecto de la cantidad de pérdidas reales y aparentes en su sistema de suministro de agua. Los distintos indicadores de desempeño (ID) deben entonces calcularse y analizarse para determinar si estas pérdidas son comparativamente altas o bajas. [45] Sin embargo, los indicadores de desempeño no son solamente herramientas para las comparaciones nacionales o internacionales entre empresas de suministro de agua y nunca deben ser un fin en sí mismos: los indicadores de desempeño ayudan a extraer información necesaria de enormes cantidades de datos y son una herramienta útil para los procesos de toma de decisiones. Como primer paso, es importante definir objetivos precisos y claros y determinar las estrategias más convenientes para cumplirlas. Entonces se debe seleccionar indicadores de desempeño apropiados y se debe recolectar los datos de ingresos necesarios.

Las siguientes secciones ofrecen una breve introducción a los indicadores de desempeño principales para las pérdidas de agua. La lectura del manual de mejores prácticas sobre indicadores de desempeño para los servicios de suministro de agua de la IWA [2] se recomienda

mucho para indicadores de desempeño que cubren todo el espectro del abastecimiento de agua. Estos indicadores se desglosan normalmente en (a) indicadores de desempeño financieros y (b) técnicos.

Figura 4.1 Uso de indicadores de desempeño en los procesos de toma de decisiones: enfoque general (izquierda) y ejemplo (derecha). Según [2]



(a) Indicadores de desempeño financieros

Una vez que se conoce el ingreso al sistema y que se han determinado las partes respectivas de agua facturada y agua que no facturada, se debe calcular un simple indicador de desempeño (ID) financiero para cada componente de los tres constituyentes mayores del agua no facturada:

Ecuación 4.4

$$P_A = (Q_{AuNF} + Q_{PA}) \times C_{PV} + Q_{PR} \times C_P$$

Donde:

P_A	[USD]	Pérdidas anuales
Q_{AuNF}	[m³]	Volumen de consumo autorizado no facturado
Q_{PA}	[m³]	Pérdidas aparentes
Q_{PR}	[m³]	Pérdidas reales
C_{PV}	[USD/m³]	Precio de ventas
C_P	[USD/m³]	Costo de producción

El consumo no autorizado de las pérdidas aparentes debe tasarse al precio de venta promedio del agua ya que representa volúmenes de agua que han sido entregados al consumidor. Las pérdidas reales generalmente se pueden tasar a los costos de producción promedio o con el precio de compra (si el agua es importada de otra empresa de agua) o incluso al costo de explotar fuentes alternativas (por ejemplo desalinización) si existen faltas de abastecimiento de agua. La proporción entre los componentes de las pérdidas anuales P_A y el costo anual de administrar la red de abastecimiento de agua proporciona una buena imagen general de la medida de las pérdidas de agua. [48]

(b) Indicadores de desempeño técnicos

Es un hecho ampliamente aceptado que una tasa porcentual de pérdida de agua (tasa de pérdida de agua [%] = pérdidas de agua reales anuales Q_{PR} / ingreso al sistema Q_I) no es un indicador de desempeño técnico conveniente porque no considera la longitud de la red de distribución, el número de conexiones de servicio y la presión del sistema. Por lo tanto se recomienda indicar pérdidas de agua específicas en proporción a la longitud de la red [13], como se muestra en la *Ecuación 4.5*.

La experiencia internacional muestra que la mayor proporción de pérdidas ocurre en conexiones de servicio más que en las troncales, excepto en áreas con baja densidad de conexión. Por lo tanto, las pérdidas de agua se pueden calcular de manera proporcional al número de conexiones de servicio, tal como se muestra en la *Ecuación 4.6*.

4.5

$$Q_{PE} = \frac{Q_{PR}}{L_R \, x \, 365}$$

4.6

$$Q_{PCD} = \frac{Q_{PR}}{N_C \, x \, 365}$$

Ecuación

Donde:

Q_{PE}	[m³/km/d]	Pérdidas de agua específicas
Q_{PR}	[m³/a]	Pérdidas de agua reales anuales
L_R	[km]	Longitud de la red (sin conexiones del servicio)
Q_{PCD}	[m³/conexión/d]	Pérdidas de agua por conexión y día
N_C	[-]	Número de conexiones de servicio

Ambos ID son comparables solamente entre sistemas de abastecimiento de agua de tamaño y estructura similares. Por lo tanto, se recomienda expresar las pérdidas de agua en base a cada kilómetro de las troncales *(ver Ecuación 4.5)* para las redes rurales con menos de 20 conexiones de servicio por km. Se debe usar la *Ecuación 4.6* para áreas densamente pobladas con más de 20 conexiones por km. [53]

Lambert et al. [45] introdujo una metodología auditable basada en componentes para calcular indicadores de desempeño técnicos estandarizados que sirvan para evaluar y comparar las pérdidas reales de agua, lo cual permite comparar sistemas de distinto tamaño y estructura. Este ID toma en consideración los cinco factores locales clave con mayor impacto en las pérdidas reales de agua: la longitud de las troncales, la presión operativa promedio, el número de conexiones de servicio, la ubicación de medidores de los clientes y la continuidad del suministro. Este método se describe en las siguientes secciones.

Pérdidas reales anuales actuales (PRAA)

El WLTF de la IWA desarrolló la ecuación de pérdidas reales anuales actuales (PRAA) que ha sido adoptada por varias asociaciones técnicas nacionales y servicios públicos en todo el mundo en los últimos diez años. El índice PRAA también es válido para las redes de distribución de agua con suministro intermitente cuando se toma en cuenta el número de días en los que el sistema está presurizado. El índice PRAA se define como:

Ecuación 4.7

$$PRAA = \frac{Q_{PR} x\ 10^3}{N_{dsp}}$$

Donde:

PRAA	[l/día w.s.p.]	Pérdidas reales anuales actuales de agua
Q_{PR}	[m³/a]	Pérdidas reales anuales de agua
N_{dsp}	[-]	Número de días en los que el sistema está presurizado (d.s.p.)

Pérdidas reales anuales inevitables (PRAI)

Las pérdidas de agua reales existen en todas las redes grandes de distribución de agua y nunca se pueden eliminar por completo. Una cierta cantidad mínima de pérdidas reales permanecerá, incluso en secciones de la red que acaban de entrar en servicio. [77] A este monto se le llama pérdidas reales inevitables, que representan el volumen de pérdidas reales que

podrían alcanzarse a la presión operativa actual si no hubiera limitaciones financieras o económicas. Entonces la proporción entre las PRAA y las PRAI representa el potencial de reducción de las pérdidas de agua reales.

El índice PRAI se basa en factores relacionados con la longitud de las troncales, el número de conexiones de servicio y la ubicación de los contadores de los clientes, y es válido para la presión operativa promedio. El caudal de fuga desde las fugas de fondo (indetectables), reportadas y no reportadas a la presión promedio se calcula para cada componente (las troncales, conexiones de servicio y tubos de servicio). *Allan Lambert* desarrolló esta ecuación en 1999 sobre la base de conjuntos de datos internacionales y desde entonces ha sido validada comparando sus resultados con resultados de prueba de un gran número de sistemas de suministro de agua bien administrados en varios países. [45] La ecuación estándar resumida para las PRAI (en litros por día) se define como:

Ecuación 4.8

$$PRAI = (18 \times L_R + 0.8\, N_C + 25 \times L_P) \times P_P$$

Donde:

PRAI	[l/ c.s.p. día]	Pérdidas reales anuales inevitables
L_R	[km]	Longitud de la red (sin tubos de conexión de servicio)
N_C	[-]	Número de conexiones de servicio
L_P	[km]	Longitud de tubos de servicio privados luego de la línea de propiedad
P_P	[m]	Presión operativa promedio

Mientras que la mayoría de empresas de agua conoce la longitud de las troncales y el número de conexiones de servicio de sus sistemas, será más difícil obtener la longitud de tubos de servicio instalados en propiedades privadas: LP se puede asumir como cero si el medidor del cliente se ubica cerca del límite de la propiedad. De otro modo, la longitud promedio de los tubos de servicio puede obtenerse de un número de inspecciones al azar si no hay información detallada del registro de red. [50]

La ecuación y sus parámetros fijos han sido derivados del análisis estadístico de 27 sistemas diferentes de suministro de agua en 20 países (sírvanse referirse a *Lambert et al.*, 1999 para los detalles de derivación de esta ecuación). La proporción de PRAA a PRAI se llama índice de fugas estructurales (IFE).

Índice de fugas estructurales (IFE)

El indicador de desempeño sin dimensión IFE es una medida de cuán bien está implementando la empresa de agua su estrategia de manejo de fugas y la gestión de la infraestructura.

El IFE se define como:

Ec. 4.9

$$IFE = \frac{PRAA}{PRAI}$$

La *Figura 4.5 en la página 100* ofrece una buena idea de la interrelación entre los cuatro componentes del manejo de fugas y la proporción de PRAA respecto de PRAI. La combinación de todas las medidas de manejo de fugas permite reducir el volumen de pérdidas reales anuales actuales hasta el PRAI, que es el volumen más bajo técnicamente factible de pérdidas reales a la presión operativa actual. Es importante recordar que el IFE es un indicador de desempeño puramente técnico, que no toma en cuenta ninguna consideración económica. Por tanto un IFE de 1,0 (el PRAA = el PRAI) no tiene que ser rentable desde un punto de vista económico, por ejemplo si el costo marginal del agua es muy bajo. [50]

Material suplementario 4.8

Cálculo de IFE

Los diez años de experiencia con el IFE muestran que se puede aplicar para hacer comparaciones a nivel internacional, nacional, de ciudades o de todo el sistema en redes que cumplen con los siguientes requisitos: [50]

- número de conexiones: $N_c > 3.000$
- presión promedio: $P_p > 25$ m
- densidad de la conexión: sin límite inferior o superior.

4

Luego de calcular el IFE para un sistema de suministro de agua se puede obtener una evaluación inicial de su condición y una descripción inmediata del manejo de pérdidas de agua reales utilizando el sistema de bandas del Instituto del Banco Mundial que se muestra en la *Tabla 4.5 en la página siguiente*.

Índice de gestión de la presión (IGP)

El índice de gestión de la presión es un índice relativamente nuevo que tiene como objetivo ser una herramienta de apoyo para evaluar el alcance de la eficiencia potencial del manejo de la presión. Como el IFE, el IGP es la proporción entre la presión de la zona promedio actual P_A y la presión aceptable mínima P_{min}. En este caso, P_p es la presión promedio en el sistema *(como en la Ecuación 4.8)* la cual debe ponderarse por ubicación de conexión de servicio y también considerar variaciones estacionales. P_{min} debe relacionarse al estándar mínimo de servicio. El estándar mínimo de servicio variará de un país a otro y normalmente está prescrito por estándares, reguladores, el gobierno y/o las asociaciones gremiales. Normalmente su rango está entre 5 y 25 metros, dependiendo de la altura de

Tabla 4.5 Sistema de bandas del Instituto del Banco Mundial para países desarrollados y en desarrollo [53]

Banda del WBI	Rango del IFE		Descripción del lineamiento de categorías de desempeño en cuanto a pérdidas reales de agua
	Países desarrollados	Países en desarrollo	
A	< 2,0	< 4,0	Una reducción de pérdidas que va más allá puede ser no económica salvo que haya falta de abastecimiento; se necesita un análisis cuidadoso para identificar un manejo costo-efectivo de las fugas
B	2,0 a < 4,0	4,0 a < 8,0	Posibilidades de mejoría adicional; considerar gestión de presión, mejor control activo de fugas, mejor mantenimiento
C	4,0 a < 8,0	8,0 a < 16,0	Mal manejo de fugas, tolerables sólo si existen muchos recursos baratos; incluso así, analizar el nivel y la naturaleza de las fugas, e intensificar los esfuerzos de reducción
D	8,0 o más	16,0 o más	Uso de recursos muy ineficiente indica mal mantenimiento y mala condición del sistema en general, los programas de reducción de fugas son imperativos y de alta prioridad

los edificios y de los requisitos de los bomberos locales. Debe añadirse un margen de seguridad $P_{seguridad}$ a P_{min}. [83] Así, el IGP se puede describir como:

Ecuación 4.10

$$IGP = \frac{P_A}{P_{min} + P_{seguridad}}$$

Donde:

IGP	[-]	Índice de gestión de la presión
P_A	[m]	Presión de la zona promedio actual
P_{min}	[m]	Estándar mínimo de servicio
$P_{seguridad}$	[m]	Margen de seguridad (usualmente 3 m)

Se tiene que considerar que el IGP no toma en cuenta ni la factibilidad de medidas de manejo de la presión posteriores ni los costos involucrados. No obstante puede ser una herramienta útil para estimar el potencial de reducción de pérdidas de agua por medio de reducción de la presión. El IGP también se incorpora en el proceso de calcular el objetivo de niveles fugas *(ver Capítulo 4.4.3)*.

4.3.7 Evaluación de ahorros potenciales

Cada empresa de agua debe desarrollar un programa de reducción de pérdidas de agua en base a sus presupuestos operativos actuales. El control de fugas puede ser caro. Por lo tanto, las empresas de agua deben aspirar a alcanzar un equilibrio económico entre los costos de las fugas y los beneficios que resultarán de un control activo de fugas (CAF). Antes de que se pueda determinar el nivel económico de fuga (NEF) la empresa de agua debe desarrollar una estructura de costos clara y distinta.

Los costos de una empresa de agua se pueden dividir en costos operativos del día a día y costos de capital fijo. La *Tabla 4.6* muestra los distintos elementos en la estructura de costos de una empresa de agua. Mano de obra, energía y capital son los factores de producción más importantes para una empresa de agua. Un programa de reducción de pérdidas de agua puede reducir la mayoría de estos costos y el costo de electricidad será normalmente el rubro más receptivo.

Tabla 4.6 Estructura de costos típica de una empresa de agua

Gastos operativos (OPEX)	Gastos de capital (CAPEX)
→ mano de obra (personal interno) → costo de agua importada (cruda/tratada) → costo de energía eléctrica → costo de abstracción y tratamiento → costo material → costo de transmisión, almacenamiento y distribución → costo de gestión de medidores → costo de control activo de fugas → costo de servicios tercerizados	→ depreciación → interés neto (diferencia entre los gastos por intereses y los ingresos por intereses)

En general, los costos de la electricidad pueden variar enormemente dependiendo de las condiciones locales que una empresa de agua enfrenta. De acuerdo con la plataforma internacional para la comparación de empresas de agua IBNET (*www.ibnet.org*), los datos de más de 2.500 empresas de agua en todo el mundo mostraron que los costos de electricidad conforman un promedio de alrededor del 23% de los gastos operativos, mientras que la mano de obra utiliza hasta 36%. En épocas de precios crecientes de la energía, se puede asumir que la proporción de los costos de energía se incrementará incluso en los años venideros.

La suma de factores de costo operativo y de capital constituye los costos totales de la empresa de agua. Una empresa de agua que sigue una política de recuperación de costos calculará sus costos de producción dividiendo el costo general entre la cantidad de agua producida.

Los costos de producción se definen como:

Ecuación 4.11

$$C_P = \frac{(CAPEX + OPEX)}{Q_I}$$

Donde:

C_P	[USD/m³]	Costo de producción
Q_I	[m³/a]	Volumen que ingresa al sistema
CAPEX	[USD/a]	Gastos de capital por año
OPEX	[USD/a]	Gastos operativos por año

Una vez que el costo promedio de producir un m³ de agua potable se ha determinado, se puede determinar en general los ahorros potenciales gracias a la reducción de las pérdidas reales de agua:

Ecuación 4.12

Potencial de reducción de pérdidas aparentes		Potencial de reducción de pérdidas reales

$$PA_A = (Q_{AuNF} + Q_{PA}) \times C_{PV} + (Q_{PR} - PRAI_y) \times (C_P - C_{CAF})$$

Donde:

PA_A	[USD]	Potencial de ahorro anual
Q_{AuNF}	[m³/a]	Volumen de consumo autorizado y no facturado
Q_{PA}	[m³/a]	Pérdidas aparentes
C_{PV}	[USD/m³]	Precio de venta
Q_{PR}	[m³/a]	Pérdidas reales
$PRAI_y$	[m³/a]	Pérdidas reales anuales inevitables (= UARL x 365 / 1.000)
C_P	[USD/m³]	Costo de producción
C_{CAF}	[USD/m³]	Costos para medidas de control activo de fugas

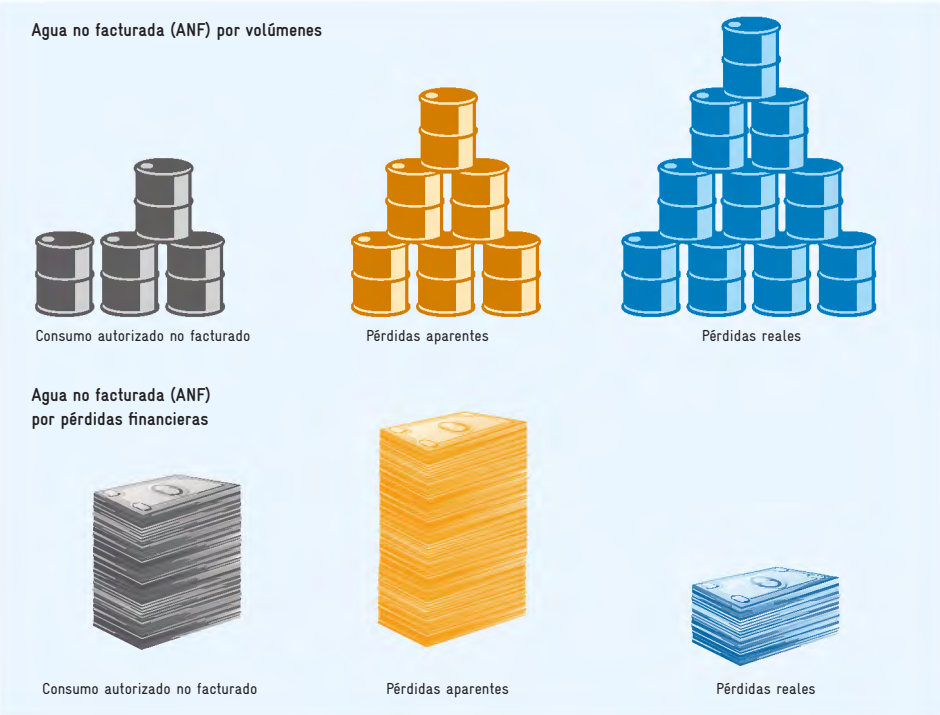
Los costos del control activo de fugas son únicos a cada empresa de agua y se tienen que determinar de manera empírica, tomando en cuenta gastos de infraestructura, personal y materiales. Los métodos activos de control de fugas se describen en el *Capítulo 6.5*.

4.4 Identificación de medidas apropiadas

4.4.1 Métodos de selección

El cálculo detallado del balance hídrico y la determinación de los ahorros potenciales de pérdidas reales y aparentes son factores decisivos cuando se selecciona los métodos correctos para la reducción de pérdidas de agua. Las empresas de agua siempre deben fijar primero su vista en los componentes de agua no facturada en donde las inversiones generarán la tasa de retorno más alta. Por lo tanto, es importante comparar los componentes de agua no facturada no sólo por sus volúmenes, sino también por sus impactos financieros. La *Figura 4.2* ofrece un ejemplo de que los volúmenes de pérdida de agua anuales más altos no necesariamente incurren en pérdidas financieras más altas para una empresa de agua. La recuperación de pérdidas aparentes es posible a un costo relativamente bajo y mejorará directamente la posición financiera de la empresa de agua, especialmente al inicio de un programa de control de pérdidas de agua. Estos fondos recuperados pueden servir para financiar actividades de control de pérdidas de agua en el largo plazo. [77]

Figura 4.2 Ejemplo de la distribución volumétrica y financiera de las pérdidas, según [26]



Se dispone de un conjunto de medidas específicas para contrarrestar cada componente del agua no facturada:

Tabla 4.7 Métodos para combatir el ANF

Componente	Medidas de contraataque
Consumo autorizado no facturado	→ incrementar tasa de cobranza → reducir consumo autorizado dentro y fuera de la empresa de agua → observar y reducir número de clientes no facturados
Inexactitudes de la medición	→ establecer demografía de población de medidores → hacer pruebas de exactitud de medidores regularmente → introducir rotación de medidores y programa de mantenimiento
Errores de lectura de medidores y transferencia de datos	→ analizar registros de facturación buscando patrones de consumo inusuales y lecturas de medidores faltantes → auditar muestras de cuentas sospechosas [77] → cambiar de lectura manual a lectura automática de medidores (LAM)
Errores de manejo de datos	→ flujograma del sistema de proceso de facturación → conducir análisis del proceso de facturación [77] → introducir uso de sistemas de facturación computarizados → adoptar anualización correcta de datos de consumo → mejorar manejo de cuentas de clientes → compilar datos demográficos de cuentas de clientes y buscar anomalías en consumo
Consumo no autorizado	→ conducir inspecciones de medidores que han sido manipulados o evitados y de conexiones ilegales → reprimir la mala utilización de grifos anti-incendios y otras formas de consumo ilegal → evitar el fraude por lectura de medidores de la empresa de agua → usar estructuras prepago
Fuga desde estallidos y roturas detectables	→ conducir campaña para reparar acumulación de roturas de tubos reportada/visibles → reducir número de estallidos y fugas: • implementando gestión de presión (corto plazo) • desarrollando estrategia de rehabilitación (largo plazo) → reducir tiempo de ocurrencia de fugas: • introduciendo monitoreo continuo de la red • mejorando control activo de fugas • mejorando rapidez y calidad de reparaciones
Fuga de fondo	→ implementar gestión de presión → desarrollar estrategia de rehabilitación de largo plazo

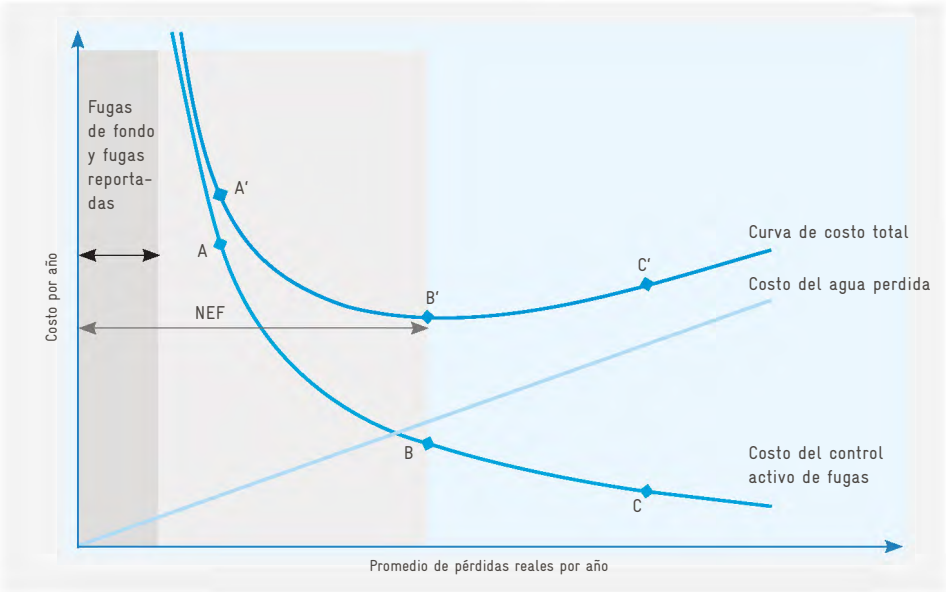
No todas las medidas especificadas en la *Tabla 4.7* son apropiadas para cada empresa de agua. Por lo tanto se debe hacer análisis costo/beneficio para los métodos de elección.

4.4.2 Definición del nivel económico de fuga

El concepto de nivel económico de fuga (NEF) describe el equilibrio entre los costos del control de fugas y sus beneficios, por debajo de los cuales no es económico hacer mayores inversiones ni usar recursos adicionales para bajar las fugas más. En otras palabras, el valor del agua ahorrada es menor que el costo de lograr cualquier reducción adicional en las pérdidas. [23] El NEF entonces tiene que ver con las preguntas de cuál debería ser el objetivo de fuga de una empresa de agua y cómo se puede justificar su costo.

En teoría el nivel más económico está determinado de la manera siguiente: si el costo marginal del agua es constante, el costo del agua perdida se puede describir como una función que se eleva linealmente con un nivel de fuga creciente *(ver Figura 4.3)*. Los costos acumulados de las medidas de control de pérdidas de agua se representan por una función convexa estrictamente decreciente- esto se debe al hecho de que el costo marginal de reducir las pérdidas de agua es mucho más bajo a un nivel de fuga alto que a niveles de fuga bajos. El costo total para una empresa de agua se puede calcular sumando el costo del agua perdida al costo de las medidas de control de pérdidas.

Figura 4.3 Determinación del nivel económico de fugas (NEF), según [45]



La *Figura 4.3 en la página anterior* ilustra cómo el costo del control activo de fugas se incrementa a medida que el nivel de fugas se reduce y el costo anual de las pérdidas de agua se reduce (C - B - A). El nivel económico de fuga ocurre en el punto más bajo en la curva del costo total *(punto B' en la Figura 4.3)*. [45]

En la práctica, determinar el NEF es un proceso bastante complejo e iterativo ya que los efectos de cada medida de control de pérdidas de agua implementados no se conocen de antemano. Además, la función del costo del agua usualmente no se puede describir linealmente, debido a que la mano de obra y el capital no muestran un incremento lineal con el nivel de fugas. Adicionalmente, se puede hacer la distinción entre un NEF de corto plazo y de largo plazo. El NEF de corto plazo sólo considera factores de costo operativos, y por lo tanto, se puede comprar determinando el costo y los beneficios de las medidas adicionales

Tabla 4.8 Determinación del NEF

Paso	
Determinación del estado actual de la empresa de agua	→ ¿Cuál es nivel de fuga real? → ¿Cuáles son los costos operativos actuales? → ¿Cuáles son los costos de capital actuales? → ¿Cuál es el monto actual que se gasta en el control activo de fugas?
Determinación del PRAI:	→ El PRAI indica el potencial de una mayor reducción de pérdidas de agua
Evaluación de la estructura de costos actual	→ ¿Qué ahorros potenciales se pueden identificar o estimar cuando se analiza el costo operativo y de capital? → El costo marginal de la inversión de capital debería tomarse en cuenta en el cálculo del NEF en el caso de recursos limitados de agua y si se tiene que construir nuevos recursos de agua o capacidad de tratamiento.
Selección de una serie de actividades	→ Se debe elegir una serie de actividades de reducción de fugas de acuerdo con los ahorros potenciales estimados. Se debe analizar y calificar los costos y beneficios de estas medidas. → Las cuatro actividades principales son el control activo de fugas, la velocidad y la calidad de las reparaciones, el manejo de la presión y la administración de la infraestructura [66]
Reevaluación de la estructur a de costos	→ Se tiene que reevaluar los beneficios de las actividades elegidas luego de un periodo adecuado. Se recomienda un periodo de al menos cada cinco años. La reevaluación se realiza repitiendo los pasos previos. → Se continúa con este proceso hasta que el costo marginal de cualquier actividad sea igual a o mayor que el costo marginal del agua. En ese momento, se alcanzará el nivel económico de fuga. → La evaluación debe tomar en cuenta el hecho de que las pérdidas anuales de agua podrían mostrar fluctuaciones al azar. Por lo tanto, la meta de fuga de la empresa de aguase debe basar en el promedio a lo largo de un número de años. → Este análisis se obtiene desde la perspectiva de una empresa de agua que opera con un criterio económico. Sin embargo, una empresa de agua también incurre en costo ambiental y social. También existen medios para incluir los costos y beneficios de estos factores [80]

para controlar las pérdidas de agua con el costo marginal, el agua perdida, [6] por ejemplo, el control activo de fugas y la calidad y velocidad de las reparaciones. Otras actividades de control de fugas involucrarán gastos de capital sobre la infraestructura. En este caso se requiere un NEF de largo plazo que evalúe la decisión de inversión dentro de una evaluación de ciclo completo, por ejemplo para el manejo de la presión o la rehabilitación de redes [38]. Se puede seleccionar el procedimiento siguiente para determinar un NEF de la empresa de agua.

4.4.3 Fijación de metas

Los capítulos anteriores han mostrado que la eliminación completa de las pérdidas de agua en una red de distribución de agua no es ni factible ni económica. No obstante, las pérdidas excesivas de agua son el síntoma de otras deficiencias, como la ausencia de un sistema de mantenimiento y control. Estas fallas frecuentemente resultan en altos costos operativos y producen un suministro incierto e incluso intermitente. De este modo, cada empresa de agua debe fijarse un nivel meta entre estos dos extremos para las pérdidas de agua en su sistema de distribución. [82]

Estas metas pueden tener como motores las cuestiones referentes a la conservación del agua, la seguridad de abastecimiento a los clientes, consideraciones económicas o exigencias regulatorias. En cualquier caso, el nivel meta será una solución de compromiso entre una serie de factores que compiten entre sí, como el presupuesto disponible, los recursos humanos, la factibilidad técnica, las restricciones de tiempo e incluso consideraciones políticas. En las etapas iniciales de un programa de control de pérdidas de agua, las metas se basan principalmente en supuestos que luego se complementan por medio de información específica al sistema reunida a lo largo de todo el proceso.

Unidad de medida

Las metas de fuga requieren una unidad de medida para definir la situación inicial y para monitorear al progreso. El valor más confiable de fijación de metas para monitorear los cambios en el tiempo es el volumen absoluto de pérdidas de agua medidas en [m^3/d]. También es viable usar pérdida de agua por conexión de servicio y día [l/conexión de servicio/día] si la empresa de agua está creciendo en tamaño a medida que se está implementando el manejo de fugas en un período multianual.

Discreción espacial

Se debe fijar niveles meta para zonas discretas de la red de distribución de agua, por ejemplo para cada distrito hidrométrico (DHM) o zona de gestión de presión (ZGP), y luego se agrega la meta de fugas general de la empresa de agua. Con este enfoque se puede priorizar zonas particulares y el progreso en la reducción de pérdidas de agua se puede monitorear desde cada zona independientemente.

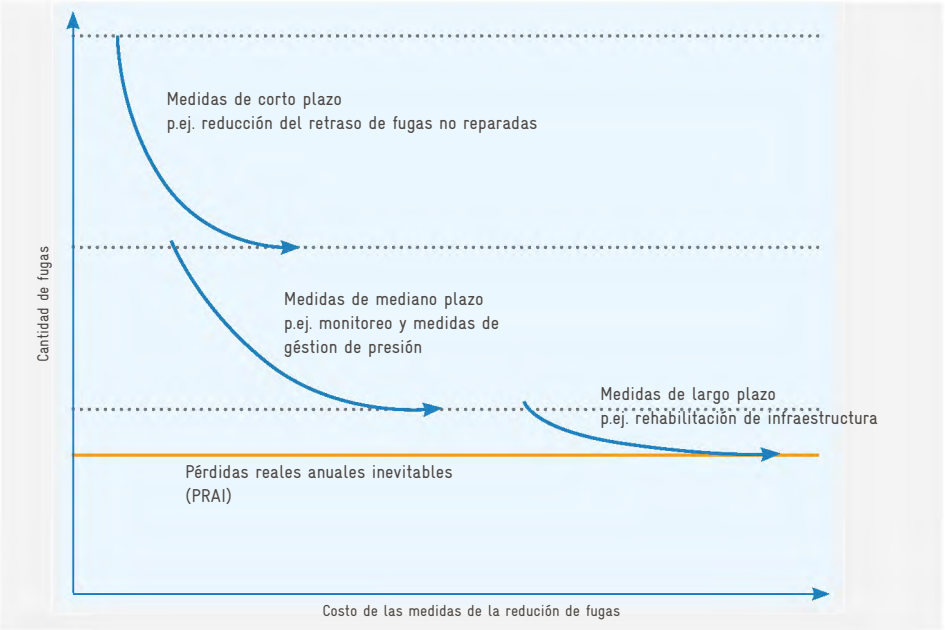
Escala de tiempo

Se debe elegir escalas de tiempo realistas para los objetivos de fuga. El manejo de fugas es un proceso laborioso y usualmente no hay soluciones rápidas y fáciles. Se recomienda un objetivo de largo plazo que sea ambicioso pero no irreal. Este objetivo de largo plazo se puede subdividir en objetivos de corto plazo de 3 a 5 años que buscan lograr un cierto porcentaje de la reducción de fugas de largo plazo. La escala de tiempo tiene que proveer períodos razonables para el diseño y establecimiento de instalaciones, las licitaciones, el otorgamiento de la buena pro, así como las obras de implementación. [81]

La reducción de las fugas sigue la ley de retornos decrecientes: el impacto de las medidas de reducción de fugas en términos de agua ahorrada disminuirá con la duración del avance del programa de manejo de fugas. Este efecto significa que las medidas de manejo de fugas normalmente siguen un patrón similar al que se muestra en la *Figura 4.4*:

Medidas de corto plazo: Las fugas serán relativamente fáciles de detectar al principio de un programa de manejo de fugas. Además, una acumulación de fugas reportadas y no repor-

Figura 4.4 Retornos decrecientes de las medidas de manejo de fugas, según [81]



tadas que pueden haberse acumulado en años previos se puede reducir bastante rápido. Una vez que esta acumulación se haya detectado y eliminado, se requiere más esfuerzo para reducir la fuga en un volumen similar. [81]

Medidas de mediano plazo: Las medidas de mediano plazo comprenden la instalación de DHM, dispositivos de medición y control y sistemas de gestión de presión. Nuevamente, al inicio se establecerá instalaciones que cubren una gran área, requieren un mínimo de válvulas y accesorios y tienen mayor impacto en las presiones promedio.

Medidas de largo plazo: Las medidas de largo plazo consisten principalmente en el reemplazo de troncales y conexiones de servicio, comenzando con las que presentan la mayor frecuencia de estallidos o el mayor flujo específico de fugas.

Cálculo de los niveles meta

Hay muchos factores que se toman en cuenta para determinar los niveles meta. Por lo tanto, cada empresa de agua debe definir su meta de acuerdo con sus medios y necesidades. No obstante, se presenta la siguiente ecuación como un instrumento para calcular los objetivos de pérdidas reales tomando en cuenta un control activo de fugas (que influencia el IFE) y el manejo de la presión (que influencia el IGP, *ver Capítulo 4.3.6)*. Se puede fijar metas anuales para el IFE y el IGP.

El nivel meta de las pérdidas reales anuales (MPRA) (usualmente medido en m³/a) puede calcularse entonces de acuerdo con la *Ecuación 4.13*.

Ecuación 4.13

$$MPRA = PRAA \, x \frac{MIFE}{IFE} \, x \frac{MIGP}{IGP}$$

Donde:

MPRA	[m³/a]	Meta de las pérdidas reales anuales
PRAA	[m³/a]	Pérdidas reales anuales actuales
IGP	[-]	Índice de gestión de la presión actual
MIGP	[-]	Meta del índice de la gestión de presión
IFE	[-]	Índice de de fugas estructurales actual
MIFE	[-]	Meta del índice de fugas estructurales

Al final de un año, se debe evaluar el proceso logrado y los recursos gastados y se los debe incorporar en el objetivo para el año siguiente. [83]

4.5 Diseño e implementación de un programa de control de pérdidas de agua

Material suplementario 4.9

Preparación del plan de acción

4.5.1 Plan de acción

El *Capítulo 3* ayudó al lector a comprender las razones de las pérdidas de agua y los impactos negativos en los sistemas de suministro de agua. Este capítulo ha presentado una serie de técnicas para evaluar y cuantificar la extensión de las pérdidas reales y aparentes de agua. Estas técnicas se construyen una sobre otra y se deben realizar paso a paso como una condición previa para el diseño y la implementación de un plan de acción apropiado, tal como se ilustra en la *Tabla 4.9*.

Tabla 4.9 Pasos de un Plan de Acción [81]

Etapa	Objetivo	Medidas / Herramientas
Preparación	Entender las razones y factores principales que influencian las pérdidas de agua	Estudios piloto, revisión de la literatura
	Recolectar información sobre el sistema de suministro de agua	Registro de redes, modelo de red hidráulica, medición de flujos y presiones
	Evaluar el nivel actual de las pérdidas reales y aparentes	Balance hídrico desde arriba hacia abajo, análisis de componentes, balance hídrico desde abajo hacia arriba
	Verificar la confiabilidad de los cálculos de balance hídrico	Bandas de exactitud, límites de confianza del 95%
	Analizar ahorros potenciales	
Fijación de metas	Calcular indicadores de desempeño relevantes	PRAA, PRAI, IFE, IGP
	Definir el nivel económico de fuga	NEF
	Seleccionar métodos de intervención apropiados	Control activo de fugas (CAF), DHM, gestión de la presión, rehabilitación y reemplazo de tubos
	Determinar metas de corto y largo plazo	MPRA
	Elaborar un plan de inversión	
Adquisiciones	Proveer servicios de apoyo, equipamiento, materiales, sistemas TI	
Ejecución de proyectos	Desplegar personal propio o contratar formas especializadas	
	Administrar obras	
	Capacitar personal	
Monitoreo y Mantenimiento	Revisar presupuestos	
	Monitorear el desarrollo de las fugas, mantener las instalaciones y el equipamiento	Base de datos de fallas, registro de redes
	Control activo de fugas permanente	
	Evaluar resultados	Balance hídrico, registro de redes

4.5.2 Selección e implementación de métodos de intervención

Se tiene que elegir un conjunto conveniente de métodos de intervención dependiendo de los componentes individuales de pérdida de agua. La combinación correcta de métodos de intervención depende de las características de cualquier sistema dado y la proporción costo beneficio de cada método que es específico a cada empresa de agua. La *Figura 4.5 en la página siguiente* muestra los métodos de intervención principales para manejar las pérdidas reales y aparentes. Cada empresa de agua tiene que decidir si un método único o una combinación de métodos ofrecerán la manera más económica de reducir las pérdidas de agua. [77]

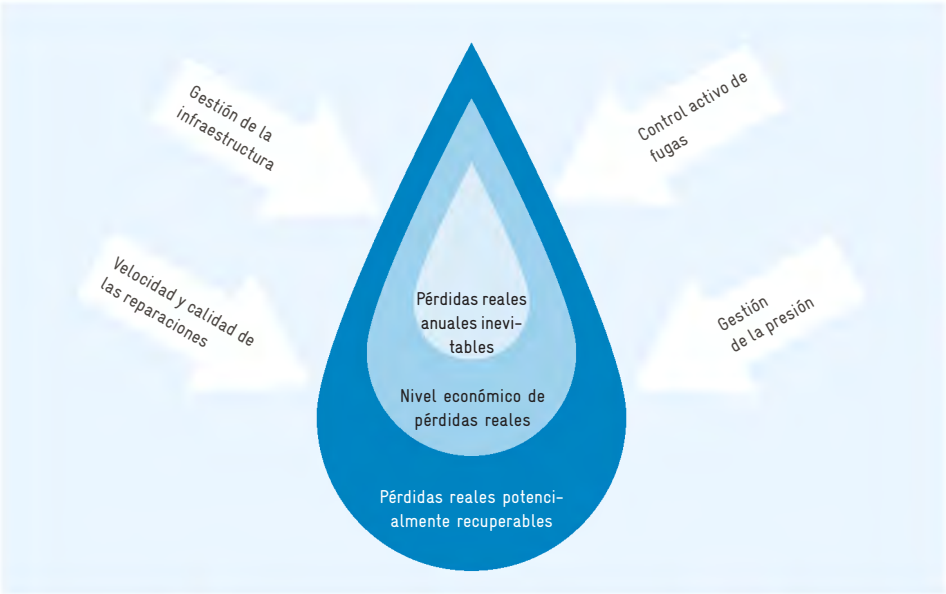
En el *Capítulo 6* se presentará en detalle los cuatro métodos principales para reducir las pérdidas reales de agua. Una vez que se identifica los métodos más económicos, la empresa puede comenzar a implementarlos. Estas medidas también pueden ser encargadas parcial o totalmente a firmas especializadas si la empresa de agua carece de personal, equipamiento técnico o pericia para implementarlas. [77]

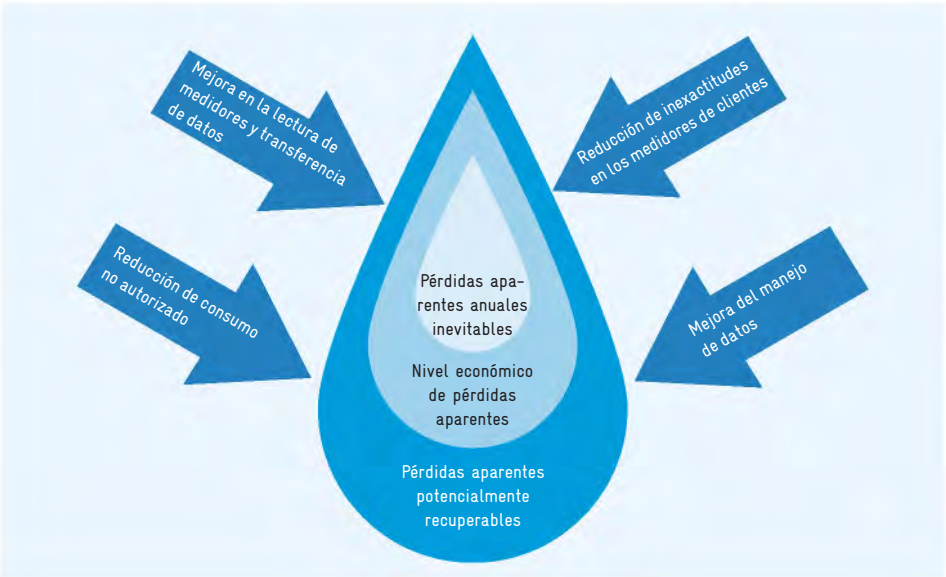
4.5.3 Evaluación de los resultados

Una reducción sostenible de las pérdidas de agua no se logrará por medio de un conjunto único de medidas: los tubos se deterioran, aparecen nuevas fugas, el desgaste reduce la exactitud de los medidores; estos factores hacen que el manejo de las pérdidas de agua sea un desafío continuo y que cambia permanentemente para las empresas de agua. Por lo tanto, evaluar los resultados es esencial para determinar el programa de control de las pérdidas de agua e influencia el planeamiento de las medidas posteriores. Por ejemplo, determinar la proporción costo-beneficio de un sistema instalado de gestión de la presión puede servir para mejorar la determinación de los costos de reducción de las pérdidas de agua.

Se recomienda analizar los esfuerzos y resultados de un programa de control de pérdidas de agua al menos una vez al año. [77] Los resultados logrados en una zona piloto se pueden extrapolar para diseñar medidas apropiadas para toda la red.

Figura 4.5 Herramientas de intervención para programas de reducción de pérdidas reales y aparentes, según [77]





4.6 Resumen y pasos siguientes

Este capítulo proporciona métodos para evaluar y cuantificar la cantidad de agua perdida en una red de distribución y también muestra cómo implementar un programa de control de pérdidas de agua. Los contenidos del *Capítulo 4* de este manual técnico permitirán al lector:

- ☑ Conocer las diez razones que motivan la implementación de medidas de reducción de pérdidas de agua.
- ☑ Fijar un balance hídrico para analizar la situación presente de las pérdidas de agua en un sistema de suministro de agua.
- ☑ Emplear mediciones de caudal mínimo nocturno y evaluación desde abajo hacia arriba de las pérdidas reales para hacer una verificación cruzada del balance hídrico.
- ☑ Usar límites de confianza de 95% para verificar la exactitud de los cálculos del balance hídrico.
- ☑ Emplear varios métodos para medir las pérdidas reales en redes de distribución de agua suministradas continuamente e intermitentemente.
- ☑ Calcular y evaluar varios indicadores de desempeño técnicos y financieros.
- ☑ Determinar el nivel económico de fuga, fijar metas de fuga y diseñar un programa de control de pérdidas de agua.

El próximo capítulo proveerá información sobre las estructuras básicas que una empresa de agua debe implementar para lograr un manejo sostenible de las pérdidas de agua.

Foto: © P. Klingel, 2006

Requisitos de los datos básicos para el manejo sostenible de las pérdidas de agua

5

5.1 Objetivos

Al final de este capítulo el lector podrá

- comprender el significado de los sistemas de información para la reducción eficaz de las pérdidas de agua
- comprender la estructura y funcionalidad de los sistemas de información geográfica
- entender la importancia de los siguientes elementos: base cartográfica basada en SIG, registro de redes, modelo de redes hidráulicas, base de datos de fallas y sistemas de información al cliente, como instrumentos para la implementación exitosa de los esfuerzos de reducción de fugas.

5.2 Sistemas de información y manejo de las pérdidas de agua

5.2.1. Información: Un requisito para el manejo eficiente de las pérdidas de agua

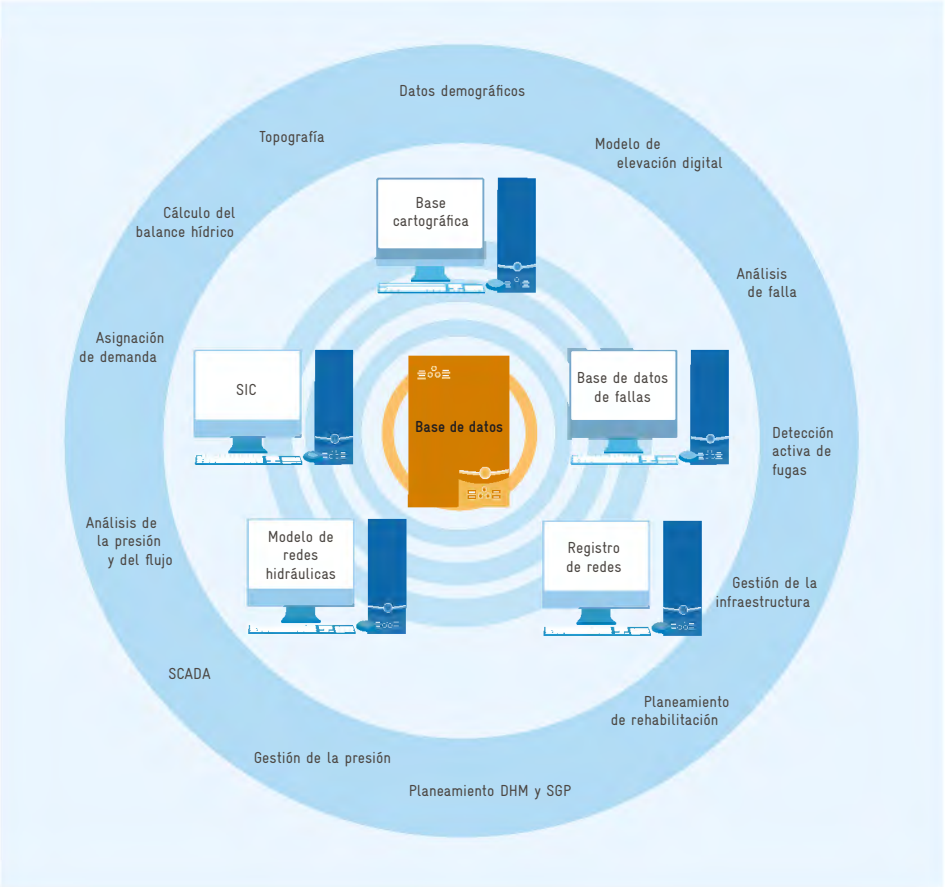
El personal de la empresa de agua a cargo de detectar, ubicar y reparar pérdidas no solamente necesita equipo adecuado de detección de fugas, sino también información precisa que le permita llevar a cabo su trabajo eficientemente. Esta información se deriva de datos que se tienen que recolectar, procesar e interpretar por medio de sistemas de información. [34]

Las empresas modernas de agua recolectan y procesan grandes cantidades de distintos datos diariamente desde departamentos diferentes y con propósitos diferentes. Por ejemplo, algunos departamentos usan herramientas y sistemas de información específicos, como una base cartográfica digital, registros de redes, modelos de redes hidráulicas, bases de datos de fallas o sistemas de información sobre el cliente (SIC). Otros departamentos podrían establecer balances hídricos anuales o recolectar información sobre planeamiento de rehabilitación de tubos, SGP y DHM, incluyendo el registro permanente de flujos ingresantes y presiones así como hacer el historial de retroalimentación de las detecciones de fugas y reparaciones. Todos estos datos ofrecen información valiosa sobre el sistema de suministro de agua. Desafortunadamente, muchos de los datos recolectados permanecen en su departamento original sin ser utilizados adicionalmente.

Sin embargo, la recolección de los datos nunca debe ser una meta en sí misma. En vez de esto, las empresas de agua deberían aprender a apreciar el valor de los datos recolectados. La experiencia muestra que las empresas logran múltiples beneficios agregando creativamente la riqueza de los datos valiosos. [67] Las buenas decisiones y la planificación cuidadosa siempre requieren datos seguros en su base. Las empresas de agua no solamente deberían trata de utilizar los datos recolectados para su aplicación específica de modo que se pueda desarrollar una estrategia eficaz de manejo de pérdidas de agua. También deberían reunir la información disponible, combinarla y fomentar buenas relaciones de trabajo a través de trabajo en equipos interdepartamentales. Este enfoque mejorará los esfuerzos tempranos de detección de fugas y permitirá seleccionar las medidas de contraataque más eficientes. La *Figura 5.1 en la página siguiente* ilustra las numerosas interacciones entre varios sistemas de información y cómo se pueden agrupar, por ejemplo en un sistema único de soporte de decisiones basadas en el SIG (SSD).

Cada empresa de agua debe crear una unidad administrativa independiente para el manejo de ANF de modo que se pueda recolectar y considerar todos los datos requeridos para el manejo eficiente de las pérdidas de agua. Esta unidad tiene el deber de definir su objetivo y determinar qué datos se requieren. Luego puede pedir e intercambiar datos disponibles con otros departamentos. La unidad misma de reducción de pérdidas de agua debe iniciar la recolección de cualquier dato faltante.

Figura 5.1 Interacciones entre varios sistemas de información basados en SIG



5.2.2. Descripción de sistemas de información relevantes

La siguiente sección ofrece una breve visión general de los sistemas de información más importantes para el apoyo a las decisiones y describe su importancia para un manejo exitoso de las pérdidas de agua.

Base cartográfica

La base cartográfica ofrece un conjunto de mapas electrónicos inconsútil para un sistema conocido de coordenadas y cubre toda el área de servicio de la empresa de agua. Forma la base para todos los demás sistemas de información. Se puede establecer desde mapas topo-

gráficos en copia dura o en formato digital así como desde fotografías aéreas rectificadas. Además, se puede complementar con modelos de elevación digital (MEDs) datos catastrales o de administración territorial, datos de población, etc. El *Capítulo 5.4* proporciona información detallada sobre la base cartográfica.

Producto: Un mapa electrónico geo-referenciado del área de servicio.

Uso posterior: La información desde la base cartográfica sirve como base geográfica para todos los demás sistemas de información.

Registro de red

Un registro de red es obligatorio para las empresas de agua de modo que se pueda mantener una vista panorámica de los varios centenares o millares de kilómetros de troncales de transmisión, tubos de distribución y conexiones de servicio, cada uno con sus accesorios respectivos. Se recomienda un registro de red digital basado en el SIG dada la gran cantidad de activos y recordando que todos los activos tienen una referencia espacial. Las condiciones reales del sistema de suministro de agua deberían reproducirse tan realistamente como sea posible dependiendo del nivel deseado de detalle. El *Capítulo 5.5* contiene información detallada sobre cómo establecer un registro de red.

Producto: Información espacial sobre secciones de tubo, conexiones de servicio, válvulas, accesorios y otras instalaciones del SDA.

Uso posterior: La información del registro de red puede proveer los insumos necesarios para el análisis de caudal nocturno y los cálculos de balance hídrico, modelos de red hidráulica, base de datos de fallas, asignación de demanda y el diseño de DHMs y SGPs.

Modelos de redes hidráulicas

Los modelos de redes hidráulicas representan una parte crucial del diseño y operación de los sistemas de suministro de agua. Los modelos de redes se pueden utilizar para simular la respuesta de un sistema existente bajo un amplio rango de condiciones sin interrumpir el servicio a los clientes. De esta manera las simulaciones son útiles para anticipar problemas en redes existentes o planificadas y son necesarias para diseñar apropiadamente las intervenciones (por ejemplo instalación de un esquema de gestión de la presión). El costo de simular varias opciones diferentes es muy bajo en comparación con el costo del proyecto de construcción real. [88] El *Capítulo 5.6* contiene información detallada sobre el modelo de red hidráulica.

Producto: Información sobre presiones y flujos en todo el sistema, determinación de puntos débiles y cuellos de botella, asignación y fluctuaciones en demanda.

Uso posterior: La información del modelo hidráulico puede servir como insumo para el planeamiento y el diseño de DHMs y de SGPs así como para el trabajo de planeamiento de la rehabilitación.

Base de datos de fallas

Una base de datos de fallas contiene información sobre todas las rupturas y daños que han ocurrido en una red de distribución de agua. Una base de datos que se actualiza y mantiene consistentemente provee información valiosa sobre el comportamiento de envejecimiento de los distintos materiales de los tubos y es útil para la identificación y la rehabilitación sistemática de secciones de tubos vulnerables. Además, se puede identificar los lotes con fallas o la calidad inferior de válvulas y accesorios y se pueden reemplazar como medida preventiva. La base de datos de fallas debería recibir datos constantes reunidos durante la detección de fugas y reparaciones. El *Capítulo 5.7* provee información detallada sobre la base de datos de fallas.

Producto: Información sobre las características del material, el comportamiento de envejecimiento y corrosión, la ubicación de tubos dañados y que fugan, así como relaciones entre la presión del sistema y la frecuencia de nuevos estallidos y fugas.

Uso posterior: La información de la base de datos de fallas puede servir como insumo para el planeamiento de las rehabilitaciones, la detección de fugas, el análisis del caudal mínimo nocturno y el establecimiento del modelo de red hidráulica.

Sistemas de información sobre el cliente (SIC)

El sistema de información sobre el cliente y los registros de facturación forman los cimientos esenciales para calcular el balance hídrico si se mide el consumo de agua. Los datos de facturación mensuales o trimestrales para todos los clientes domésticos y no domésticos sirven como el producto del sistema y se pueden convertir en una tasa de flujo diario promedio. La conexión entre el registro de redes basado en SIG y los datos de direcciones de clientes permite que se asigne con precisión el consumo de agua a zonas de abastecimiento discretas. La comparación del ingreso del agua y del consumo del agua en cada zona o toda la red indica zonas con grandes pérdidas y se puede utilizar así para potenciar los esfuerzos de detección de fugas. El *Capítulo 5.8* presenta información detallada en torno al sistema de información sobre el cliente.

Producto: Información sobre el consumo de agua, la variación del consumo estacional, los clientes con necesidades especiales y la asignación de consumo.

Uso posterior: La información de la base de clientes puede servir como insumo para el cálculo del balance hídrico, el diseño de DHMs y SGPs, la asignación de la demanda, la detección de fugas y el establecimiento del modelo de red hidráulica.

5.2.3 Integración en un SIG abarcador

Los cinco sistemas de información descritos anteriormente forman el núcleo del sistema de soporte a las decisiones (SSD) para una reducción eficiente de las pérdidas de agua. Debe encontrarse datos relevantes de estos subsistemas en un SIG abarcador. Este SIG debe poder intercambiar datos con otros subsistemas que se describen en detalle en capítulos previos y en el *Capítulo 6* de esta guía:

- cálculo de balance hídrico *(ver Capítulo 4.3.2)*
- medición de clientes *(ver Capítulo 4.3.5)*
- distritos hidrométricos *(ver Capítulo 6.3)*
- gestión de la presión *(ver Capítulo 6.4)*
- gestión de la infraestructura *(ver Capítulo 6.7)*
- detección activa de fugas *(ver Capítulo 6.5)*.

El *Capítulo 5.3* ayudará a determinar los pasos importantes en el desarrollo e implementación de un SIG adecuado para una empresa de agua, con un enfoque especial en la reducción de pérdidas de agua. El progreso tecnológico rápido en el desarrollo del SIG y la amplia gama de soluciones comerciales del SIG significa que esta sección sólo puede proveer elementos generales.

5.2.4 Definición de objetivos

La recolección y procesamiento de datos para el sistema de soporte de decisiones basado en el SIG tienen que estar orientados a objetivos. La unidad de reducción de pérdidas de agua tiene que identificar estos objetivos en términos claros y precisos. Las fallas para definir los objetivos podrían resultar en una recolección de datos ya sea excesiva o insuficiente. La descripción de objetivos será útil para responder algunas preguntas difíciles: ¿Qué datos se necesitarán? ¿Qué otros departamentos tienen que participar? ¿Qué datos se tienen que recolectar en el campo? ¿Qué datos externos tienen que comprarse? ¿Cuáles son los requisitos de software y hardware? ¿Cómo se puede integrar las estructuras de software y hardware existentes?

La *Tabla 5.1* describe los objetivos principales que un sistema de soporte de decisiones basado en el SIG debe alcanzar para mejorar el manejo de pérdidas de agua de una empresa:

5

Tabla 5.1 Objetivos de un sistema de soporte de decisiones basado en el SIG para el manejo de pérdidas de agua

Objetivos	Ejemplo
Control	Monitoreo y balanceo mejorados de la producción, consumo, y pérdidas de agua.
Análisis	El sistema SIG permite combinar, investigar, analizar y visualizar grandes cantidades de datos desde fuentes diferentes.
Eficiencia	Una mejor distribución de datos entre departamentos e interesados resulta en un acceso más rápido a la información y una redundancia reducida de datos.
Planeamiento	Base de datos detallada para la gestión de la infraestructura y el planeamiento de la rehabilitación, gestión de la presión y otras medidas de construcción.
Operación	Optimización de la operación de sistemas, gestión de presión y medidas activas para la detección de fugas.

5.3 Elementos básicos del SIG

5.3.1 Definición de un sistema de información geográfico

Un sistema de información geográfica (SIG) es una herramienta basada en computadoras que maneja todo tipo de información referida a la ubicación geográfica. Utilizando mapas e informes, su propósito es ocuparse de búsquedas y realizar análisis estadístico así como visualización. El SIG usualmente consiste de cuatro componentes: hardware, software, datos espaciales y funciones de procesamiento de datos. El SIG proporciona un medio para compartir datos y un método de visualizar problemas relacionados a la geografía y sus soluciones. El propósito de un SIG es combinar diversos datos de diferentes fuentes para crear nueva información y proporcionar un marco espacial para el soporte de las decisiones. Se puede usar un SIG para:

- Búsqueda lógica (por ejemplo determinando todas las conexiones de servicio que están completamente dentro de una zona de suministro o DHM).
- Análisis de proximidad (por ejemplo identificando objetos sensibles a la inundación dentro de una cierta distancia de secciones susceptibles de tubos).
- Análisis de redes (por ejemplo identificando todos los hogares impactados por una rotura de tuberías).
- Categorización (por ejemplo combinación y visualización del material y de la edad de los tubos con frecuencia de fallas).
- Visualización (por ejemplo despliegue de todos los contadores de agua de los clientes que necesitan reemplazo de rutina) .

El SIG no debe confundirse con los sistemas de diseño asistido por ordenador (DAO, o CAD por sus siglas en inglés). El DAO se utiliza principalmente para el planeamiento y el diseño de objetos técnicos y los planos del DAO pueden parecer similares a los mapas del SIG a primera vista. A diferencia de los planos del DAO, las características del SIG no son solamente puntos y líneas sino que tienen referencia espacial y atributos asociados a ellos. Además, se puede enlazar información adicional a los objetos espaciales en base a su referencia espacial. [88]

5.3.2 Nivel de implementación

Se recomienda un SIG que integre los cinco subsistemas – la base cartográfica, el modelo de red hidráulica, el registro de red, la base de datos de fallas y la base de datos de clientes – para

un desempeño óptimo. Los cinco subsistemas también se pueden administrar de manera independiente según las necesidades del usuario. El SIG se puede implementar generalmente en uno de cuatro niveles:

- **Nivel de proyecto:** Soporte de un objetivo único del proyecto.
- **Nivel de departamento:** Soporte de las necesidades de un departamento.
- **Nivel de empresa:** Distribución interdepartamental de datos que satisface las necesidades de dos o más departamentos.
- **Nivel inter-agencias:** Distribución de aplicaciones y datos con usuarios externos. [88]

Normalmente las soluciones descentralizadas del SIG a nivel de proyecto o departamento son menos caras que las soluciones centralizadas de manejo de datos que requieren grandes inversiones en hardware y software. No obstante, el manejo descentralizado de datos a menudo lleva a una redundancia de trabajo y a islas de datos: La misma información se produce y se almacena en distintos departamentos dentro de una empresa sin relación entre ellos. [88]

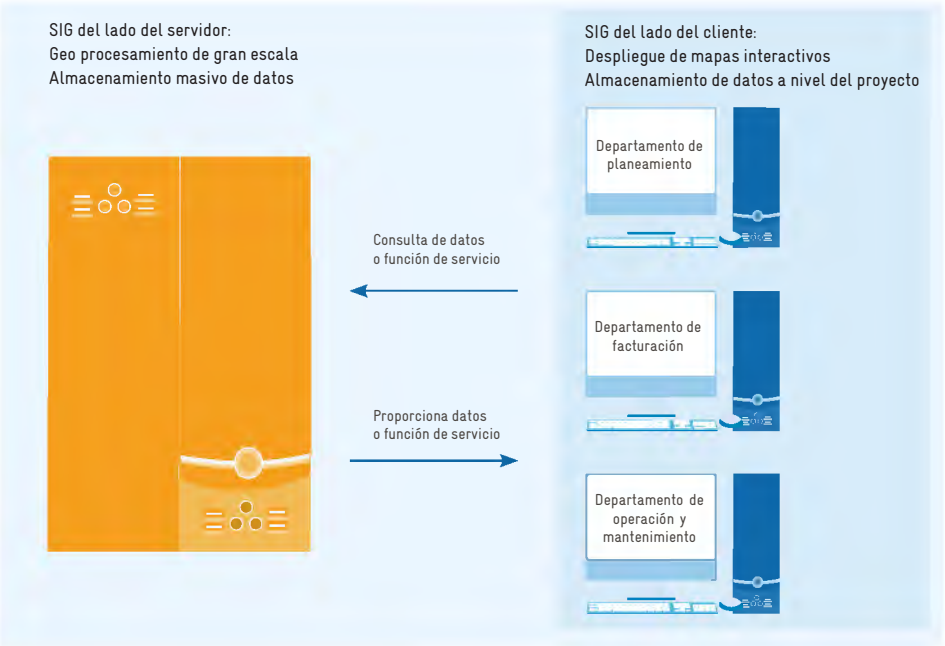
Un SIG a nivel de compañía será más apropiado para la mayoría de empresas de agua dado ese factor y los muy distintos aspectos involucrados en el manejo de pérdidas de agua. Una arquitectura cliente-servidor es la configuración preferida para un SIG de nivel de empresa tal como se ilustra en la *Figura 5.2 en la página siguiente*.

5.3.3 Necesidades de los usuarios del SIG

El éxito de implementar un SIG en una empresa depende mucho de las personas que lo construyan, mantengan y utilicen. Las habilidades y conocimiento técnico del usuario son algunos de los factores que debe considerarse, mientras que los factores no técnicos son a menudo más importantes. Es imperativo que los usuarios finales en todos los departamentos involucrados sientan que sus necesidades y deseos se han considerado durante la implementación del proyecto para cosechar todos los beneficios de un SIG a nivel de empresa. El SIG no será aceptado salvo que los usuarios finales calificados hayan estado activamente involucrados en la creación del sistema. [76] El departamento de SIG de una empresa de agua debe tratar de crear consciencia de los beneficios del sistema de SIG y debe transferir constantemente el know-how y la experiencia a otros departamentos. [72]

Es igualmente importante informar a los departamentos involucrados sobre las demandas y capacidades del sistema de modo que se evite expectativas irreales. La introducción de un SIG resultará normalmente en algunos cambios en el proceso de trabajo que son necesarios para hacer la interfaz de diferentes sistemas existentes y nuevos. Por lo tanto, los usuarios

Figura 5.2 Arquitectura cliente-servidor para un SIG a nivel de empresa, según [93]



finales deben mostrar un cierto grado de flexibilidad para ajustar los procesos de trabajo existentes. Se debe establecer líneas claras de responsabilidad y rendición de cuentas para todo el personal concernido en la empresa de agua. Se debe nombrar a un administrador del sistema para coordinar los trabajos con el proveedor del sistema por un lado y con los usuarios finales de la empresa de agua por otro lado. [76]

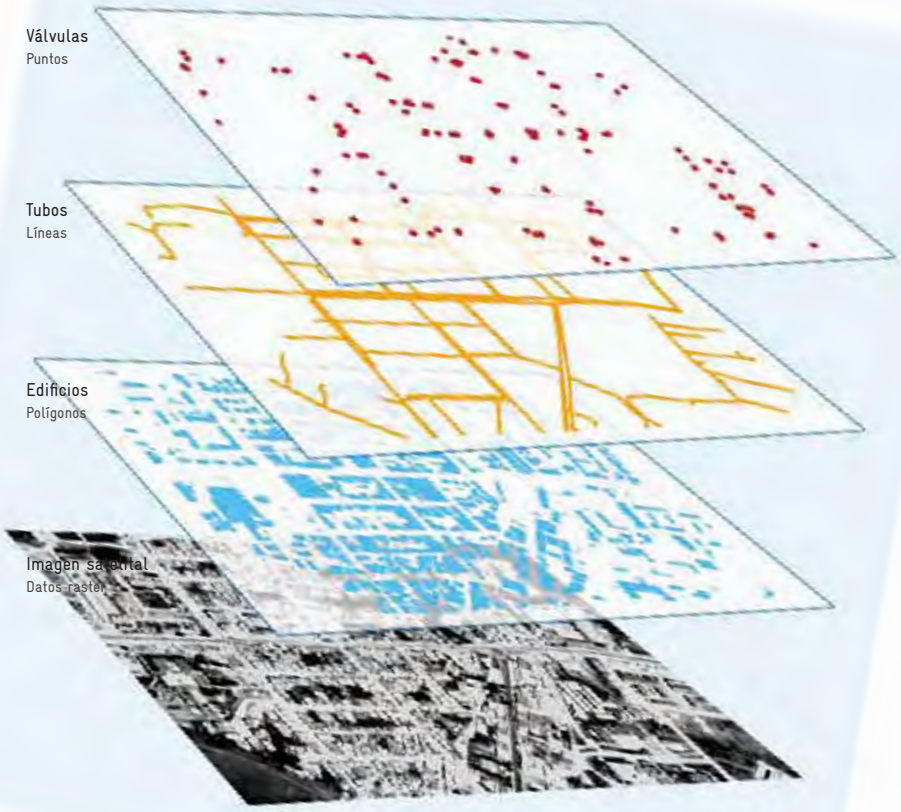
5.3.4 Tipos de datos

Se puede dividir los datos geográficos en cuatro categorías principales dependiendo de sus características específicas: datos de vectores, datos de raster, redes irregulares trianguladas e información de objetos tal como se especifica a continuación:

→ Se usan los datos de vectores para representar objetos espaciales con formas bien definidas como un conjunto ordenado de coordenadas (referencia espacial). Se puede clasificar los datos de vectores en puntos, líneas y polígonos. Se puede asignar un conjunto de atributos descriptivos (no espaciales) a cada objeto espacial.

- Los datos de raster se utilizan para representar datos de área. Para este propósito los datos de área se dividen en una plantilla o raster de celdas cuadradas de tamaño uniforme. Se puede asignar a cada celda un conjunto de atributos descriptivos.
- Las redes irregulares trianguladas (TIN, por sus siglas en inglés) se usan para modelar superficies tridimensionales. Consisten en un conjunto de nudos con información de elevación que se interconectan con una red de bordes. Estos bordes construyen un conjunto de triángulos que forman la superficie de la TIN. Se puede interpolar la elevación de cualquier punto dentro de la TIN.

Figura 5.3 Representación de distintos tipos de datos en un SIG



→ La información de objeto es información descriptiva que no tiene referencia especial por sí misma. La información de objeto se almacena usualmente en bases de datos relacionales y se puede enlazar a datos de vectores o raster. [93]

La *Figura 5.3 en la página anterior* ilustra la aplicación de distintos tipos de datos geográficos: los tubos están representados por líneas, los edificios por polígonos, las válvulas por puntos, las descripciones como la información de objeto y la imagen satelital de fondo se almacenan como datos de raster.

5.3.5 Estructura de datos del SIG

Todos los datos contenidos en un SIG se pueden relacionar a una ubicación geográfica. Por ejemplo, los contadores de agua de los clientes, las tuberías de distribución o los límites de una zona discreta de abastecimiento tienen todos en común que se pueden ubicar en una posición geográfica exacta. Existen numerosas soluciones comerciales que utilizan distintos formatos de datos para estructurar y almacenar datos. Las bases de datos relacionales son las estructuras de datos más convenientes para almacenar todo tipo de datos espaciales, topológicos y atributos.

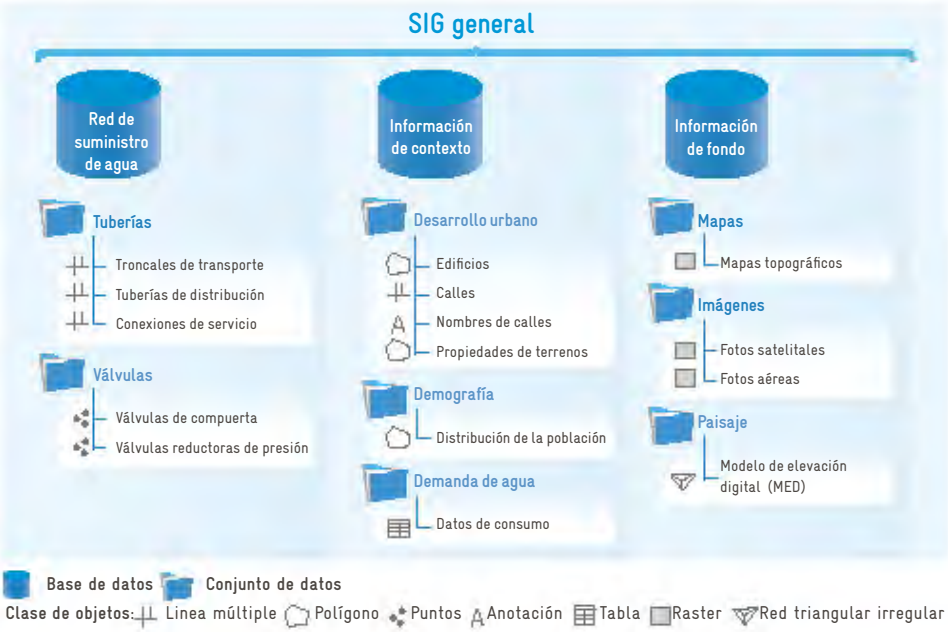
Las bases de datos relacionales se pueden utilizar para organizar los datos en categorías amplias de datos relacionados a nivel de empresa; distintos departamentos pueden tener la responsabilidad de distintos conjuntos de datos. En este caso, las bases de datos también pueden hacer eco a la estructura organizativa de la empresa de agua. Los datos geográficos se pueden almacenar dentro de una base de datos relacional como clases de objetos únicos o se pueden combinar para crear conjuntos de datos relacionados. La *Figura 5.4* ilustra un ejemplo de una posible estructura de SIG.

La creación de una colección de varios tipos de conjuntos de datos es usualmente el primer paso para organizar un SIG. El conjunto original de base de datos se puede mejorar continuamente añadiendo conjuntos de datos y capacidades avanzadas para satisfacer las necesidades de los usuarios.

5.3.6 Recolección, conversión e integración de datos

Los datos ingresantes para organizar el SIG normalmente se tienen que recolectar de varias fuentes diferentes de información: diferentes departamentos de las empresas de agua, consejos administrativos y agencias, consultores privados, oficinas de ingeniería y otros. Las formas comunes de los datos que ingresan a los sistemas de suministro de agua incluyen mapas de redes en papel, planos de construcciones reales, datos de mediciones de campo, datos digitales existentes de sistemas DAO y SIG, pero también informes, hojas de cálculo y fotografías. Se tiene que emplear distintos métodos de conversión de datos dependiendo

Figura 5.4 Estructura de un SIG basado en bases de datos, conjuntos de datos y clases de objetos únicos, según [93]



de los datos ingresantes disponibles: los planos de papel y los mapas se pueden digitalizar (digitalización de tableta) o escanear y vectorizar en pantalla (digitalización mano a mano). Se dispone de software especializado que puede convertir los datos digitales existentes, por ejemplo planos DAO, al formato de datos requerido. Se tiene que ingresar frecuentemente informes en copias duras y tablas para digitalizarlos. [72]

Se puede transferir otros tipos de datos como los registro de consumo del SIC o presiones de sistema y flujos del sistema SCADA en un sistema SIG existente de manera periódica. Por ejemplo, la visualización de la información real sobre producción y consumo de agua en el SIG puede ayudar a reconocer tendencias en la situación de pérdida de agua en áreas discretas.

El proceso de recolección, conversión e integración de datos en el SIG es laborioso y caro. Shamsi [75] informa que los costos de recolección e ingreso de datos pueden llegar hasta el 80% de los costos totales del proyecto en algunos proyectos del SIG. Por lo tanto, es esencial un entendimiento exhaustivo de los datos del SIG antes de comenzar la recolección de datos y el proceso de conversión.

Luego de que se organiza el SIG, las empresas de agua deben considerar el establecimiento de la certeza en el terreno, por ejemplo verificando la calidad de información del SIG en varias visitas de campo. Es luego importante que se mantenga la base de datos al día. Todos los cambios al sistema se deben registrar e integrar en el SIG existente.

5.4 Base cartográfica

5.4.1 Datos de ingreso para la base cartográfica

Cada SIG de la empresa de agua debe utilizar algún tipo de base cartográfica como información de fondo y una referencia espacial para sus sistemas de información y para otros propósitos de planeamiento y gestión. Estos pueden incluir el registro de redes, modelo hidráulico y/o base de datos de fallas. El establecimiento de una base cartográfica consiste en adquirir, digitalizar y geo-referenciar mapas topográficos y fotografía aérea o satelital que forman la columna vertebral para todos los demás datos. Se tiene que medir puntos distintivos en el campo y servir como puntos de referencia para los mapas y fotografías de geo-referenciación. Se puede utilizar otros datos útiles para complementar la base cartográfica:

- datos de mapeo catastral (lotes de terreno)
- información de administración territorial
- datos de infraestructura y del sistema de transporte
- límites administrativos
- distribución de la población
- ubicación de entidades administrativas, comerciales e industriales
- modelos de elevación digital
- información sobre suelo, vegetación, hidrografía y otros datos ambientales.

El desarrollo de la base cartográfica requiere un planeamiento cuidadoso y enormes cantidades de datos. Por lo tanto es un proceso más bien largo y caro. Se puede reducir los costos significativamente si la base cartográfica se establece en cooperación con otros usuarios potenciales, por ejemplo la autoridad de transporte municipal, y los proveedores de energía, gas o telecomunicaciones.

5.4.2 Contenidos de la base cartográfica

Los requisitos mínimos para los contenidos de la base cartográfica son los siguientes:

- representación de todos los edificios adyacentes a alineamientos de vías y tubos
- todas las demás estructuras significativas (represas, puentes, etc.)
- vías, sardineles, veredas, rieles
- lotes de terrenos.

Otros rubros adicionales podrían incluir la posición de los ríos, lagos, canales, árboles y otras estructuras.

5.4.3 Consideraciones sobre la calidad de los datos

Es muy importante establecer la base cartográfica con un alto grado de exactitud porque la negligencia en esta fase inicial puede causar problemas numerosos y muy costosos posteriormente. Por ejemplo, la exactitud del mapa será muy baja y pueden surgir desviaciones de varios metros entre las posiciones en el mundo real y las posiciones indicadas en el mapa en el caso en que algunos de los datos no hayan sido geo-referenciados con cuidado a la proyección elegida. Las instalaciones de los sistemas de suministro de agua captadas en una etapa posterior utilizando un sistema de posicionamiento global (GPS) diferencial de alta precisión se desplegarán en la ubicación incorrecta. Finalmente, todas las instalaciones se tendrán que cambiar en el SIG para corresponder con la referencia espacial (incorrecta), un emprendimiento que requiere mucho trabajo y consume mucho tiempo. [88]

Por lo tanto se debe considerar los siguientes asuntos para producir una base cartográfica muy confiable:

- tipo de proyección de mapas y sistema de coordenadas
- exactitud (precisión por debajo de un metro o ± ... metros)
- escala de mapas y fotografías aéreas
- edad de los datos utilizados.

Por la misma razón se tiene que considerar la calidad de las fuentes: Datos desde un mapa topográfico a escala de 1:25.000 especificados como el 90% de sus características dentro de los 15 m de su ubicación correcta no permitirán un trabajo de planeamiento detallado. No se puede utilizar información de elevación de un MED con un error de elevación promedio de ± 5 m ni para la calibración del modelo hidráulico ni para diseñar un esquema correcto de gestión de la presión.

Una vez que se convierten a un entorno SIG, los datos de los mapas ya no se escalan y se puede producir nuevos mapas de cualquier escala resultante deseada. Sin embargo, los resultados producidos nunca pueden ser más exactos que la fuente de datos originales a partir de la cual se adquirió los datos. [75] Por lo tanto, el usuario del SIG siempre debería ser consciente de la escala y calidad de sus datos fuente. Debe evitarse las magnificaciones de mapas que exceden la proporción de 1 : 2. [17]

Se recomiendan las siguientes escalas de mapas estandarizados como insumo para la base cartográfica:

Tabla 5.2 Escala recomendada de mapa para establecer la base cartográfica

Objeto	Escala
Mapas topográficos para sistemas de suministro de gran escala en toda la región	1:10.000 a 1:50.000
Mapas topográficos como información de fondo para áreas urbanas	1:2.000 a 1:10.000
Fotografías aéreas, fotografías satelitales	1:2.000 a 1:10.000
Mapas catastrales para la planificación detallada en áreas urbanas	1:250 a 1:1.000

La documentación apropiada del proceso de establecimiento de la base cartográfica es esencial: la base cartográfica requiere ser rastreable hasta una fuente conocida de tal modo que se conozca su exactitud y precisión. La gran exactitud llevará a mayores costos de desarrollo. La empresa de agua por lo tanto debería recordar los objetivos planeados del SIG cuando se establece la base cartográfica. [9]

5.5 Registro de red

5.5.1 Objetivos

Uno de los desafíos futuros que enfrentan las empresas de agua en todo el mundo serán el manejo sostenible y la conservación del valor de sus activos de capital. La red de tubos representa usualmente del 60 al 80% de los activos de capital de una empresa de agua. [42] Un registro de red digital basado en SIG es un sistema poderoso que permite a las empresas de agua:

- tener acceso instantáneo a información necesaria
- reducir los procesos basados en papel que toman mucho tiempo
- mejorar los esfuerzos de mantenimiento y operación
- facilitar el manejo de fugas
- identificar las deficiencias del sistema
- acelerar las reparaciones de emergencia
- facilitar la rehabilitación de largo plazo y la planificación extensiva.

Se tiene que considerar que establecer un registro completo de red es un proceso multi-etapas que toma frecuentemente de 3 a 5 años para redes grandes de distribución de agua. [5] Numerosas firmas de ingeniería ofrecen servicios que cubren todo el ciclo de implementación, incluyendo el establecimiento e instalación de hardware y software, conversión de datos, escaneo de documentos, actualización y mapeo.

Luego de una instalación inicial, el sistema se tiene que actualizar continuamente: se tiene que medir y asignar nuevas extensiones de tubos o reubicaciones, medidas de rehabilitación y reparaciones de tuberías en la posición correcta. Se debe enlazar la información adicional de objeto, por ejemplo la fecha de construcción, el material, la dimensión, la protección contra la corrosión, el tipo y la razón del daño y los nombres del personal y subcontratistas involucrados. [60]

5.5.2. Datos que ingresan al registro de la red

Las empresas mantienen un conjunto central de registros que detallan los activos físicos de sus redes, los cuales pueden servir como insumo para el registro de la red. Éstos normalmente consisten en:

(a) Mapas de sistemas de varias escalas y detalle

Los mapas de sistemas electrónicos o en copia dura se pueden fusionar en una base de datos de mapas electrónicos perfectos. Constituyen la base para el registro de la red y el modelo hidráulico.

(b) Documentos detallados

Los registros en papel que muestran la ubicación tal como se construyó, el tamaño y los parámetros seleccionados de los tubos, válvulas, bombas, conexiones de servicio, medidores, etc. se pueden escanear y enlazar a su activo respectivo en la base de datos del mapa.

(c) Informes sobre fallas, inspecciones, reparaciones

Los informes, la documentación en fotos o incluso los videos de CCTV proveen información adicional sobre activos y se pueden enlazar a objetos espaciales.

(d) Mediciones continuas

Las mediciones SCADA, los patrones de consumo, los datos sobre calidad de agua.

Como siempre, es importante recordar la calidad de los datos ingresantes: la ubicación de tubos se puede medir en el campo (muy exacta: durante la construcción y en la zanja abierta; menos exacta: en la superficie, desde un extremo al otro de una calle) o se pueden construir (exacta: de planos de diseños DAO; menos exacta: de bosquejos dibujados a mano) o incluso se pueden adivinar (por ejemplo en base a afirmaciones orales). El origen de los datos y el nivel de exactitud se deben documentar en metadatos. [24]

Para mejorar la legibilidad se debe ajustar la exactitud de todos los elementos de red a la escala de los mapas producto deseados. Se recomienda las siguientes escalas de mapas producto estandarizadas dependiendo del grado de desarrollo y de la cantidad de tubos. [17]

Tabla 5.3 Escala de mapas producto recomendada para el registro de redes

Grado de desarrollo	Escala
Áreas urbanizadas densamente desarrolladas con una gran cantidad de tubos	1:250
Áreas medianamente urbanizadas con una cantidad intermedia de tubos	1:500
Áreas rurales desarrolladas de manera dispersa	1:1.000

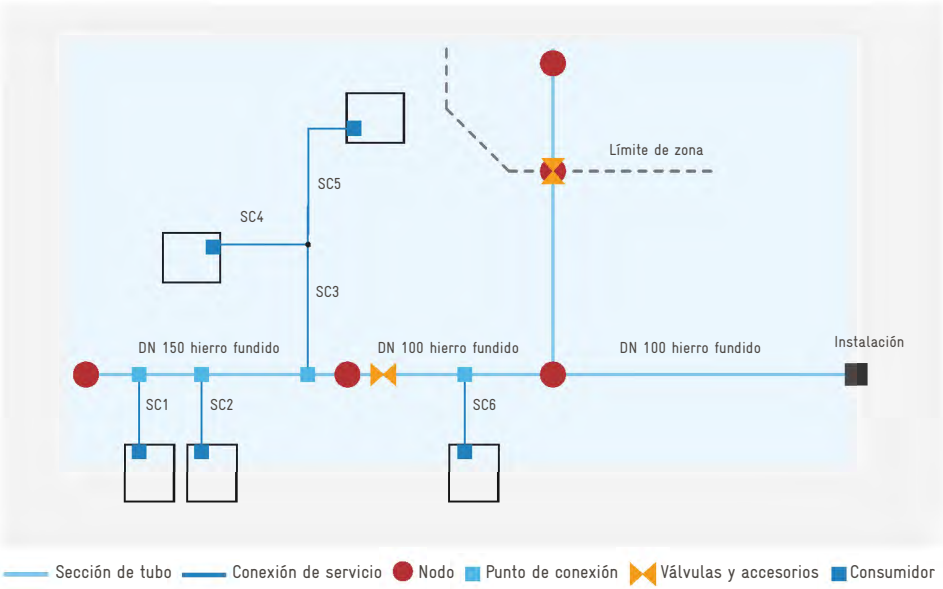
5.5.3 Estructura de datos

En 1996, el DVGW desarrolló un catálogo de requisitos llamado GAWANIS. [15] El objetivo de GAWANIS es principalmente apoyar a las empresas de agua en el desarrollo de un

registro digital de redes que satisfaga sus necesidades específicas. Recomienda una estructura de datos estandarizada que se puede resumir de la manera siguiente:

- Toda la red de distribución se tiene que dividir en secciones discretas de tubos con atributos idénticos (material, diámetro, etc.). Se tiene que establecer una nueva sección de tubo si cambia un atributo a lo largo de un alineamiento de tubos. De la misma manera, una nueva sección de tubos se tiene que crear en cada ramificación. Se tiene que ubicar un nodo en el punto inicial y el punto final de cada sección de tubos. Las secciones de tubos se pueden dividir automáticamente en límites de zona o límites administrativos.
- Las conexiones de servicio forman una clase objetos separada. Se puede hacer una o más conexiones de servicio a una sección de tubo. Se tiene que fijar un punto de conexión donde la conexión del servicio se conecta a la sección de tubo. Una conexión de servicio no se ve como una rama y por lo tanto no divide una sección de tubos en dos. Las conexiones de servicio se pueden ramificar y se puede suministrar a varios consumidores. Se debe definir una nueva conexión de servicio en los ramales.
- La ubicación de válvulas y accesorios no requiere que se divida un tubo en dos secciones de tubo. Aun así, se puede dividir un tubo en dos secciones de tubo en una válvula si fuera necesario (por ejemplo en válvulas de aislamiento).

Figura 5.5 Estructura estandarizada de datos para redes de distribución, según [15]



→ Las instalaciones comprenden todas las plantas que producen, transmiten, almacenan y tratan el agua dentro del sistema, por ejemplo los pozos, bombas, tanques y plantas de tratamiento. Cada red tiene que comenzar o terminar en una instalación.

La *Figura 5.5 en las página anterior* ilustra la estructura estandarizada de datos.

Los atributos típicos de los elementos de la red especificados anteriormente se describen en la *Tabla 5.4*.

Tabla 5.4 Elementos de la red de tubos y sus atributos

Elemento	Atributos obligatorios	Atributos adicionales
Sección de tubo	ID, longitud, diámetro nominal, material	Diámetro interno/externo, grosor de la pared, fecha de construcción, fabricante, presión nominal, rugosidad, zona de abastecimiento, nombre de la calle, etc.
Conexión de servicio	ID, longitud, diámetro, material	Fecha de la construcción, fabricante, etc.
Nodo	ID, coordenadas x, y , elevación de la superficie	Cubierta del tubo, etc.
Instalación	ID, tipo, capacidad	Situación, fecha de construcción, fabricante, etc.
Punto de conexión	ID, tipo	Fecha de construcción, fabricante, etc.
Consumidor	ID, dirección, ID del contador	Fecha de instalación, situación, etc.
Válvulas	ID, tipo, diámetro nominal	Dimensiones, fecha de la instalación, fabricante, función, situación, etc.
Accesorios	ID, tipo, diámetro nominal	Dimensiones, fecha de instalación, fabricante, presión nominal, etc.

Se puede extender estos atributos para adaptarse a las necesidades de cada empresa de agua. Se puede añadir un texto descriptivo a cada elemento para proveer información adicional.

Material suplementario 5.1

Establecimiento de registro de red

5.5.4. Registro de red y fuga

Un registro de red basado en SIG permite a las empresas de agua producir automáticamente informes que agrupan sus fugas en base a área de servicio, material de los tubos, causa del daño, tamaño de la fuga, tipo de la fuga y situación de reparación de la fuga. Esta información ayuda a programar la reparación de las fugas y los proyectos de reemplazo de tuberías de manera más eficaz. La visualización gráfica de los resultados ayuda a revelar los puntos álgidos de fuga, a priorizar las reparaciones, a identificar los materiales problemáticos y a desplegar eficazmente las cuadrillas de reparación de fugas. [67]

5.5.5 Lanzamiento de registro de redes y modelo hidráulico

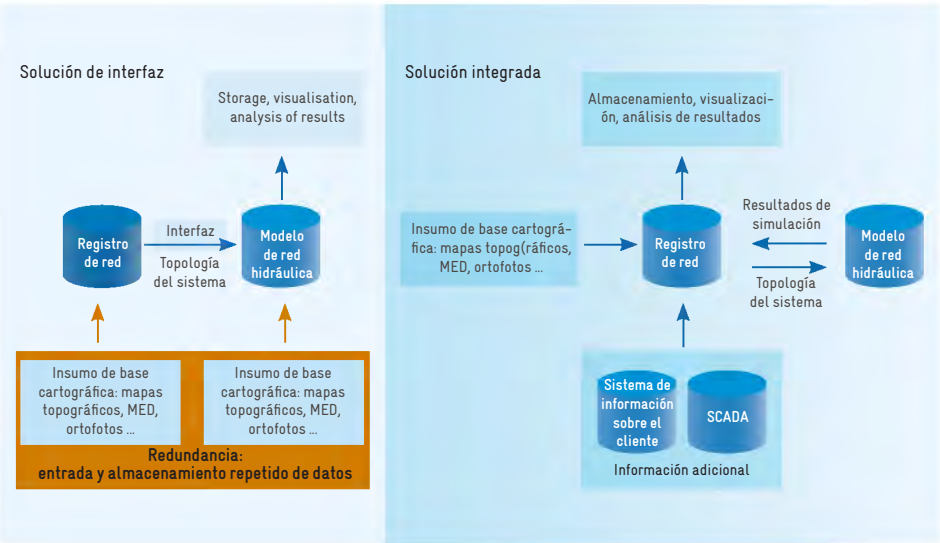
Los cálculos hidráulicos de los sistemas de suministro de agua son indispensables para analizar la capacidad del sistema. Hasta los años 90 las restricciones de software y hardware significaron que la mayoría de análisis de sistemas de suministro de agua eran simplificados o incompletos. Desde entonces, el poder de las computadoras ha mejorado enormemente, permitiendo modelar redes muy grandes y detalladas de gran complejidad. [5] En el caso específico de la reducción de pérdidas de agua, los modelos de redes hidráulicas pueden ser herramientas muy útiles para diseñar DHMs y SGPs. El enlazar un modelo hidráulico a un registro de redes basado en SIG facilitará y acelerará tremendamente el proceso de construcción de modelos. Se toma normalmente dos enfoques diferentes:

(a) Conexión vía interfaz

En este caso, el ingreso y la edición de datos se realizan solamente en el registro de red. Se tiene que crear una interfaz que exporta los datos en la forma precisa requerida por el modelo hidráulico, usualmente un archivo ASCII o de base de datos. Se utiliza modelación de software para simular, visualizar y analizar resultados.

Esta solución requiere normalmente algo de re-trabajo para completar el modelo, porque algunos elementos se manejan de manera diferente en cada sistema por ejemplo bombas o tanques. Se puede requerir almacenamiento redundante de datos, por ejemplo para el mapa de fondo.

Figura 5.6 Vincular el modelo hidráulico al registro de red



(b) Integración del modelo hidráulico

La integración del modelo hidráulico en el registro de red acelera todo el proceso. La topología del modelo hidráulico se actualiza automáticamente cuando hay cualquier cambio en el registro de la red y se reducen las fuentes de posibles errores en el manejo de datos. Se dispone directamente de información adicional (curvas de bombas, demandas en cada conexión de servicio, presiones, flujos y condición de las válvulas a partir del SCADA) del propio elemento del modelo respectivo. De la misma manera, se almacena directamente resultados de simulación visualizados y analizados en su ubicación en el registro de la red.

Esta solución integrada requerirá mayores esfuerzos al principio porque ambos sistemas se tienen armonizar entre sí. En el largo plazo, el sistema integrado es más eficiente porque permite cálculos más frecuentes para proveer a los planificadores de una base segura para la toma de decisiones. [5]

5.6 Modelo de red hidráulica

5.6.1. Definiciones y objetivos

El término modelo de red hidráulica describe el uso de una representación matemática de un sistema real de suministro de agua. Se utilizan los modelos de redes hidráulicas para simular el comportamiento de sistemas existentes o planificados bajo una amplia gama de condiciones sin interrumpir el servicio al cliente. También ofrecen una herramienta valiosa para hacer más eficiente la operación y gestión de las redes de distribución de agua.

Al tomar en cuenta los requisitos específicos de manejo eficiente de las pérdidas de agua, se pueden emplear los modelos de redes hidráulicas para implementar exitosamente las siguientes medidas:

- Verificación de la capacidad del sistema: análisis de presiones y flujos.
- Selección de límite zonal para distritos hidrométricos (DHMs) y sectores de gestión de la presión (SGPs).
- Aplicaciones específicas para el planeamiento de la gestión de la presión: válvulas de dimensionamiento y medidores, revisar las condiciones de flujo contra incendios, detectar los defectos de la presión y la calidad de agua.
- Analizar la vulnerabilidad del sistema, suministrar respuesta de seguridad y emergencia en caso de roturas de tubos.

5.6.2. Fundamentos de la modelación hidráulica

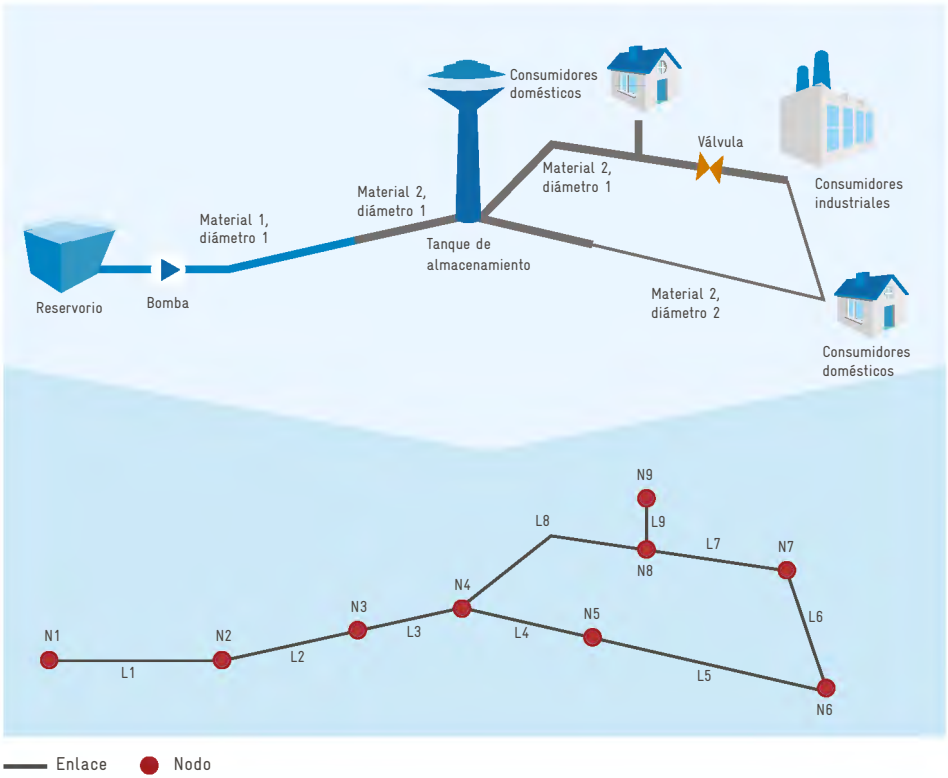
El usuario debe comprender los principios matemáticos e hidráulicos empleados en el software de modelación hidráulica para permitir que se interprete los resultados correctamente. No obstante el proceso fundamental para el establecimiento del modelo y los datos ingresantes necesarios se describirán en detalle solamente dentro de este manual. Para mayor información sobre los principios hidráulicos, sírvanse referirse a *Walski.* [88]

Topología de una red de distribución de agua

Se puede describir una red de distribución de agua como un dígrafo (o gráfico dirigido) que se compone de un conjunto finito de nodos y enlaces. Se tienen que asignar un nodo inicial y un nodo final a cada enlace. Este dígrafo forma la columna vertebral de cada modelo matemático. Cada enlace representa una sección homogénea de un tubo. También se representan las válvulas y bombas por medio de un enlace. Los nodos designan cambios físicos en una

sección de tubo, por ejemplo material que cambia, diámetro que cambia o ramales de tubos. También se utilizan los nodos para modelizar puntos cuando el agua entra y sale del sistema así como para los tanques, consumidores y puntos finales de tubos. Las características físicas y no físicas de todos los componentes del sistema (diámetro del tubo, material, curva de la bomba, niveles de agua mínimos y máximos en los tanques, etc.) se asignan a los enlaces y nodos como atributos. [11] La *Figura 5.7* representa una red de distribución de agua simplificada como un dígrafo.

Figura 5.7 Representación de una red simplificada de distribución de agua como dígrafo



Estructura de datos

La mayoría de productos de software de modelación organiza sus datos en un conjunto de tablas o bases de datos con una estructura jerárquica. Las tablas de nodos y enlaces con sus atributos respectivos forman el primer nivel de esta estructura. Los atributos más complejos

se almacenan usualmente en tablas secundarias y terciarias de esta estructura y se pueden asignar a nodos y enlaces por medio de sus IDs únicas. [40] La *Figura 5.8* muestra la estructura de datos jerárquica para la red de distribución simplificada e ilustrada en la *Figura 5.7*.

Figura 5.8 Estructura de datos jerárquicos de una red de distribución de agua

Nodos

ID	x	y	Tipo
N1	0,0	0,5	Reservorio
N2	2,5	0,5	Nodo de demanda
N3	4,7	1,0	Nodo de demanda
N4	6,5	1,3	Tanque
N5	8,3	1,0	Nodo intermedio
N6	11,7	0,0	Nodo de demanda
N7	11,3	2,0	Nodo de demanda
N8	9,0	2,3	Nodo intermedio
N9	9,0	3,0	Nodo de demanda

Demandas

ID	Demanda	Variación
N6	35	DOM
N7	160	IND
N9	20	DOM

Variacións

ID	Tiempo	Factor
DOM	01:00	3,5
IND	01:00	2,0

Tanques

ID	Diámetro	Nivel min.	Nivel max.
N4	12,0	1,0	4,0

Enlaces

ID	Nodo inicio	Nodo fin	Longitud
L1	N1	N2	2,1
L2	N2	N3	2,1
L3	N3	N4	1,7
L4	N4	N5	2,0
L5	N5	N6	3,1
L6	N6	N7	1,9
L7	N7	N8	2,3
L8	N4	N8	3,2
L9	N8	N9	1,8

Tubos

ID	Diámetro	Material	Tipo
L1	1	1	Bomba
L2	1	1	
L3	2	1	
L4	2	1	
L5	2	2	
L6	2	2	
L7	2	1	Válvula
L8	2	1	
L9	2	1	

Bomba

ID	Curva de bomba	Velocidad
L1	Curva1	2.900

Válvulas

ID	Tipo de válvula	Estado
L7	TCV	abierto

Las tablas de enlace usualmente definen la topología de una red estableciendo sus nodos de inicio y de fin. Las coordenadas y elevaciones de sus nodos determinan una posición especial de la red. Las bases de datos relacionales son convenientes para el manejo de datos del modelo, pero también se dispone de productos de software que pueden almacenar datos en listas tabulares en simples archivos de texto.

Parámetros del modelo

Los atributos de nodos y enlaces se pueden subdividir en parámetros y variables dados. Los parámetros dados de un modelo de redes hidráulicas pueden incluir todos los componentes del sistema (tubos, bombas, tanques), puntos de suministro y abstracción de agua como

controles del sistema. El modelo calcula variables como presiones de nudos, tasas de flujo y velocidades de flujo, cambios en el nivel de agua del tanque, calidad y otros atributos. La calidad de los parámetros de los datos ingresantes impacta directamente en la calidad y exactitud de los resultados de la simulación. Por ello, es esencial ajustar la calidad de los parámetros de los datos ingresantes a las tareas deseadas del modelo y lograr un equilibrio entre los esfuerzos de adquisición de datos y el valor informativo de los resultados del modelo. Los parámetros del modelo para los esfuerzos y calidad de adquisición de datos se pueden clasificar de la manera siguiente:

- Parámetros que se pueden medir directa y exactamente (por ejemplo la ubicación de la red de tubos, las geometrías de los tanques, las características de las bombas y los controles del sistema).
- Parámetros que se pueden medir directamente, pero con exactitud insuficiente (por ejemplo consumo de agua de los consumidores domésticos).
- Parámetros que no se pueden medir directamente (por ejemplo rugosidad del tubo, diámetro interno, pérdidas de agua). [11]

El último grupo de parámetros del modelo se puede determinar a través de la calibración del modelo que se describe en la sección siguiente.

Calibración del modelo

La calibración del modelo describe el proceso de comparar condiciones reales medidas del sistema con resultados del modelo simulados bajo las mismas condiciones de límite. El modelo tiene que ajustarse hasta que las discrepancias entre la realidad y los resultados simulados se minimice. El proceso de calibración usualmente involucra los parámetros de rugosidad del tubo, consumo de agua, pérdidas de agua y controles del sistema, y se asigna la mayor importancia a la rugosidad del tubo. [88]

En la mayoría de casos, se determina la rugosidad integral de la red. Este factor comprende no solamente la rugosidad real del tubo, sino también la pérdida de carga local, la reducción de diámetros internos debido a las incrustaciones y sedimentación así como a factores desconocidos (por ejemplo, válvulas parcialmente cerradas o información incorrecta sobre los diámetros). Las pruebas de flujo contra incendios se utilizan para determinar el flujo y los datos de presión: estas pruebas generalmente consisten en seleccionar y aislar una sección de tubo de medición en donde se induce el flujo abriendo un grifo contra incendios. Se toma simultáneamente las mediciones de flujo y presión cuando la sección del tubo alcanza condiciones de flujo constantes. [4] Los sistemas SCADA también son una buena fuente de datos para la calibración del modelo.

5.6.3. Datos ingresantes

Los datos ingresantes para los modelos de red hidráulica se pueden clasificar en cuatro grupos principales, que se pueden obtener idealmente de los sistemas de información relacionados a la empresa de agua: [4]

- **La información geográfica** se puede obtener idealmente a partir de la base cartográfica de la empresa de agua y comprende mapas topográficos, datos catastrales, fotografía aérea, modelos de elevación digital y otra información de fondo que es útil para determinar la ubicación física del modelo.
- **Los datos de las instalaciones** deben incluirse en el registro de la red así como toda la información sobre tubos, bombas, válvulas, tanques de almacenamiento y otros elementos físicos de la red de distribución de agua.
- **Datos operacionales,** es importante establecer controles y condiciones de límite en los modelos de red hidráulica. Comprenden presiones, tasas de flujo, niveles de agua de los tanques, parámetros de las válvulas, así como información sobre la condición y el control de las bombas. Usualmente se puede obtener datos operativos a partir del sistema SCADA de la empresa de agua.
- **Los datos de demanda** o los datos de consumo de agua e información sobre su asignación especial deben estar disponibles a partir del sistema de información del cliente.

Las empresas de agua deben ser conscientes de que recolectar datos de insumo para establecer el modelo no es una actividad que se hace una sola vez, sino un proceso permanente. El modelo debe actualizarse constantemente para lograr resultados de simulación exactos en el largo plazo.

5.6.4. Establecimiento del modelo

A continuación ilustramos los pasos más importantes que se requieren cuando se establece un modelo operativo de red hidráulica.

Definición de los objetivos del modelo

La empresa de agua tiene que decidir sobre los objetivos del modelo de red hidráulica antes de la adquisición de los datos y del establecimiento del modelo. Las demandas sobre el producto del modelo definen la exactitud, integralidad y nivel de detalle necesarios e influencian los esfuerzos y el gasto del proceso de modelación.

Adquisición y preparación de datos

Se tiene que adquirir y preparar los datos desde distintas fuentes para desarrollar y mantener un modelo que represente la red de distribución física de agua con un grado de exactitud que sea adecuado para cumplir con los objetivos definidos. Se tiene que utilizar un buen criterio de ingeniería para determinar la calidad de los datos y sus impactos sobre los resultados del modelo. [4] La calidad, cantidad y naturaleza de los datos disponibles varían de caso en caso, lo que hace que este paso tome mucho tiempo y sea difícil de predecir.

Establecimiento y calibración del modelo

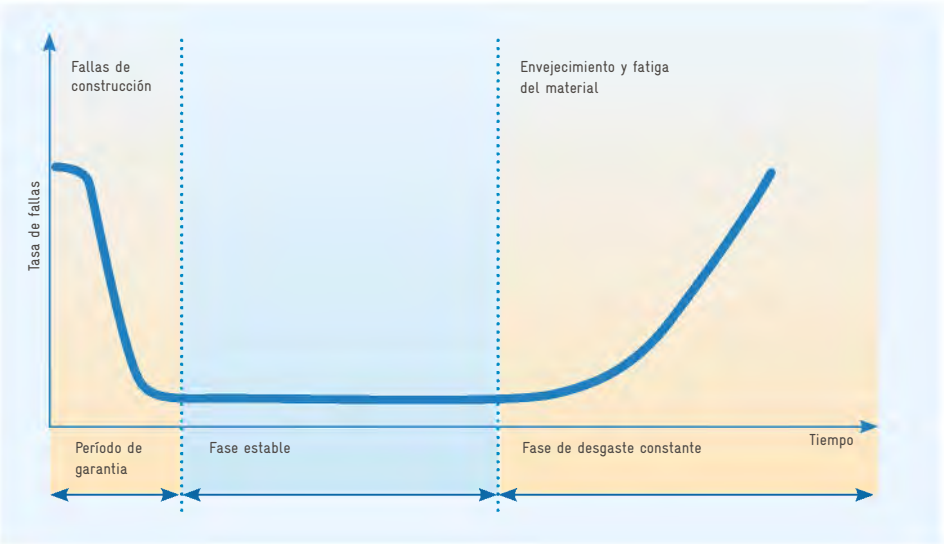
Este paso incluye abstraer datos físicos y no físicos del sistema de suministro de agua y transformarlo en los nodos y enlaces del dígrafo. Adicionalmente, se tiene que establecer los parámetros generales de simulación. La calibración y verificación del modelo es un proceso iterativo luego del cual el modelo está listo para su utilización.

5.7 Base de datos de fallas

5.7.1. Objetivos

Durante toda la vida útil de una red de distribución de agua ocurren fallas. Consecuentemente se puede definir las fallas como un impedimento local de la capacidad del servicio que generalmente incluye fuga. La experiencia muestra que las fallas se acumulan al inicio (fallas de construcción) y al final (fatiga de materiales, corrosión) de la vida útil de una sección discreta de tubo, tal como se ilustra en la curva de *bañera* que se muestra en la *Figura 5.9*. [43]

Figura 5.9 Comportamiento típico de la tasa de fallas en los tubos, según [43]



La curva muestra que las fallas están en función de la edad: los problemas de la *dentición* debido a los materiales de mala calidad y al trabajo de instalación se reducen después del inicio. Estos son seguidos por un periodo más largo de madurez con un nivel de fallas relativamente bajo cuando las fallas no son frecuentes ni serias y se pueden remediar a través de reparaciones específicas. Al final de la curva las fallas se incrementan rápidamente cuando el sistema está envejeciendo en el sentido propio de la palabra. Cuando las fallas se acercan a una tasa crítica de fallas, este es un signo de advertencia y la empresa de agua tiene que prepararse para el

hecho de que la rehabilitación está cerca y la vida de servicio del tubo terminará pronto. La antigua tubería tiene que volverse a revestir o reemplazarse a su debido tiempo. [32]

La evaluación de la condición general de una red de distribución de agua es difícil porque la mayoría de los elementos del sistema se instalan bajo tierra. El análisis estadístico y los métodos de visualización gráficos en una base de datos de fallas permiten a las empresas de agua identificar las acumulaciones espaciales, temporales o materiales específicas de fallas y sus combinaciones.

Este conocimiento es esencial para planificar sistemáticamente las medidas de rehabilitación, seleccionar los materiales convenientes e implementar rutinas de inspección y mantenimiento. La interpretación de los datos de fallas apoya al proceso de planificación en cuanto a elegir:

- material de tuberías
- protección contra la corrosión
- conexiones de tubos
- tipo y fabricante de válvulas y accesorios
- ejecución de trabajos de construcción.

Las fallas de tubos y válvulas se asocian directamente con las pérdidas de agua y el costo de las reparaciones dentro de una red de distribución de agua. La tasa de fallas para materiales seleccionados utilizada en una red de distribución de agua es fácil de calcular. El cálculo anual de la tasa de fallas puede ofrecer un indicador de la condición real de la red. Las variaciones temporales en la tasa de fallas se pueden utilizar para evaluar los impactos de las medidas como la gestión de la presión o las estrategias de rehabilitación.

5.7.2. Recolección de datos de fallas

Todos los datos de falla dentro de la red de distribución de agua deben registrarse sistemáticamente por medio de hojas de datos estandarizadas en copia dura o en formato digital. Siempre se debe registrar las fallas que causan fugas. Las fallas que no incluyen fugas también pueden registrarse para adquirir una vista panorámica amplia de los puntos débiles en la red. El personal calificado de la empresa de agua debe realizar el ingreso de los datos directamente in situ.

Material suplementario 5.2

Recolección de datos de fallas

La hoja de datos estandarizada debe tener un encabezamiento general, que proporciona espacio para ingresar la dirección o la posición geográfica, la fecha, la hora y el nombre del informante. Se debe agrupar otra información en bloques temáticos que detallan (a) el tipo de activo dañado, (b) tipo de falla, (c) causa de falla y (d) datos específicos del activo. [12]

(a) Tipo de activo dañado

Esta categoría especifica la parte de la red donde ha ocurrido la falla. Se puede hacer una distinción entre las troncales de transmisión, las troncales de distribución y las conexiones de servicio. Se puede situar la falla en los tubos, conexiones de los tubos, válvulas (distintos sub tipos), grifos o accesorios.

(b) Tipo de falla

El tipo de falla pueden ser rupturas, fisuras, huecos, así como conexiones que no sean a prueba de agua y válvulas defectuosas. Esta sección también debe mostrar si la falla causó fuga.

(c) Causa de la falla

Se va a hacer un intento de identificar y documentar la causa de la falla. Esta puede ser la corrosión, falla de material, falla de construcción, movimiento del suelo o una influencia de un tercer elemento, por ejemplo.

(d) Datos específicos al activo

Se puede reunir algunos datos específicos al activo sobre la parte dañada: la hoja de datos debe proveer recuadros donde el personal pueda marcar el diámetro nominal, el material, la protección contra la corrosión interna y externa y el tipo de conexión utilizado en la parte en cuestión. Si se dispone de información sobre la fecha de construcción y la compañía que realizó las obras, se puede añadir dicha información.

Se recomienda tomar fotos digitales de alta resolución del daño registrado y enlazarlas a la base de datos de fallas. Además, puede ser útil almacenar información sobre el costo de la reparación y los métodos de reparación seleccionados. [71]

5.7.3. Análisis de fallas

Las herramientas de procesamiento de datos de hoy en día ofrecen muchas posibilidades de análisis estadístico y visualización de datos de fallas. Una opción es enlazar la información de la base de datos de fallas al registro de la red. Este paso se puede tomar por medio de una interfaz de intercambio de datos entre ambos sistemas o integrando directamente los datos de falla en el registro de red. Las relaciones entre los datos de los tubos y los datos de fallas se pueden analizar usando herramientas SIG comunes. Esto implica ventajas para ambos sistemas de información:

→ Normalmente se obtiene información para la base de datos de fallas in situ donde se puede encontrar fácilmente características visibles de los

tubos. Los datos de registro de redes existentes sobre el diámetro, material y protección contra la corrosión externa pueden así verificarse, corregirse y complementarse.

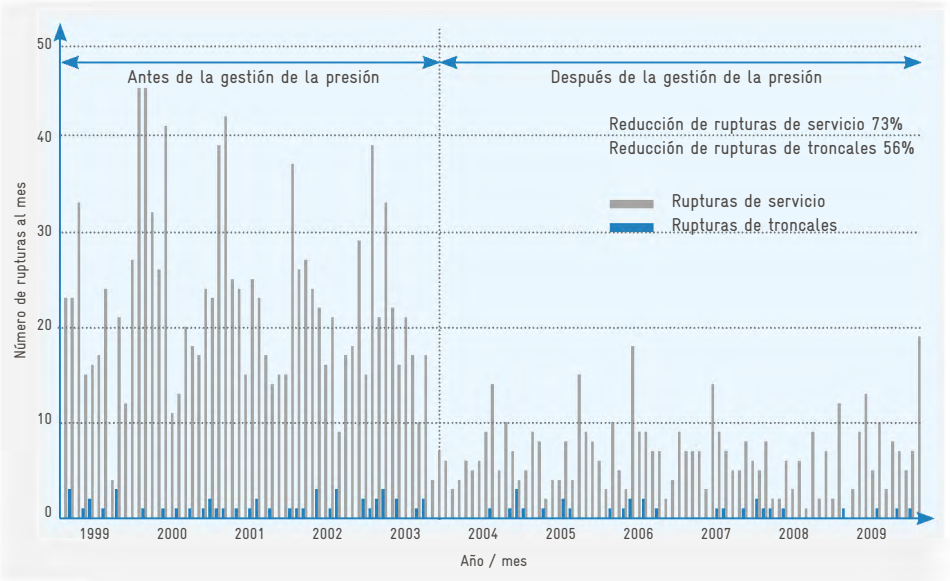
→ Puede ser más fácil obtener otra información a partir del registro de red, por ejemplo la fecha de construcción o protección contra la corrosión interna.

Se puede analizar las fallas en detalle, por ejemplo respecto de determinado material, diámetro o período de construcción, combinando todos los datos disponibles. Se puede analizar las fallas de acuerdo con su ubicación espacial calculando el número de daños por sección de tubo, calle o zona de presión. [12] Esta clasificación ayudará a las empresas de agua a detectar relaciones entre la tasa de fallas y la carga de tráfico, la presión del sistema o las características del suelo. La interpretación correcta de estos resultados ayudará a encontrar una estrategia óptima para operar, mantener y rehabilitar la red.

5.7.4. Conexión entre la tasa de fallas y la presión del sistema

La información registrada sobre fallas debería siempre enlazarse a datos sobre presiones medidas en el momento de la falla debido a la influencia significativa de las transiciones de

Figura 5.10 Influencia de la gestión de la presión en la frecuencia de rupturas, según [54]



presión (martillos de agua) así como a la presión excesiva sobre la aparición de nuevas rupturas y estallidos. Muchos estallidos son causados por la falta de una gestión apropiada del agua, y hay estudios numerosos que muestran cómo se puede reducir drásticamente los nuevos estallidos por la gestión de la presión *(ver Capítulo 6.4)*. Esto resultará en ahorros adicionales para las empresas de agua en virtud a la menor cantidad de inspecciones, reparaciones, costos de detección de fugas y mayor vida de servicio. La *Figura 5.10* ilustra cómo la gestión de la presión puede reducir las rupturas en las troncales y conexiones de servicio en base a información de *Joshua May (Gold Coast Water, Australia)*.

5.8 Sistemas de información sobre el cliente (SIC)

5.8.1. Objetivos

Hoy en día, virtualmente todas las empresas de agua de un cierto tamaño tienen sistemas de información electrónicos sobre el cliente (SIC), que normalmente consisten de varios subsistemas como bases de datos de clientes, bases de datos de contadores y sistemas de facturación electrónica. Tradicionalmente, estos sistemas tienen un papel clave en administrar los ingresos de las empresas de agua y por lo tanto los manejan los departamentos de contabilidad. A menudo se deja del lado la importancia y potencial que tiene la función de contabilidad de los sistemas de información sobre el cliente para reducir el ANF. [35]

La experiencia muestra que el ANF que resulta del consumo autorizado no facturado, a menudo no es causado por una falta de conexiones con contador de agua o por una falta de exactitud de los contadores, sino más bien por fallas en el manejo y coordinación de la lectura de contadores y en la oportunidad y exactitud de la base de datos de clientes. [77] De este modo, los sistemas exhaustivos y constantemente actualizados de información sobre el cliente que enlazan las cuentas del cliente y las entidades, como lotes, propiedades, conexiones y contadores, así como su ubicación geográfica son crucial sumamente ente importantes para una gestión sostenible del abastecimiento de agua. [27]

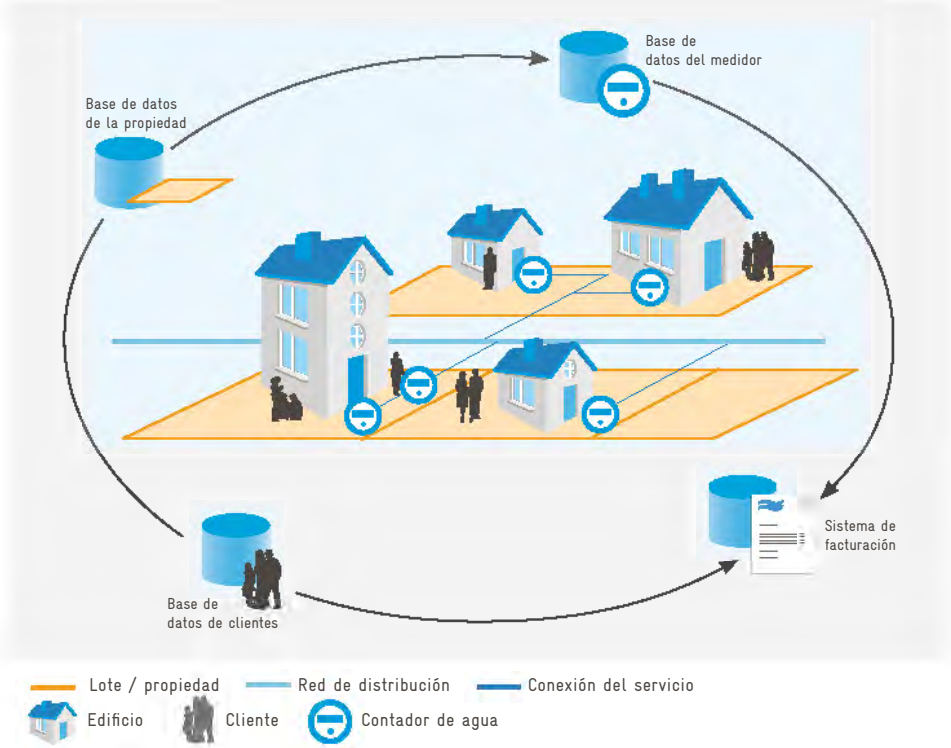
Los sistemas de información sobre el cliente pueden rendir los siguientes beneficios para la reducción de las pérdidas de agua:

- reducción de pérdidas aparentes y ANF
- incremento de la eficiencia de las lecturas, mantenimiento y reemplazo de contadores de agua
- mejoría de la calidad de los datos ingresantes para los cálculos de balance hídrico y
- provisión de ubicaciones precisas de la demanda para la modelación hidráulica, así como para el planeamiento de DHM y SGP.

5.8.2. Componentes del SIC

Los componentes principales de los sistemas de información sobre el cliente de las empresas de agua son usualmente: (a) la base de datos de clientes, (b) la base de datos de las propiedades, (c) la base de datos de contadores y (d) el sistema de facturación. La idea es interconectar y enlazar estos cuatro componentes al SIG de la empresa de agua. El operar estos componentes principales como entidades completamente separadas usualmente lleva a un trabajo redundante y al incremento de las pérdidas aparentes de agua y, por lo tanto, debería evitarse.

Figura 5.11 Conexiones entre los principales componentes del SIC



La siguiente sección describe los contenidos y funciones de los distintos sistemas de información:

(a) Base de datos de clientes

La base de datos de clientes contiene información sobre todos los clientes de una empresa de agua, ya sean personas naturales, empresas o instituciones públicas. Cada cliente se identifica por una ID única que enlaza al cliente a la propiedad y las bases de datos de contadores, así como al sistema de facturación. La base de datos de clientes proporciona información sobre:

- nombre, número de cuenta y dirección (la ubicación espacial se puede ligar al SIG)
- ID del contador de agua
- inquilino de la propiedad.

(b) Base de datos de lotes y propiedades

La base de datos de lotes y propiedades contiene datos asociados con cada lote de terreno al que se abastece dentro del área de servicio de una empresa de agua. Forma la base para las funciones comercial y de ingeniería, tales como asignación de tarifas, facturación y análisis de la demanda. La ID en laza las propiedades a la base de datos de clientes, de contadores y al sistema de facturación. Esta base de datos provee información sobre:

- ubicación de la propiedad (ligada al SIG)
- tipo de urbanización (residencial, comercial, administrativa, industrial, informal).
- propietario de la propiedad
- conexión del servicio a cada propiedad.

(c) Base de datos de contadores

La base de datos de contadores incluye toda la información relevante relacionada al parque de medidores de una empresa de agua. La ID, el número de serie, el tamaño, el tipo, la edad, la ubicación y el modo de lectura del contador (manual/automática) deben registrarse para cada contador de agua. La base de datos de contadores:

- recolecta datos de insumo de todas las lecturas manuales y automáticas de los contadores
- verifica la exactitud de las lecturas (consumo muy alto/bajo, consumo negativo)
- registra la condición del contador (adulterado, con fuga, dañado o inaccesible)
- provee al sistema de facturación, lecturas aceptables de contadores
- genera rutas de lectura de contadores (y mapas, si se basa en SIG)
- produce programas de mantenimiento de contadores para el departamento de operación y mantenimiento.

(d) Sistema de facturación

El sistema de facturación debe asegurar que se facture con exactitud a todos los clientes por el monto real de agua suministrado. Este sistema siempre se debe utilizar para obtener un alto nivel de cobertura de facturación asegurando que todos los consumidores de agua sean facturados ya sea que tengan contadores, no los tengan o estén conectados ilegalmente para reducir el consumo autorizado no facturado. Además, el sistema de facturación puede ayudar a reducir las pérdidas aparentes mejorando la integridad de los datos procesados. El sistema de facturación:

- recolecta y finaliza todas las lecturas aceptables de contadores
- genera estimados para contadores que no sean legibles
- calcula el consumo de cada contador
- genera cargos de acuerdo con la estructura tarifaria respectiva
- consolida cargos reales y transacciones previas de los clientes
- produce estados de cuenta de clientes
- identifica deudas y crea recordatorios para los deudores
- rinde cuenta de todos los pagos que ingresan. [92]

La exactitud de los datos es la base para todos estos sistemas de información. A menudo los datos están bastante incompletos, son cuestionables o incluso no existen, o los datos de distintas fuentes son inconsistentes y no coinciden. En este caso se tiene que hacer grandes esfuerzos para validar los datos.

5.9 Resumen y pasos siguientes

Sin datos válidos y sin sistemas apropiados de apoyo a las decisiones, las empresas de agua no son capaces de manejar sistemas de suministro de agua muy complejos y corren el peligro de desperdiciar esfuerzos y recursos financieros, así como de tener menores ingresos. Los contenidos del *Capítulo 5* de este manual técnico permitirán al lector:

- ☑ Comprender que la información es la clave para la reducción exitosa de las pérdidas de agua.
- ☑ Emplear el SIG como un instrumento para intercambiar información y para que varios departamentos de las empresas de agua trabajen juntos.
- ☑ Familiarizarse con la estructura y funcionamiento típicos del SIG.
- ☑ Conocer qué datos de insumos se requieren para establecer una base cartográfica digital y cómo conseguirlos.
- ☑ Comprender la importancia y beneficios de un registro de red y un modelo hidráulico para gerenciar eficientemente los servicios de suministro de agua.
- ☑ Establecer y emplear una base de datos de fallas y un sistema de información al cliente.

Al implementar estos sistemas de información, las empresas de agua crean la base necesaria para tener medidas prácticas exitosas para la reducción de pérdidas de agua, lo cual se describirá en el *Capítulo 6*.

5

Foto: © J. Baader, 2008

Métodos e instrumentos para reducir las pérdidas reales de agua

6

6.1 Objetivos

Al final de este capítulo, el lector conocerá los métodos principales para:

- Diseñar e implementar distritos hidrométricos para mejorar el control sobre la distribución, consumo y pérdidas de agua.
- Comprender los aspectos técnicos de la gestión de la presión, elegir el caso de empleo más apropiado para distintas condiciones locales y desarrollar planes de implementación de un proyecto típico para la gestión de la presión.
- Elegir los métodos e instrumentos apropiados para la detección y ubicación de fallas.
- Mejorar la eficiencia de las reparaciones de tubos y la gestión de la rehabilitación de infraestructura.

6.2 Acción contra las pérdidas reales de agua

6.2.1 Programación de intervenciones

La condición de las redes de distribución de agua se deteriora constantemente sin suficientes medidas de mantenimiento y rehabilitación. En la misma medida, las pérdidas reales de agua se elevan constantemente sin estrategias de intervención adecuadas por parte de la empresa de agua. Cuando se programa las intervenciones, las empresas de agua normalmente combaten las pérdidas reales de agua con uno de los siguientes enfoques: (a) la estrategia pasiva, (b) la estrategia preventiva y (c) la estrategia de inspección. [13] [22]

(a) Mantenimiento impulsado por eventos: estrategia pasiva (control de fugas pasivo)

Se toma acción sólo para combatir fallas que ya han ocurrido. Los clientes generalmente reportan o el personal de la empresa de agua usualmente anota los estallidos de tubos o caídas visibles de la presión debido a una fuga importante. La estrategia pasiva se encuentra principalmente en empresas de agua que no tienen una gestión adecuada de las pérdidas de agua. Las pérdidas generales son usualmente altas porque no se hace esfuerzos para ubicar y reparar las fugas escondidas y para reducir las fugas de fondo. El mantenimiento impulsado por eventos impide un manejo sostenible de las pérdidas de agua.

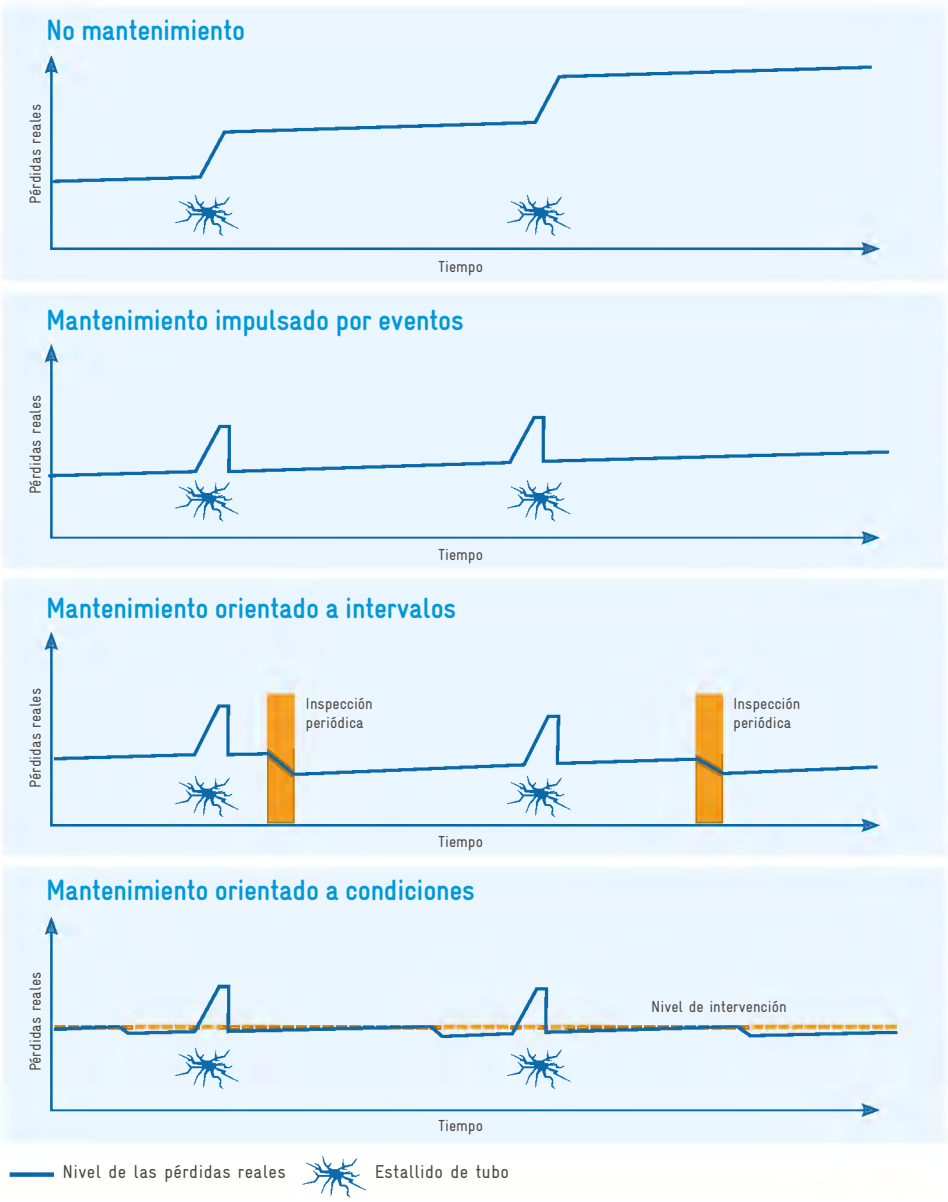
(b) Mantenimiento orientado a intervalos: estrategia preventiva (control de fugas proactivo)

Se ejecuta inspecciones y mantenimientos en intervalos definidos. Se requieren cortos ciclos de inspección a altos niveles de fuga. Las tasas bajas de fallas y los bajos niveles de fuga permiten tiempos más largos. La estrategia preventiva es trabajosa porque se tiene que inspeccionar todas las partes de la red sin importar su condición real.

(c) Mantenimiento orientado a las condiciones: estrategia de inspección (control de fugas proactivo)

La condición de la red y el nivel real de fuga se monitorean continuamente a través de inspecciones regulares y de mediciones permanentes del flujo. Se toma acción tan pronto el nivel de fuga exceda un valor crítico definido o según una estrategia de intervención económica basada en el valor de las pérdidas reales acumuladas desde la intervención anterior. Por lo tanto, las inspecciones regulares se pueden llevar a cabo a intervalos más largos. La estrategia de inspección es el método de intervención más orientado a metas y el más eficiente para reducir las pérdidas reales de agua.

Figura 6.1 La comparación entre distintas estrategias de intervención para combatir las pérdidas reales



La *Figura 6.1* ilustra de manera gráfica el impacto de estas estrategias en la dinámica de las pérdidas reales de agua.

Más aún, existe una conexión entre la programación de medidas para contrarrestar las pérdidas de agua y los métodos apropiados que una empresa de agua puede elegir: el mantenimiento orientado a condiciones, por ejemplo, es sólo factible si la red de distribución de agua se ha dividido en sectores discretos (DHMs) donde todos los flujos de entrada y salida se miden y analizan continuamente.

6.2.2 Elección de métodos de intervención apropiados

Como el *Capítulo 3.4* describe, hay muchos factores que influyen en la ocurrencia y extensión de pérdidas reales en una red de distribución de agua. Antes de decidir qué métodos de intervención son apropiados, una empresa de agua tiene que comprender qué factores contribuyen a las pérdidas reales en este sistema particular. Un método único o una combinación de diferentes métodos constituirán el instrumento más eficiente y económico para la reducción de las pérdidas de agua dependiendo de la situación local. [77]

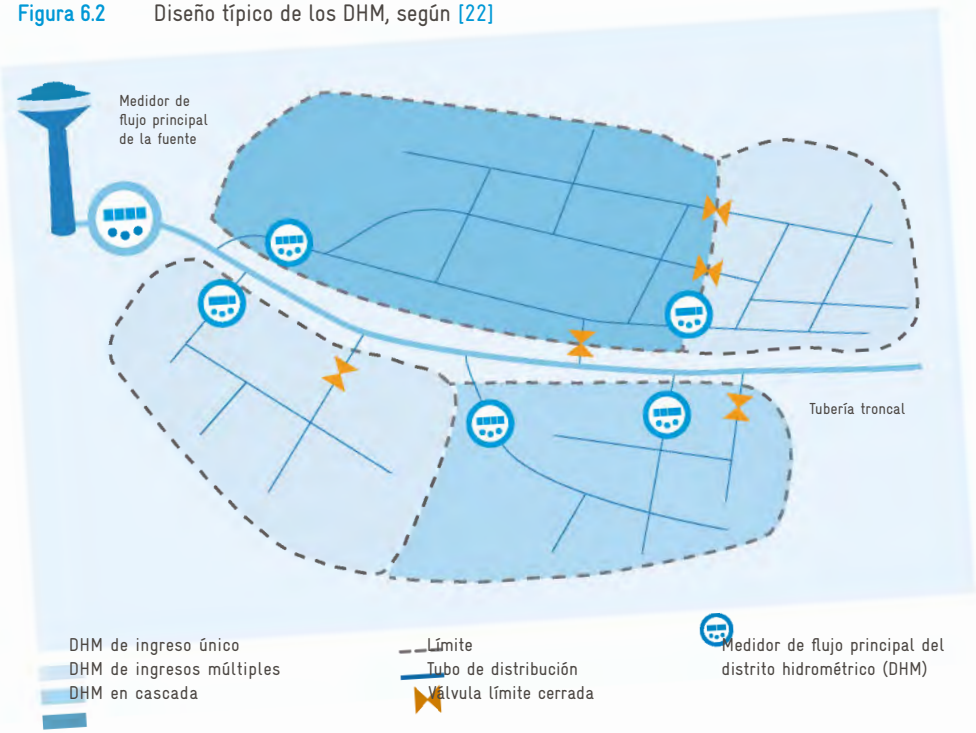
El grupo de trabajo sobre pérdidas de agua de la IWA definió los cuatro métodos principales para combatir las pérdidas reales de agua de la manera siguiente: gestión de la presión, detección activa de fugas, velocidad y calidad de las reparaciones y gestión de la rehabilitación de la infraestructura [69] Adicionalmente, el subdividir las redes de distribución de agua en DHMs se puede ver como un método y un prerrequisito porque es esencial para monitorear continuamente las fugas y se requiere para instalar sistemas de gestión de la presión. Estos cinco métodos principales se describen en los siguientes capítulos con un enfoque especial sobre la gestión de la presión en el *Capítulo 6.4*.

6.3 Distritos hidrométricos (DHMs)

6.3.1 Definición y propósitos de los DHMs

Un distrito hidrométrico (DHM) se define como un área discreta de una red de distribución de agua. Se crea usualmente cerrando válvulas de aislamiento de modo que sea flexible a las demandas cambiantes. Sin embargo, un DHM se puede crear también desconectando permanentemente tubos a las áreas vecinas. El agua que fluye hacia y desde el DHM se mide y periódicamente se analiza los flujos para monitorear el nivel de fuga. [58] Los DHMs pueden clasificarse principalmente en tres tipos: DHM de ingreso único, DHM de ingresos múltiples y DHMs en cascada, tal como se ilustra en la *Figura 6.2*.

Figura 6.2 Diseño típico de los DHM, según [22]



La subdivisión de grandes redes de distribución de agua en un número ilimitado de DHMs tiene la ventaja de que se puede ubicar fugas nuevas u ocultas mucho más tem-

prano (tiempo reducido de percepción) y mucho más precisamente (tiempo reducido de ubicación). Las empresas de agua pueden determinar inmediatamente los repentinos flujos excepcionalmente altos dentro de un área si se monitorea los flujos de ingreso y de salida de un DHM de manera regular *(ver Capítulo 6.5.2)*. Como resultado de esto, los tiempos reducidos de percepción, ubicación y reparación para las nuevas fugas se reducen de manera significativa. Adicionalmente, se puede cuantificar el nivel de fuga para distintas áreas y se puede dirigir eficientemente la detección de fugas y actividades de reparación a áreas problemáticas. [7]

Además de ofrecer estas ventajas, los DHMs también se pueden promover y convertirse en sectores de gestión de la presión (SGPs) instalando válvulas reductoras de presión (VRPs) en sus puntos de entrada. La gestión de la presión reduce el caudal de fugas no detectadas y fugas de fondo y disminuye el número de nuevos estallidos de tubos *(ver Capítulo 6.4)*. En resumen, se puede afirmar que:

- un DHM es un área discreta en donde se mide los flujos de entrada y salida pero sin gestión activa de la presión
- un SGP es un área discreta con gestión activa de la presión donde se mide usualmente los flujos de ingreso y los flujos de salida.

Crear un DHM puede ser el primer paso para contrarrestar el abastecimiento intermitente: los DHMs facilitan ubicar y reparar las fugas principales y de esa manera pueden ayudar a reducir los periodos de interrupción del suministro. Otro beneficio de los DHMs es la capacidad que tienen para conducir evaluaciones de ANF limitadas localmente comparando los volúmenes de ingreso netos en el DHM con el consumo facturado de los clientes en el mismo periodo. [7]

6.3.2 Diseño de los DHMs

El diseño de los DHMs requiere un conocimiento profundo del sistema de suministro de agua. Es indispensable la existencia de una red completa actualizada, registro e información topográfica. Por otro lado, se debe disponer de patrones de consumo de agua y datos operativos sobre flujos y presiones. Para las redes complejas, se puede requerir un modelo hidráulico calibrado para determinar los impactos de sectorización sobre las presiones de servicio y para detectar cuellos de botella potenciales, tubos redundantes y zonas en peligro por estancamiento. Se debe considerar las reglas generales siguientes cuando se diseñan los DHMs. [58]

- Los DHMs no deben incluir troncales o tanques de almacenamiento. Si fuera inevitable, se debe instalar medidores de flujo para controlar el ingreso y salida de agua. Su diseño debe separar los DHMs del sistema troncal tanto como sea posible, mejorando así el control de las primeras sin afectar la flexibilidad del segundo.
- Cada DHM debe tener de preferencia un punto de suministro único medido. Puede ser necesario o útil abastecer a un DHM por medio de dos válvulas de ingreso equipadas con medidores de flujo para cumplir con las necesidades del sistema contra incendios. Todos los medidores de flujo deben dimensionarse e instalarse correctamente de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Tanto los medidores de flujo como las VRPs tienen que dimensionarse para medir y controlar los flujos bajos previstos luego de la gestión de la presión y la detección de fugas. Por lo tanto, usualmente se tienen que dimensionar hacia abajo en comparación con el diámetro real de la troncal. Se debe transferir los datos de flujo medido a la sala de control a través de la telemetría, si fuera posible.
- Se debe crear límites de DHM cerrando válvulas de aislamiento. Los límites de DHM deben seguir límites naturales (por ejemplo ríos, líneas de ferrocarril, vías principales). Se debe minimizar el número de válvulas a cerrarse. Las válvulas de aislamiento tienen que estar claramente marcadas o equipadas con dispositivos especiales para evitar que personal no autorizado de la empresa las abran accidentalmente.
- Las variaciones de elevación del terreno deben ser mínimas en el DHM. La implementación futura de sistemas de gestión de presión debe recordar esto cuando se planifica un DHM.
- Se debe determinar los tipos de consumidores (domésticos, industriales, comerciales o clientes críticos como hospitales) y sus respectivos requerimientos de suministro de agua.
- Debe respetarse las regulaciones legales que rigen las presiones mínimas, las restricciones locales debido a la topografía y altura de los edificios así como las necesidades de la lucha contra incendios. Se puede dejar abierto el límite si el cerrar válvulas en un punto determinado generara problemas de presión, pero se debe instalar medidores de flujo para controlar los flujos de ingreso y los flujos de salida.
- El cerrar válvulas de aislamiento para crear DHMs incrementará el número de tubos sin salida. De este modo, los DHMs se deben diseñar de tal manera que se evite problemas de calidad del agua relacionados al estancamiento. Los modelos de red hidráulica ayudan a identificar y evitar zonas potenciales de estancamiento.
- La gestión de la presión tiene un papel clave en el manejo de las fugas y, donde fuera posible, se debe incorporar al proceso de reconfigurar el sistema cuando se diseñan los DHMs.

Las empresas de agua tienen que considerar factores hidráulicos, prácticos y económicos cuando planean subdividir la red en DHMs discretos. Respecto del tamaño de los DHMs, los costos de instalación y mantenimiento por conexión generalmente son más altos para las zonas pequeñas porque se requiere una cantidad mayor de válvulas y medidores. Sin embargo, los DHMs más pequeños tienen la ventaja de que se descubre más pronto la presencia de fugas nuevas.

Material suplementario 6.1

Planeamiento de DHMs

Más aún, es posible distinguir incluso fugas pequeñas provenientes del uso nocturno de los clientes y las fugas de fondo, y se puede llevar a cabo más rápidamente la ubicación de una fuga dentro de un DHM. Por lo tanto, los DHMs pequeños pueden lograr económicamente un nivel más bajo de fugas que los DHMs grandes. En sus notas de guía de DHM, la IWA recomienda que los DHMs en áreas urbanas tengan entre 500 y 3.000 conexiones de servicio. [58] De acuerdo con la Asociación Técnica Alemana para el Gas y el Agua (DVGW), la longitud total de tubos de distribución dentro de un DHM debe ir de 4 km. a un máximo de 30 km., dependiendo de la exactitud deseada de control de pérdidas de agua. [13]

También es factible y útil implementar DHM en redes de distribución con suministro intermitente, aunque es más difícil determinar el nivel de fuga si los clientes almacenan agua en tanques privados. Se puede calcular un consumo privado por hora de servicio y se puede comparar con el flujo ingresante en el DHM siempre que se disponga de datos confiables del consumo de los clientes.

6.3.3 Implementación de un DHM

Una vez que los límites de un nuevo DHM se han determinado, se debe realizar una investigación del sitio y se debe cerrar y verificar la hermeticidad de las válvulas de aislamiento existentes. Es esencial probar las válvulas porque una válvula que fugue distorsionará la evaluación de fuga no solamente en eso DHM, sino también en el DHM vecino. Se tiene que reemplazar las válvulas defectuosas. Se debe instalar una nueva válvula en los límites sin válvulas.

Se tiene que diseñar un medidor de flujo apropiado e instalarlo para el punto de ingreso. Cuando se dimensiona el medidor de flujo, se tiene que tomar en consideración el diámetro de tubo existente, el rango de flujo esperado, la pérdida de carga admisible en flujo pico y flujo reverso. La exactitud y repetibilidad de las mediciones, los costos de instalación y el mantenimiento así como las condiciones operativas (suministro continuo o intermitente) también desempeñan un papel importante. [22]

Una vez que se ha cerrado y probado todas las válvulas, se debe realizar una prueba de presión cero (preferiblemente durante un periodo de consumo bajo y luego de haber informado a los clientes) para verificar que el DHM esté completamente aislado. Se debe instalar varios medidores de presión en todo el DHM. Entonces, se tiene que cerrar la válvula de

ingreso al DHM a la vez que se observa la presión en la zona. Se puede simular el consumo abriendo un grifo contra incendios. Si la presión cae a cero, indica que los límites del DHM son herméticos. Si la presión no cae o si se eleva nuevamente después de que se cierra el grifo, es muy probable que una válvula de aislamiento no esté completamente cerrada o que haya una conexión desconocida a una zona adyacente. El área de ingreso potencial puede localizarse evaluando la carga de presión (elevación desde el nivel de tierra mas presión en el medidor de presión) en todo el DHM. [58]

Luego de instalar y probar, se debe hacer una evaluación para establecer si todos los medidores de flujo están trabajando correctamente y si los clientes en el distrito enfrentan alguna falta de presión o de abastecimiento.

6.3.4 Operación y gestión

Como todas las otras metodologías de reducción de fugas, implementar distritos hidrométricos no es un arreglo rápido, sino que requiere un compromiso de largo plazo por parte de la gerencia de una empresa de agua y de su personal operativo. Si se diseña e implementa correctamente un DHM puede ser una de las medidas más eficaces para reducir las pérdidas de agua. [59] Una vez que se ha instalado el DHM, se tiene que conducir trabajo inicial como determinar fugas y eliminar la acumulación de fugas detectadas y no detectadas. En el largo plazo, las empresas de agua tienen que instituir y mantener operaciones de rutina y deben verificar la capacidad y potencial de implementar gestión de la presión.

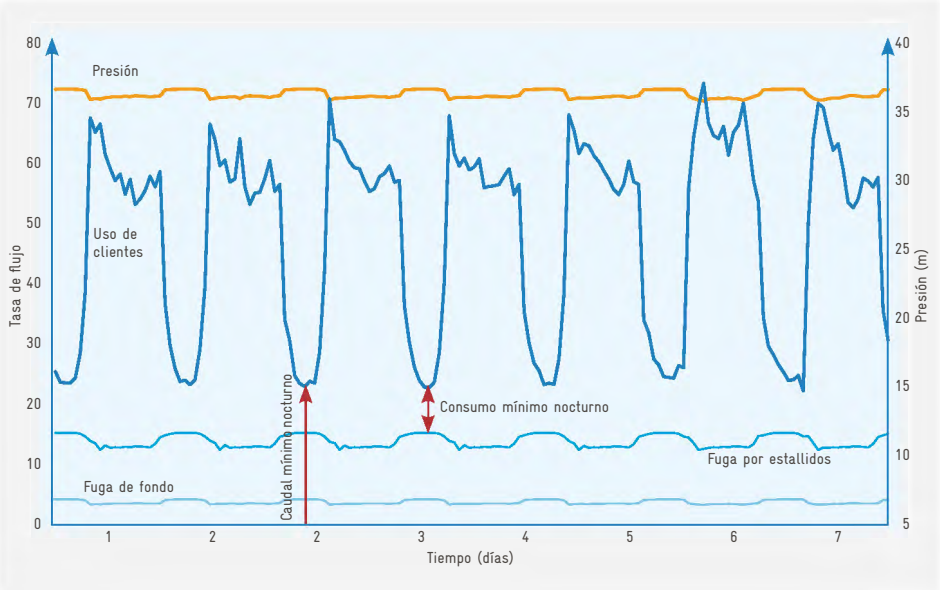
Determinación del nivel de fuga

Las fugas en un DHM se pueden calcular como la diferencia entre el flujo ingresante total y el consumo de los clientes dentro del mismo periodo. Se puede medir directamente el ingreso al sistema luego de instalar medidores de flujo en todos los puntos de entrada (y salida) de un DHM. Se puede transferir las mediciones del flujo a la sala de control de la empresa de agua como datos en tiempo real utilizando sistemas SCADA. Los datos en tiempo real permiten reacciones inmediatas a las nuevas fugas, pero también el método más costoso de monitorear las tendencias de fuga en los DHMs, sino se requiere el SCADA para otros usos, como la gestión de la presión. Los medidores de flujo también se pueden leer diariamente o semanalmente por medio de la red de GSM o manualmente porque la mayoría de fugas nuevas surge lentamente y tiene tasas de flujo bajas al principio. [77]

El método más común para determinar el nivel de fuga en un DHM es analizar el periodo de caudal mínimo nocturno (CMN), que ocurre usualmente entre las 2 y las 4 de la mañana en las áreas urbanas. El CMN debe ser el mínimo de una hora de la agregación de todos los flujos ingresantes y salientes registrados del DHM. [22] El consumo del cliente

está en su mínimo durante este periodo y la fuga representa así el porcentaje máximo del flujo ingresante neto en el DHM *(ver Figura 6.3)*. Las fugas no reportadas y las fugas de fondo (no detectables) constituyen la fuga total. Se dispone de varios procedimientos para estimar la cantidad de fugas de fondo.

Figura 6.3 Relación entre la tasa de flujo, presión y fuga, según [58]



Eliminación de la acumulación de fugas no detectadas

Luego de la instalación de un nuevo DHM, se tiene que emprender una campaña intensiva de detección y reparación de fugas para determinar y eliminar la acumulación de fugas visibles y ocultas en el distrito. Como consecuencia, el flujo que ingresa al DHM debe consistir sólo de consumo del cliente y fuga de fondo (no detectable). El patrón de flujo resultante debe registrarse como un valor de referencia para establecer los objetivos de fuga.

Implementación y mantenimiento de operaciones de rutina

Se debe registrar información clave para cada DHM e incluirlo en mapas del sistema. Esta información (por ejemplo sobre límites de zona, ubicaciones de medidores de flujo, hogares y otros registros de los consumidores) siempre debe mantenerse actualizada. Es importante verificar regularmente que se marque, cierre y hermetice todas válvulas de aislamiento para propósitos del mantenimiento del DHM. Los registros del lavado de tubo de apertura de

válvulas de aislamiento por razones operativas deben mantenerse y se debe advertir al personal de supervisión que no incluya los flujos resultantes en el análisis de fugas. Se debe mantener apropiadamente los medidores de flujo para asegurar un alto nivel de exactitud en los datos. Se debe monitorear las quejas de los clientes sobre la presión baja, interrupción del servicio y problemas de calidad del agua para identificar las fallas potenciales en el DHM.

Verificación de la capacidad de gestión de la presión

Las fugas en un DHM estarán siempre compuestas de estallidos detectables de tubos (tasas de flujo mayores a 250 l/h a 50 m de presión) y fugas de fondo (filtraciones o agua que gotea de uniones, válvulas o accesorios) que no son detectables con métodos de detección acústicos de fugas. Determinar si instalar un sistema de gestión de la presión sería una opción económica para reducir más los niveles de fuga es aconsejable, especialmente si las fugas de fondo son significativas.

6.4 Gestión de la presión

6.4.1 Definición y propósito de la gestión de la presión

Como ya se explico ampliamente en este manual técnico, la presión excesiva de agua puede agravar el riesgo de nuevas roturas de troncales de agua. La relación entre presión y fuga también significa que la presión alta puede causar excesivos caudales de fugas. Inversamente, la reducción de la presión de agua en una red de tubos puede reducir las fugas.

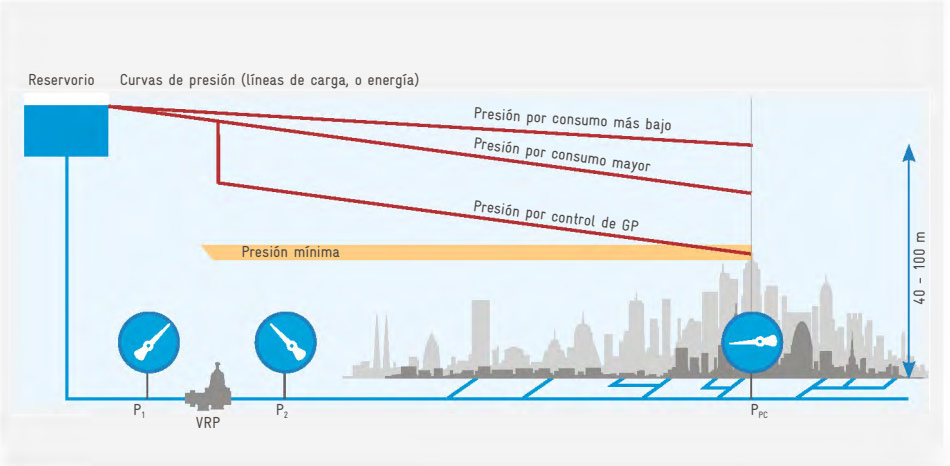
La gestión de la presión comprende así el ajuste y control de la presión del agua en los sistemas de suministro de agua a un nivel óptimo. La implementación de un sistema de gestión de la presión puede ser rentable no solamente en las redes de distribución de agua, sino también en las redes nuevas que se está planificando. *Thornton et al.* han definido generalmente la gestión de la presión como *la práctica de manejar presiones del sistema a niveles óptimos de servicio asegurando suministro suficiente y eficiente para usos y consumidores legítimos, a la vez que se reduce las presiones excesivas innecesarias, y se elimina las transiciones y los controles de nivel defectuosos, todo lo cual hace que el sistema de distribución fugue innecesariamente*. [78]

Cuando se reduce la presión, siempre debe asegurarse la presión de suministro requerida mínima en el punto crítico de la red. Se debe notar que la ubicación de un punto crítico dentro de la red puede alterarse dependiendo de variaciones en el comportamiento de consumo o debido a una estructura de sistema cambiante. La empresa de agua misma, las autoridades de agua o la legislación local definen usualmente la presión de suministro mínima. Además siempre se debe evitar las presiones negativas, por ejemplo durante consumo pico o condiciones de flujo contra incendios.

La presión mínima de suministro depende de la altura de los edificios, de la legislación local y de las necesidades de los clientes. En Alemania, por ejemplo se tiene que garantizar 15 m de presión en todos los puntos en la red todo el tiempo. Las presiones máximas, especialmente en períodos de bajo consumo en la noche, son usualmente mucho más altas, a menudo 60 m o más. Esto significa un gran potencial para reducir la presión y, así, las pérdidas de agua. La siguiente sección explica los principios que están detrás de la idea de gestión de la presión.

La *Figura 6.4 en la página siguiente* muestra un bosquejo de un típico sector de gestión de la presión (SGP) con una entrada única y una válvula reductora de presión (VRP). En el bosquejo, P_1 se refiere a la presión corriente arriba de la VRP, P_2 se refiere a la presión corriente abajo de la VRP y P_{PC} se refiere a la presión en el punto crítico, es decir el punto de presión más baja dentro del SGP. El punto crítico se puede localizar en cualquier lugar del SGP y depende de la topografía, los diámetros de los tubos y el comportamiento del consumo de agua dentro de la red.

Figura 6.4 Vista simplificada de presiones dentro de una red de distribución



Las líneas rojas en la *Figura 6.4* representan una distribución simplificada de la presión dentro de la red, desde el ingreso (P_1) hasta el punto crítico (P_{PC}). La pérdida de energía en los tubos reduce la presión entre P_1 y el punto crítico. Sin gestión de la presión, la presión en el punto crítico puede variar a lo largo de todo el día: el alto consumo durante el día causará pérdidas de presión altas mientras que durante la noche las velocidades del flujo y las pérdidas de presión están en un mínimo. Sin embargo, la gestión de la presión puede reducir la presión en el punto crítico a la presión requerida mínima y también mantenerla a un nivel constante durante todo el día empleando distintas estrategias de modulación de la VRP.

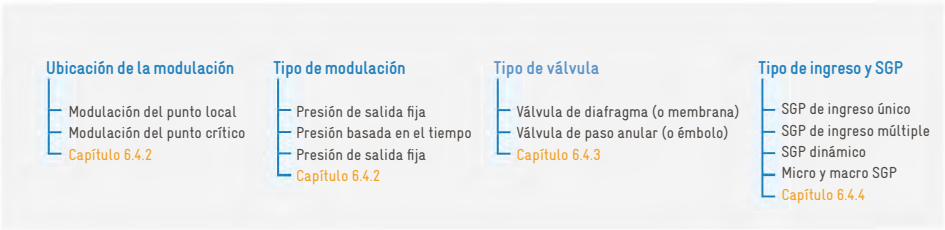
Para decirlo de manera simple, la gestión de la presión no sólo reduce las variaciones de presión, sino que también elimina la presión superflua de la red y de este modo reduce el caudal de las fugas y las pérdidas reales de agua.

Este objetivo se puede enfocar utilizando distintas soluciones técnicas descritas en este capítulo. Sin embargo, no siempre es fácil lograrlo, ya que involucra distintas etapas y análisis de daros previos a diseñar un esquema de reducción de la presión. Todos los SGPs son diferentes y tienen sus propias restricciones específicas. Por lo tanto, cada proyecto de implementación se tiene que hacer a la medida. La siguiente sección explica distintos conceptos de gestión de la presión.

Se debe mencionar que las VRPs no son la única herramienta de gestión de la presión. También se puede utilizar bombas de velocidad controlada para manejar la presión en casos en que una bomba alimente directamente una red de distribución.

El *Capítulo 6.4.2* introduce distintos conceptos para el control (modulación) de los sistemas de gestión de la presión. El *Capítulo 6.4.3* describe varios de tipos de VRPs y el *Capítulo 6.4.4* explica los distintos tipos de SGP. El *Capítulo 6.4.5* presenta un enfoque paso a paso para planear y diseñar un sistema de gestión de la presión. La *Figura 6.5* resume los diferentes conceptos y componentes disponibles sobre gestión de la presión.

Figura 6.5 Clasificación de distintos conceptos y componentes para la reducción de la presión



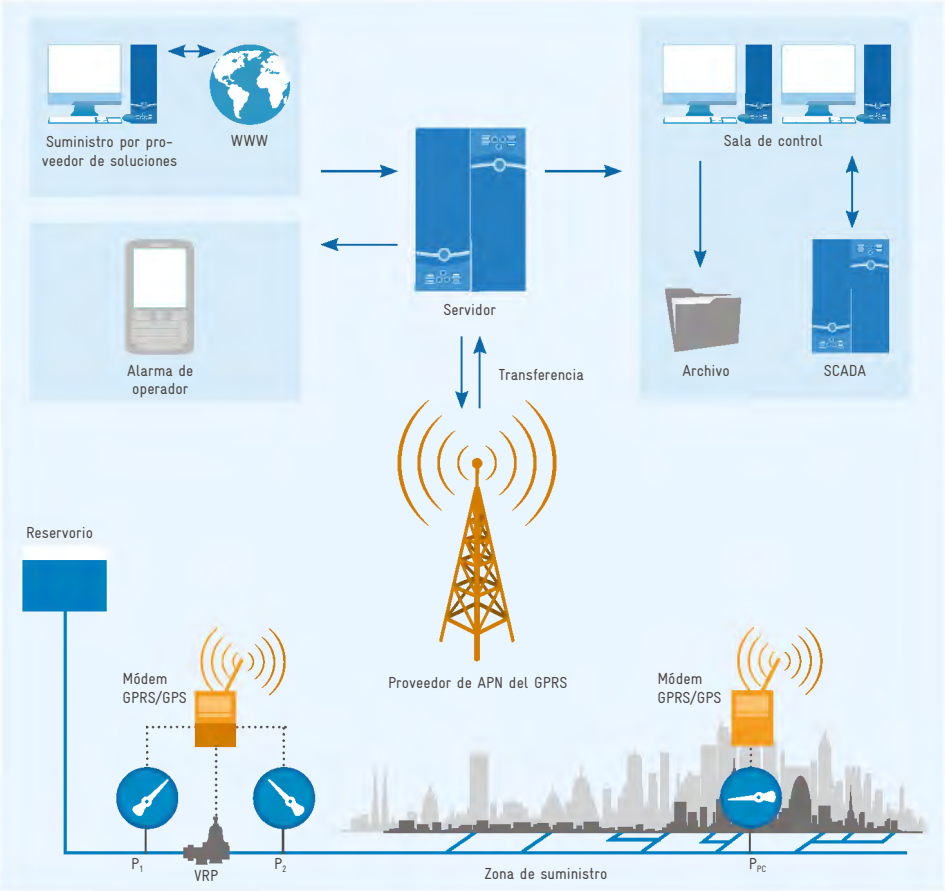
6.4.2 Conceptos de modulación

El término modulación describe los métodos por los cuales se controla las VRPs en un sistema de gestión de la presión. Los conceptos de modulación se pueden dividir de acuerdo al tipo de modulación (que comprende distintos modos de control para VRP y ubicación de modulación) que define si se controla la presión de manera directa detrás de la VRP o en puntos discretos en la red de distribución de agua). Estos dos conceptos se describen en las siguientes secciones. El *Capítulo 6.4.5* explica cómo se puede combinar estos elementos para crear soluciones a la medida de diferentes condiciones y requisitos locales. Se debe notar que todos los tipos de modulación son flexibles y se pueden adaptar o mejorar cambiando simplemente los parámetros del controlador lógico programable (CLP) de una VRP.

(a) Ubicación de la modulación

Modulación de la presión del punto local – Esta técnica es la manera más simple de reducir la presión. Consiste en modular la presión en el ingreso del SGP instalando una VRP para fijar P_2 a valores constantes o predefinidos. Sólo se requiere sensores de presión en P_1 y P_2 y la comunicación entre sensores y VRPs es simple. Este tipo de modulación requiere la inversión más baja, pero no se puede reducir la presión a un óptimo debido al margen de seguridad mayor que se necesita para asegurar la presión de servicio a P_{PC}. Por lo tanto, la presión del flujo de fuga es limitada. Esta técnica a menudo se utiliza junto con la modulación del tiempo, que se explica en la *Sección (b)*.

Figura 6.6 Comunicación en un sistema de control remoto



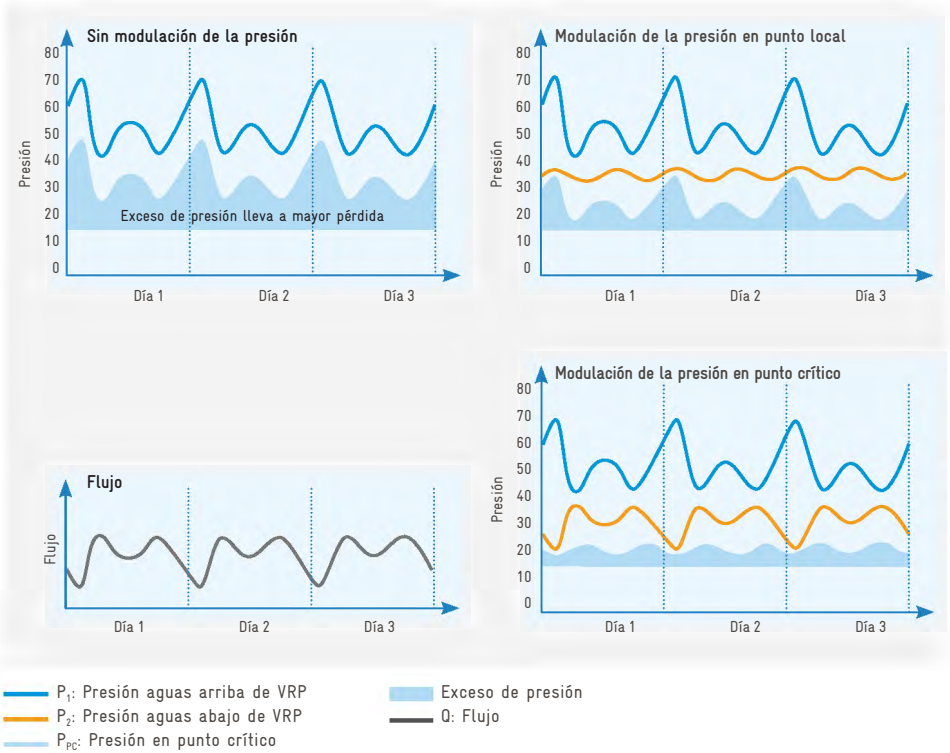
Modulación de la presión en el punto crítico – Al utilizar la modulación de punto crítico (también conocida como modulación remota basada en nodo), un sensor de presión monitorea continuamente el punto crítico P_{PC} y comunica información a la VRP en el ingreso del SGP. Esta VRP ajusta continuamente P_2, para que P_{PC} permanezca tan cerca como sea posible del valor deseado (por ejemplo la presión de suministro mínima de 20 m). Esta técnica produce mejores resultados que la modulación de punto local, pero también requiere inversiones adicionales para el sensor de presión de P_{PC} y los dispositivos de comunicación. Se puede utilizar transmisión por radio o un modem GPRS/GSM con una tarjeta SIM utilizando el internet para comunicar los resultados, tal como se muestra en la *Figura 6.6*. Un sistema típico también permite un monitoreo en vivo y un control del SGP.

La ubicación del punto crítico dentro de un SGP puede alterarse debido a cambios en la estructura de la zona (punto de ingreso adicional, válvulas de aislamiento cambiadas, clausura de secciones de tubo, etc.) o debido al cambio en el comportamiento de consumo. Las presiones dentro de la red, por lo tanto, se deben monitorear regularmente.

Los efectos de distintos tipos de modulación de presión se representan en la *Figura 6.7*, y muestran P_1, P_2, P_{PC} y el flujo Q para un sistema sin modulación de la presión y dos sistemas con modulación de punto local y de punto crítico.

Como muestra la *Figura 6.7* las presiones en P_1 y P_{PC} están inversamente conectadas al patrón de consumo donde no existe gestión de la presión. En el caso de modulación de presión de punto local, se fija P_2 a un valor definido, lo cual implica una reducción de la presión en el punto crítico. Aún así, la presión P_{PC} en el punto crítico varía debido a cambios en el patrón de consumo. En el caso de la modulación de punto crítico, la presión P_{PC} se mantiene casi constante al nivel deseado mientras que P_2, que está corriente abajo de la VRP, se modula continuamente.

Figura 6.7 Different modulation concepts and their effects on Presión



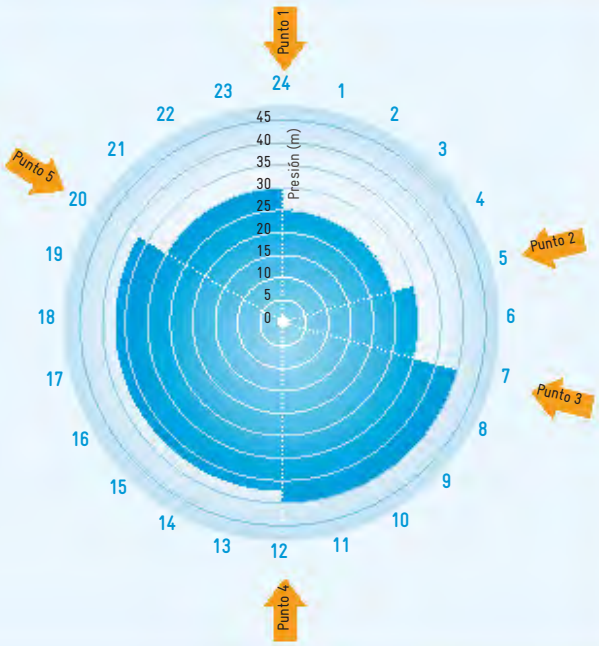
(b) Tipo de modulación

Modulación de la presión de salida fija – Una válvula reductora de presión (VRP) de salida fija establece la presión corriente abajo P_2 al valor deseado. Luego, se actúa continuamente la válvula para mantener esta presión. Se tiene que fijar P_2 de tal manera que el nivel mínimo de servicio siga siendo garantizado en el punto crítico a la demanda máxima. La desventaja de este tipo de modulación es que la presión de la red aumenta durante los períodos de demanda mínima sin poder aplicar eficazmente un control mayor. [8] No obstante, la modulación de presión de salida fija es eficaz para los SGP con bajas pérdidas de carga entre P_2 y P_{PC} y patrones de consumo más bien uniformes sin variaciones significativas diarias o estacionales. [77]

Modulación de la presión basada en el tiempo – La modulación de la presión basada en el tiempo permite fijar una presión corriente abajo P_2 más alta para el día y una presión más baja para la noche cuando se reduce el consumo. Sin embargo, la modulación basada en el tiempo también puede ser más compleja: un patrón de presión con distintos puntos se puede determinar analizando el consumo de agua normal y su relación con la presión en P_{PC}

Figura 6.8 Modulación de la presión basada en el tiempo

Paráme-tros	Tiempo (hh:mm)	Presión (m)
Punto 1	0:00	25
Punto 2	5:00	30
Punto 3	7:00	40
Punto 4	12:00	38
Punto 5	20:00	30



a lo largo de un período. Este patrón de presión indica la presión de salida P_2 deseada en distintos momentos del día. El CLP modulará entonces la VRP de tal manera que la presión corriente abajo P_2 se mantenga hasta el siguiente paso de tiempo. [64] La *Figura 6.8* muestra un ejemplo del concepto de modulación de la presión basada en el tiempo.

Es importante notar que el controlador no puede forzar una VRP a cambiar instantáneamente la presión. En vez de eso la apertura de válvulas se tiene que ajustar al nuevo parámetro suavemente a lo largo de un periodo que usualmente dura varios minutos. [64]

Modulación de la presión basada en el flujo – La modulación de la presión basada en el flujo requiere la instalación de un medidor de flujo en la entrada del SGP que monitoree continuamente el flujo hacia la zona. El controlador de la VRP compara entonces los caudales medidos con la relación específica entre flujo y pérdida de carga del SGP que la empresa de agua debe determinar de antemano. La apertura de la válvula VRP se actúa entonces de acuerdo con esto. La *Figura 6.9 en la página siguiente* ilustra cómo se muestra típicamente una relación tal de flujo/pérdida de carga.

En este ejemplo, los cuatro primeros puntos representan el patrón de flujo normal diario que va de 8 a 19 m^3/h. Para estos caudales, se ha determinado la pérdida de carga entre P_2 y el (P_{PC}) como 0.4 a 14.5 m. La presión de salida de VRP, P_2, se fija ahora a un valor que asegure una presión de servicio mínima en la P_{PC}. La presión de salida P_2 se fija a valores más altos en caso de tasas de flujo excepcionalmente altas, por ejemplo, flujo contra incendios. [64] Cuanto mejor se conozca la relación entre caudal y pérdida de carga, se podrá definir con más precisión los parámetros de VRP para asegurar un control perfecto de la presión del sistema. El *Capítulo 6.4.5* (casos de empleos típicos) explicará las distintas opciones para combinar la ubicación y el tipo de la modulación.

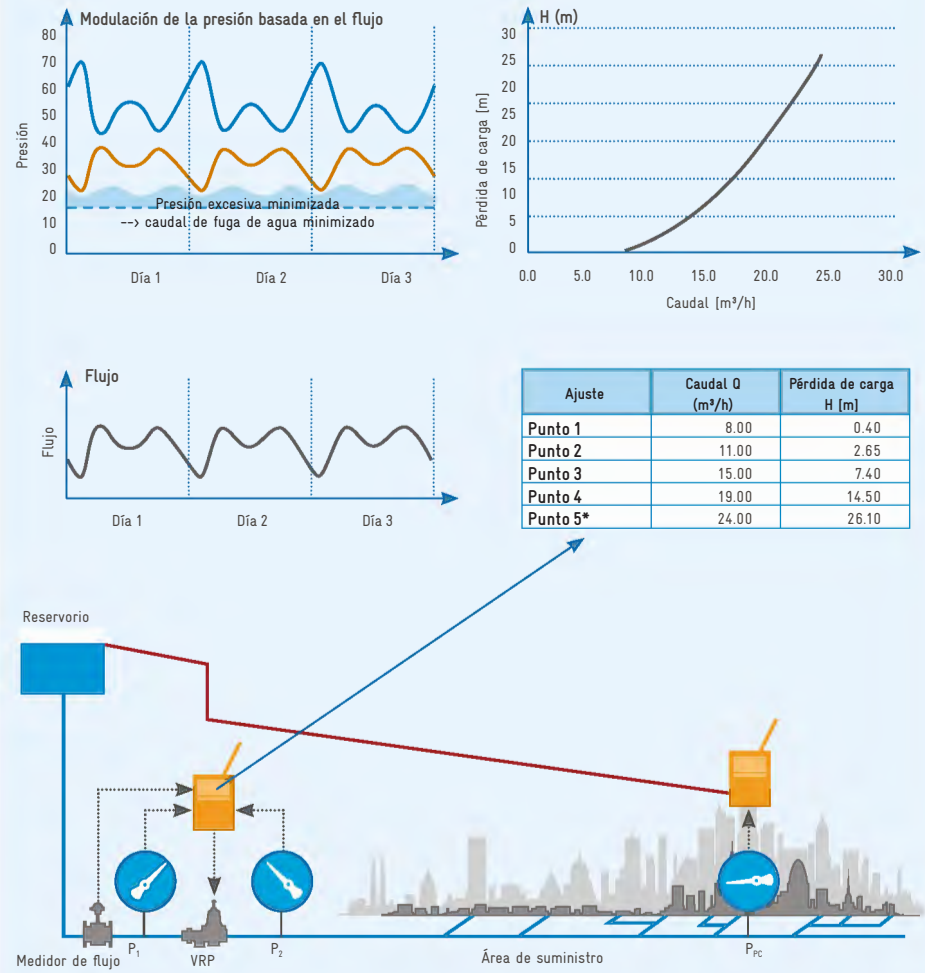
6.4.3 Tipos de válvulas reductora de presión (VRPs)

Los dos tipos más comunes de VRPs en el mercado son las válvulas de diafragma *(Sección a)* y las válvulas de paso anular *(Sección b)*. Esta sección explica la funcionalidad de los distintos tipos de válvula y ejemplifica sus características más importantes, sus ventajas y desventajas para poder determinar qué tipo es el más conveniente para necesidades específicas *(Sección c)*.

(a) Válvulas de diafragma

Las válvulas de diafragma, también llamadas válvulas de membrana, consisten generalmente de una válvula principal operada hidráulicamente y un circuito piloto. Se dispone de distin-

Figura 6.9 Modulación de la presión basada en el flujo



Ajuste	Caudal Q (m³/h)	Pérdida de carga H [m]
Punto 1	8.00	0.40
Punto 2	11.00	2.65
Punto 3	15.00	7.40
Punto 4	19.00	14.50
Punto 5*	24.00	26.10

P_1: Presión aguas arriba de VRP
P_2: Presión aguas abajo de VRP
P_{PC}: Presión en punto crítico
P_{min}: Min. service Presión
Présion excesiva
Q: Flujo

* relación de caudal - pérdida de carga por condiciones de incendio

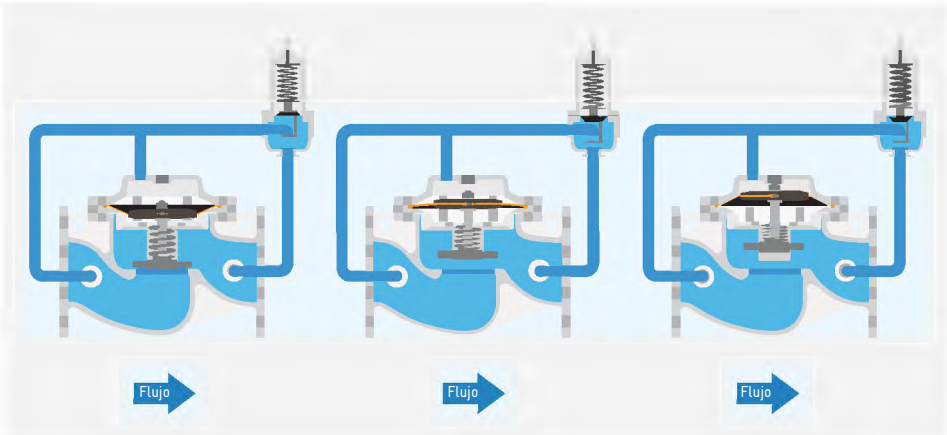
tos subtipos de válvulas de diafragma como la esférica, la Y o las válvulas sellantes directas, que varían en forma, características del flujo y mecanismo del actuador.

La válvula principal consiste de tres partes principales: el cuerpo, la cubierta y el diafragma. El ensamblaje del diafragma es la única parte movible en la válvula principal. El diafragma, usualmente de caucho sintético, está fijado entre el cuerpo y la cubierta para separar la presión de control desde la presión de la línea.

Cuando se reduce la abertura del orificio de la válvula piloto, se fuerza más agua dentro del espacio entre la cubierta y el diafragma y la válvula se modula a su posición cerrada y viceversa. La presión de salida de la válvula se puede ajustar simplemente girando un tornillo en la válvula piloto hasta que se alcance la presión fija deseada. Hasta el momento la VRP ha sido operada hidráulicamente y no se ha requerido ni baterías ni suministro de energía externo.

Se tiene que instalar un CLP de baterías si se supone que una válvula de diafragma deba operarse por modulación basada en el tiempo o en el flujo. El patrón de control exacto se determina por una tabla de valores, que estipula la presión de salida deseada para un momento específico del día o para un flujo determinado. Entonces el CLP acciona la válvula solenoide miniatura sobre los tubos del circuito piloto. Esta acción transfiere pequeñas cantidades de agua alrededor del circuito piloto, alterando la presión en el actuador de la válvula piloto y cambiando de esa manera la posición del diafragma hasta que se alcance la presión deseada en la salida. [64] La *Figura 6.10* muestra la funcionalidad de una válvula de diafragma.

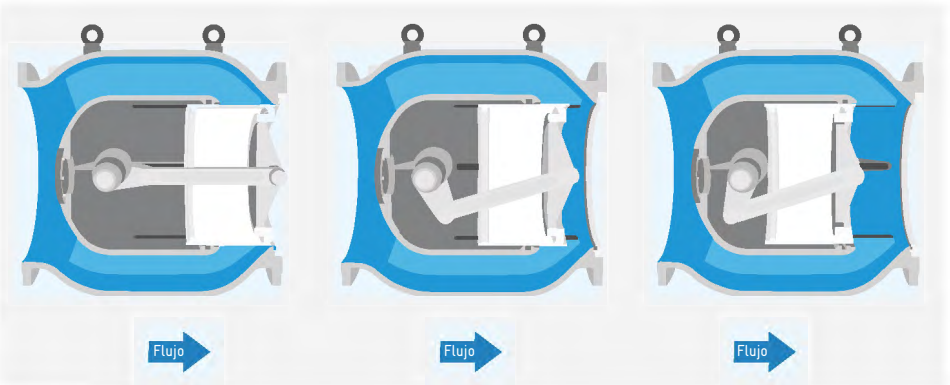
Figura 6.10 Funcionalidad de una válvula de diafragma: cerrada (izquierda), abierta al 50% (centro) y completamente abierta (derecha) (Fuente: VAG Armaturen)



(b) Válvulas de paso anular

Las válvulas de paso anular, también conocidas como válvulas de pistón o válvulas de aguja, son igualmente convenientes para reducir y controlar presiones y tasas de flujo de manera segura y confiable. A diferencia de las válvulas de diafragma accionadas hidráulicamente, las válvulas de paso anular requieren actuadores externos que se energizan de manera manual, neumática o eléctrica. Las presiones y las tasas de flujo se controlan variando la sección transversal interna de la válvula. Por lo tanto, las válvulas de paso anular consisten usualmente del cuerpo de la válvula y de un émbolo que se desliza y está guiado axialmente. El movimiento lineal del émbolo resulta de la conversión del movimiento rotatorio del actuador externo. Esto asegura una sección transversal simétrica en forma de anillo en cada posición, tal como lo ilustra la *Figura 6.11*.

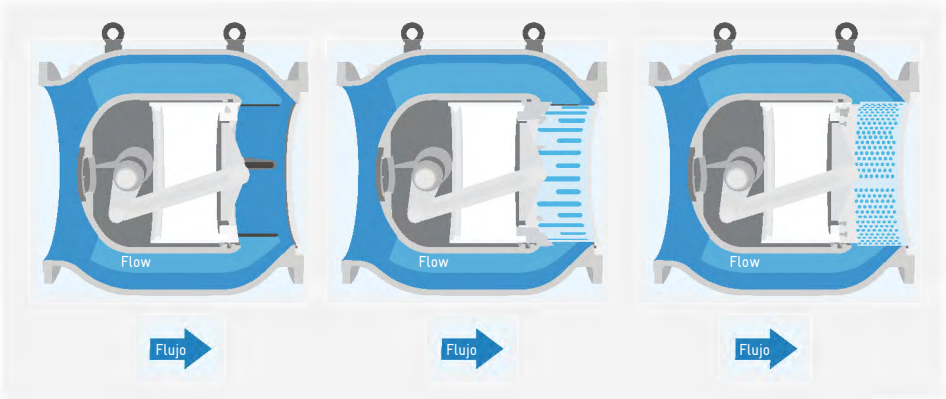
Figura 6.11 Funcionalidad de una válvula de paso anular: cerrada (izquierda), abierta al 50% (centro) y completamente abierta (derecha) (Fuente: VAG Armaturen)



Se utilizan distintos cilindros montados en el émbolo y distintas secciones de salida para adaptar la válvula de paso anular óptimamente a su uso deseado. Los cilindros dividen el flujo en chorros individuales de agua que chocan entre sí corriente abajo del émbolo en la línea central del tubo para disipar la energía sin riesgo de cavitación. La *Figura 6.12* ilustra ejemplos de varios cilindros y su función.

Tal como se mencionó anteriormente, un actuador externo pone en movimiento la válvula de paso anular. La presión deseada corriente abajo de la VRP (P_2 o P_{PC}) se fija como el valor nominal de proceso. Luego, los sensores de presión en P_2 o P_{PC} reportan la presión real al controlador de posición de la válvula que determina si el actuador tiene que abrir o cerrar la válvula para proporcionar la presión deseada. Un margen de tolerancia evita la apertura y cierre permanente de la válvula.

Figura 6.12 Sin cilindro (izquierda),cilindro ranurado (centro) para aplicaciones estándar y cilindro de orificios múltiples (derecha) para grandes diferencias de presión (Fuente: VAG Armaturen)



(c) Comparación entre las válvulas de diafragma y de paso anular

Esta sección presenta las diferencias entre las válvulas de paso anular y de diafragma, sus respectivas ventajas y desventajas, así como distintos aspectos que deben considerarse cuando se elige un tipo de válvula.

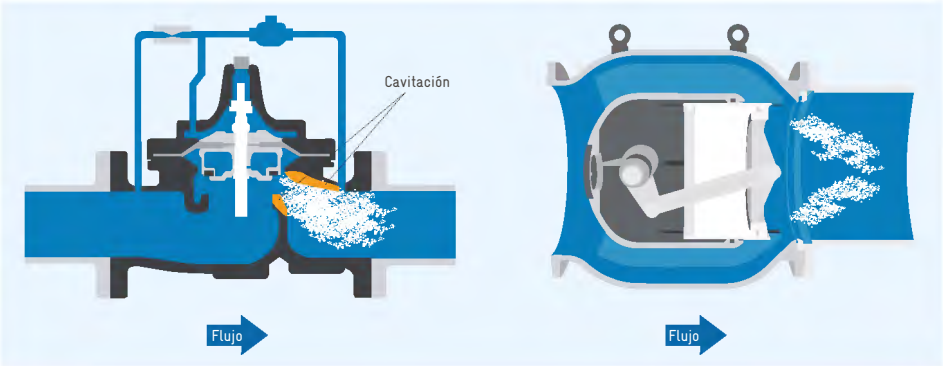
Comportamiento de cavitación – El proceso dinámico de la formación e implosión de cavidades en fluidos se conoce como cavitación. Puede ocurrir cavitación cuando las altas velocidades de flujo reducen la presión hidrostática local por debajo de un valor crítico que corresponde a la presión de vapor del fluido. En consecuencia, se forman pequeñas burbujas de gas que colapsan cuando llegan a zonas de alta presión. La implosión de las burbujas crea altos picos de presión local que pueden alcanzar varios miles de bar. [90] Esto puede causar graves problemas como mucho ruido, fuertes vibraciones, flujo desacelerado, erosión o incluso destrucción total de la válvula o del tubo afectado.

Las válvulas de control son particularmente susceptibles a la cavitación. La presión puede caer a valores críticos en la sección transversal reducida de la constricción debido a la mayor velocidad de flujo. Detrás de la constricción, la presión sube nuevamente y las burbujas de gas colapsan. La superficie de la pared del tubo en esta área puede quedar gravemente dañada por el impacto del chorro de agua que la golpea y por la onda de choque que proviene de las burbujas que implosionan.

En las válvulas de paso anular, la sección transversal en forma de anillo permite un perfil de flujo simétrico y que el chorro de agua se ubique corriente abajo de la constricción en el centro del tubo. Esto permite un intercambio intensivo de impulsos con el agua alrededor

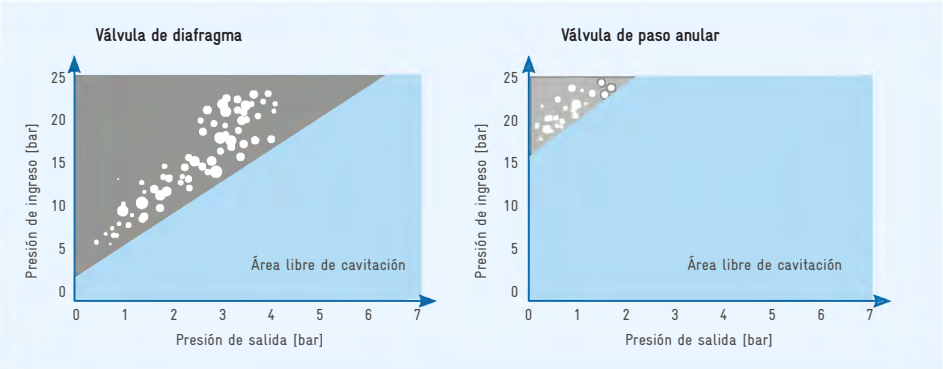
y también protege las paredes del tubo porque las burbujas de gas se concentran en el centro del tubo, tal como se ilustra en la *Figura 6.13*.

Figura 6.13 Características de flujo y cavitación en válvulas de diafragma (izquierda) y en válvulas de paso anular (derecha)



El riesgo de cavitación en las válvulas de paso anular se puede minimizar utilizando cilindros adecuados, incluso en el caso de diferencias significativas entre la presión de ingreso y la presión de salida. En contraste, las válvulas de diafragma están limitadas a presiones diferenciales relativamente pequeñas, tal como se ilustra en los diagramas de la *Figura 6.14*. Consecuentemente, las válvulas de paso anular facilitan mayores reducciones de la presión. [73] Se puede conectar dos válvulas en serie si se tiene que usar válvulas de diafragma para distintas presiones diferenciales altas.

Figura 6.14 El comportamiento de cavitación de una válvula de diafragma (izquierda) y de una válvula de paso anular (derecha)



Se tiene que considerar el riesgo de cavitación en sistemas con presión corriente arriba alta y con grandes diferenciales de presión (sobre 3 : 1 como regla general para $P_1 : P_2$). El riesgo de cavitación usualmente es insignificante en el caso de presiones corriente arriba menores a 25 m. [29]

Características de regulación y precisión del control – La ganancia de válvula de una VRP debe considerarse para asegurar estabilidad de la regulación de la presión para un amplio rango de tasas de flujo. La ganancia de la válvula es la pendiente de la curva característica de la válvula y se define como la proporción del cambio en el flujo al cambio en el trayecto de la válvula. Las características de flujo típicas de las válvulas de control se pueden clasificar en (a) apertura rápida, (b) lineal y (c) porcentaje igual, tal como se ilustra en la *Figura 6.15 en la página siguiente*.

Las válvulas de diafragma normalmente se abren de manera rápida y ofrecen una ganancia de válvula muy grande en condiciones de flujo bajas. Los pequeños trayectos de la válvula causan así grandes incrementos en el flujo al inicio de la apertura de la válvula, tal como se muestra en la *Figura 6.15*. Por lo tanto, las válvulas de diafragma pueden estar sujetas a inestabilidad en condiciones de flujo bajas. Estas inestabilidades de regulación pueden causar oscilación y fluctuaciones de presión no deseadas dentro del sistema. [29]

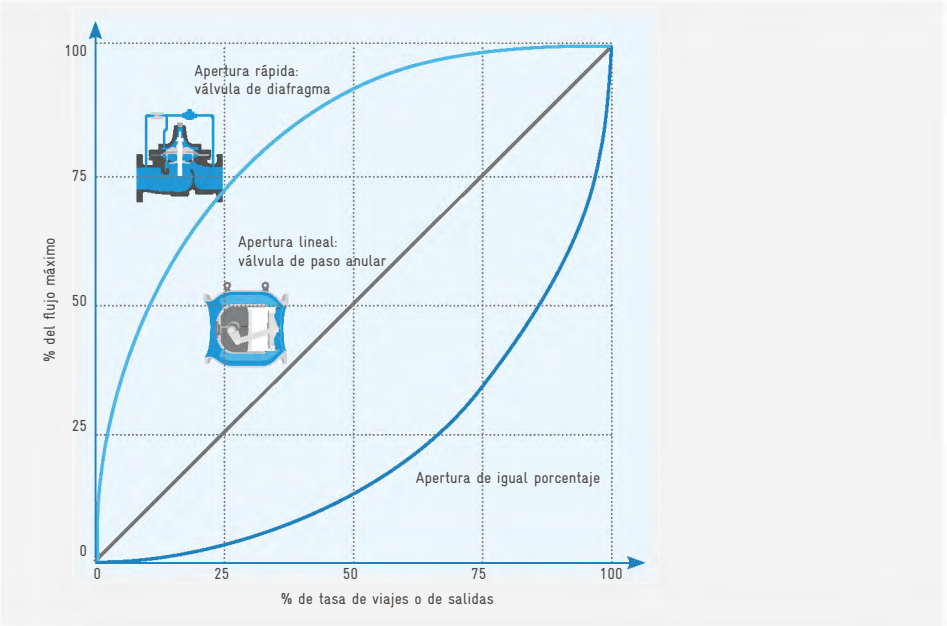
Las válvulas de paso anular tienen características de control casi lineales debido a su carrera más grande, tal como se puede ver en la *Figura 6.15*.

Por esta razón, las válvulas de paso anular demuestran características de regulación muy precisas incluso en caudales bajos y están menos sujetas a la oscilación. En la práctica esto significa que es posible una adaptación más precisa a las condiciones de presión a través de todo el espectro de flujo.

Suministro de energía – La ventaja más grande de las válvulas de diafragma es que se operan hidráulicamente y por lo tanto no requieren ninguna fuente de energía auxiliar. Las válvulas de paso anular, por otro lado, se activan por actuadores neumáticos o eléctricos. Por lo tanto, las válvulas de diafragma pueden ser más convenientes para ubicaciones remotas sin acceso al suministro de energía.

Pérdida de carga – Las VRPs y su equipo (por ejemplo medidores de flujo, válvulas de aislamiento, filtro, pieza de desmantelamiento etc.) siempre generan una pérdida de carga local incluso cuando están completamente abiertas. La pérdida de carga en posición completamente abierta es usualmente menor que para las válvulas de paso anular, dependiendo del cilindro utilizado: sin un cilindro especial las válvulas de paso anular usualmente tienen coeficientes de pérdida de carga ζ que van de 1,0 a 2,0, en comparación con 3,0 a 8,0 para los cilindros ranurados. Las válvulas de diafragma usualmente tienen coeficientes de pérdida de carga ζ entre 5,0 y 6,0.

Figura 6.15 Características de regulación de las válvulas de diafragma y de paso anular



Las pérdidas de presión bajas y los caudales altos en posición completamente abierta son especialmente importantes durante las condiciones de flujo contra incendios y en sistemas en donde la presión corriente arriba de P_1 puede caer a valores cercanos a la presión requerida durante el flujo pico. Sin embargo, siempre debe recordarse que el objetivo principal de VRP es reducir la presión. Consecuentemente, la pérdida de carga no debería considerarse normalmente como un criterio de selección clave. [29]

Requisitos de mantenimiento – En general, todos los tipos de VRPs deben chequearse y mantenerse a intervalos regulares para asegurar su funcionalidad y modo de operación óptimo. El DVGW recomienda realizar las inspecciones y el mantenimiento listados en la *Tabla 6.1* a intervalos de un año.

Mientras que las válvulas de paso anular requieren poco mantenimiento especial, las válvulas de diafragma necesitan más atención. Los pequeños diámetros del circuito de control significan que las partículas, arena o incrustaciones pueden obstruir estos tubos, alterar las características de control y eventualmente bloquear la válvula. Las válvulas de

Tabla 6.1 Inspecciones anuales y medidas de mantenimiento para VRP [13]

Inspecciones	Medidas de mantenimiento
→ daños y corrosión → funcionalidad de la VRP → hermeticidad externa → ningún flujo cuando la válvula está completamente cerrada → colocación correcta de la presión de salida	→ limpieza → protección contra la corrosión → lubricación de las partes externas móviles
Si se aplica:	
→ libre pasaje de colador y circuito de control → funcionalidad y precisión de los manómetros	

diafragma entonces necesitan más trabajo de mantenimiento; especialmente cuando la calidad del agua es baja: el colador en la trampa de tierra de la línea troncal así como el colador en el filtro del circuito de control se deben verificar y limpiar cada tres a cuatro meses. Además, se recomienda reemplazar el diafragma de jebe y todos los sellos cada cinco años.

Inversión y costos del ciclo de vida total – Aparte de los costos de inversión para una VRP, tienen que considerarse los costos de ciclo de vida total (por operación y mantenimiento, mano de obra y repuestos). Generalmente las válvulas de diafragma implican una inversión inicial menor que las válvulas de paso anular. Además del costo de la válvula misma, las instalaciones necesarias y las precauciones de suministro de energía son factores importantes en el costo de válvulas de paso anular.

Sin embargo, las válvulas de paso anular pueden ser la solución más económica para grandes diámetros (mayores de DN 400) en casos donde se tiene que instalar dos válvulas de diafragma en paralelo para manejar el rango de flujos. Lo mismo aplica para diferenciales de alta presión donde las válvulas de diafragma a veces se tienen que instalar en serie.

En términos de los costos del ciclo de vida total, las válvulas de diafragma usualmente tienen necesidades de mantenimiento mayores (reemplazo de sellos desgastados, verificación y limpieza de filtros, etc.) mientras que las válvulas de paso anular requerirán una cierta cantidad de energía para el actuador eléctrico de la válvula.

Por otro lado, las válvulas de paso anular ofrecen más flexibilidad a las demandas cambiantes porque la sección transversal en forma de anillo ofrece una curva de control lineal sobre un amplio rango de tasas de flujo. Los cilindros intercambiables también ayudan a adaptar la válvula a las condiciones cambiantes, mientras que en general las válvulas de diafragma se tienen que sustituir completamente.

Material suplementario 6.2

Mantenimiento de VRP

6.4.4 Tipos de sectores de gestión de la presión

Se puede clasificar los sectores de gestión de la presión (SGP) en tres categorías dependiendo de la condición y configuración local, así como de diferentes posibilidades de ingreso de agua. Además, se puede hacer una distinción entre micro y macro SGP dependiendo de la longitud de la red y el número de conexiones domiciliarias dentro del SGP.

(a) SGP de ingreso único

Un tubo de ingreso único abastece esta área de agua ya sea en un tubo ramal desde una troncal o en un tubo alimentado por gravedad detrás de un reservorio. El SGP se separa de las redes vecinas cerrando válvulas de aislamiento. Se puede desarrollar un SGP mejorando un DHM existente *(ver Capítulo 6.3)*.

(b) SGP de múltiples entradas

Un sistema de regulación para dos o más entradas en el SGP requiere cálculos más complejos para garantizar presión constante en el punto crítico. Son posibles distintos procesos. Por ejemplo, se puede tomar una decisión de mantener una entrada en posición constante y sólo regular la segunda válvula. El diseño y la implementación de un SGP de entrada única siempre requieren ingeniería más detallada que un SGP de ingreso único. Se recomienda el uso de un modelo hidráulico.

(c) SGP dinámico

Los SGP dinámicos son el tipo más evolucionado de tecnología de gestión de la presión: se puede cambiar tanto la ubicación del punto crítico como la ubicación del límite y el número de los ingresos en el SGP para ajustar el sistema óptimamente y cumplir con los requisitos reales.

(d) Micro y macro SGP

Además, se puede hacer una diferenciación entre sectores de gestión de la presión macro y micro: un SGP micro usualmente consiste en una zona de distribución independiente donde se controla la presión en uno o varios puntos de ingreso. Un macro SGP consiste de una VRP en un tubo de transmisión que abastece varias redes de distribución o micro SGP.

6.4.5 Planeamiento y diseño

Esta sección presenta diferentes casos de empleo para las instalaciones de gestión de la presión, explica pasos típicos de la implementación del proyecto y demuestra cómo se instala normalmente las válvulas de paso anular y las válvulas de diafragma. Los diferentes concep-

tos de modulación de la *Capítulo 6.4.2* se pueden combinar con tipos de válvulas diferentes y diseños de sectores de gestión de la presión (por ejemplo, modulación de presión de punto local + tipo de salida fija + válvula de diafragma + SGP de ingreso único). Esto llevaría a más de 12 posibles casos de empleos diferentes. Sin embargo, en la práctica se aplica los siguientes casos de empleo típicos.

(a) Casos de empleo típicos

Estos casos de empleo proveerán guía para encontrar la solución más conveniente en distintas condiciones de límite. Los *casos de empleo 1-5* son para SGP de ingreso único y los *casos 6 y 7* para SGP con más de un ingreso.

- **Caso de empleo 1:** Modulación del punto local, válvula de diafragma con presión de salida fija. Esta es la solución de gestión de presión más básica y conveniente para área sin suministro de energía (lugares remotos) o con frecuentes fallas de energía. La instalación de válvulas de diafragma con presión de salida fija es relativamente barata y ofrece rápida recuperación de la inversión. Se debe utilizar en áreas con mala información o con información poco confiable, los clientes y los componentes del balance hídrico. Puede ser el primer paso en establecer un SGP y siempre debe estar acompañado del monitoreo de la presión y el flujo para comprender mejor la red. Se debe prever mejoras futuras hacia soluciones más avanzadas.
- **Caso de empleo 2:** Modulación del punto local, válvula de diafragma con modulación de tiempo o de flujo. Este caso de empleo combina la modulación de punto local con la modulación basada en el tiempo o en el flujo. Por ejemplo, se reducirá la presión en la noche o de acuerdo a una relación predefinida entre la tasa de presión y la tasa de flujo. Este segundo caso de empleo también es conveniente para áreas con información de fondo mala o poco confiable. Se recomienda medir la presión de ingreso P_1 y la tasa de flujo durante un mínimo de tres meses representativos antes de la implementación del proyecto. Es necesario el suministro de energía (batería) para el controlador de la VRP, pero el sistema también trabaja con suministro intermitente o inseguro de energía. La presión diferencial entre P_1 y P_2 no debe ser muy alta para evitar los problemas de cavitación. El control de la presión sigue siendo básico pero normalmente produce ya mejores resultados que el *caso de empleo 1*.
- **Caso de empleo 3:** Modulación del punto local, válvula de paso anular con modulación basada en el tiempo o en el flujo. Este es el mismo que el *caso de*

empleo 2, pero usa una válvula de paso anular. Las válvulas de paso anular requieren una fuente de energía externa pero permiten un diámetro mayor en el ingreso y una diferencia de presión más alta. Además, los costos de mantenimiento son bajos.

- **Caso de empleo 4:** Modulación de punto crítico, válvula de diafragma con modulación basada en el tiempo o en el flujo. Este caso de empleo requiere comunicación entre un sensor de presión instalado en el punto crítico del SGP y uno en la VRP. La solución más económica es trabajar con la red móvil local de GSM.
- **Caso de empleo 5:** Modulación de punto crítico, válvula de paso anular con modulación basada en el tiempo o en el flujo. Este caso de empleo requiere comunicación entre un sensor de presión instalado en el punto crítico del SGP y uno en la VRP. La solución más económica es trabajar con la red móvil local de GSM. La modulación del punto crítico ofrece mejores opciones para la optimización. Por lo tanto, estos sistemas serán todavía económicos para redes con pérdidas de agua relativamente bajas. Se recomienda un modelo hidráulico del sistema ya que permitirá un diseño óptimo del mismo. En cualquier caso, los datos de estructura de la red, así como la presión de ingreso y las mediciones de flujo son absolutamente necesarios para el dimensionamiento correcto y existe una necesidad de abastecimiento continuo y estable de energía tanto en el punto crítico como en la ubicación de la VRP.
- **Caso de empleo 6:** Ingreso múltiple. Este caso considera SGP con más de un ingreso. Todos los componentes de la *Figura 6.5 en la página 157* se pueden aplicar de acuerdo con la información hidráulica.
- **Caso de empleo 7:** Ingreso múltiple, DHM dinámico. Este caso de empleo incluye un punto crítico dinámico. El punto crítico puede variar en la ubicación a lo largo del día y una distribución óptima del agua requiere control inteligente. Son imprescindibles un modelo hidráulico y los datos de consumo y se recomienda tener un sistema SCADA en el caso de sistemas con ingresos múltiples. Esta es una solución cara, pero ofrece posibilidades significativas de optimización. Se puede lograr resultados económicos incluso con pérdidas de agua bajas a medianas.

El cuadro de flujos de la *Figura 6.16* ilustra el proceso de selección de la solución de gestión de presión más conveniente para una red o una zona de distribución.

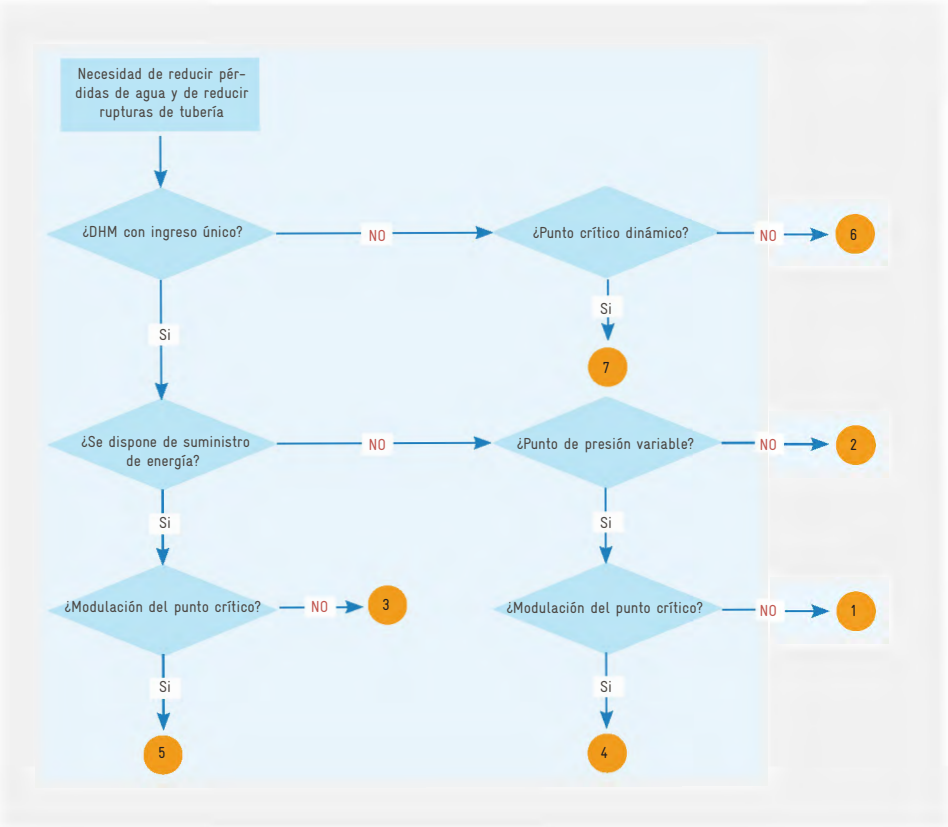
(b) Etapas típicas de la implementación del proyecto

Un proyecto típico de gestión de la presión se compone normalmente de los pasos que se muestran en la *Figura 6.17 en la página siguiente*. Sin embargo, las condiciones locales pueden requerir tareas adicionales no mencionadas aquí o quizás no sean necesarios todos los pasos dependiendo del caso de empleo (por ejemplo, modelación hidráulica del sistema).

Estudio de factibilidad

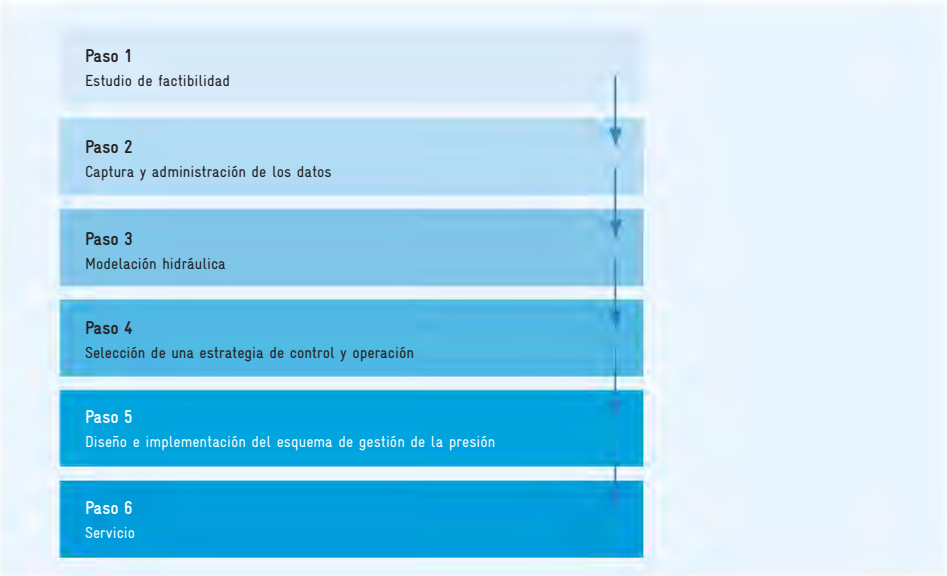
Este paso implica una evolución inicial que involucra un estudio de la factibilidad y los beneficios financieros de implementar un proyecto y comprende las medidas siguientes:

Figura 6.16 Cuadro de flujo para apoyar la decisión en los siete casos de empleo típicos



- identificación de un distrito hidrométrico (DHM)
- cálculo del rendimiento sobre la inversión (ROI)
- análisis de infraestructura local y recursos.

Figura 6.17 Los distintos pasos para la implementación de un proyecto de gestión de la presión



Recolección y manejo de datos

La recolección y manejo de datos a veces puede tomar tiempo dependiendo de las condiciones locales. Sin embargo, son necesarios para determinar la opción más conveniente y para optimizar más aun el sistema. El manejo de datos será beneficioso incluso si la empresa de agua no adopta un programa de gestión de la presión ya que permite a la empresa tener un mejor conocimiento y comprensión de su red.

- Recolección de datos
  (por ejemplo, datos de presión, flujo, consumo, tubos y válvulas)
- estructuración y preparación de los datos
- posible compra de datos adicionales (datos SIG, etc.)
- verificación y plausibilidad de los datos disponibles.

Modelación hidráulica
La modelación hidráulica es necesaria para comprender el comportamiento existente y futuro de la red. Este modelo ayudará a identificar las áreas óptimas de gestión de la presión por medio de simulaciones. Estas simulaciones permiten que se pruebe distintas opciones y que se determine el mejor caso de empleo para la empresa de agua.

- Instalación y calibración del modelo hidráulico
- ejecución de corridas de simulación
- análisis de resultados y determinación de parámetros óptimos de presión.

Selección de una estrategia de control y de operación
Una vez que se ha construido el modelo, se puede probar distintos casos de empleo y se puede simular el impacto de distintos parámetros. Esto permite proponer la mejor solución a la empresa de agua. Se puede utilizar el modelo hidráulico para verificar los siguientes aspectos:

- selección de la mejor estrategia de operación para válvulas y bombas
- simulación de un cambio en el modo operativo
  (desde el suministro de agua intermitente hasta el continuo).

Diseño e implementación de un sistema de gestión de la presión
Este paso incluye dimensionamiento, fabricación e instalación del esquema de gestión de presión y toma en cuenta cuestiones técnicas y de ingeniería. Capacitar al personal e introducir un sistema de monitoreo forman también parte de este paso.

- Dimensionamiento del sistema (válvulas y componentes)
- fabricación y construcción del sistema de gestión de la presión
- instalación de válvulas y unidades de control de la programación
- fijación del sistema de modulación
- realización de intensas pruebas funcionales del sistema
- capacitación in-situ para el equipo operador
- implementación de un sistema de monitoreo (tecnología SCADA).

Servicio
Se debe proveer servicio a largo plazo lo cual involucra soporte técnico así como ulterior optimización del sistema. Generalmente los fabricantes de válvulas ofrecen servicio en

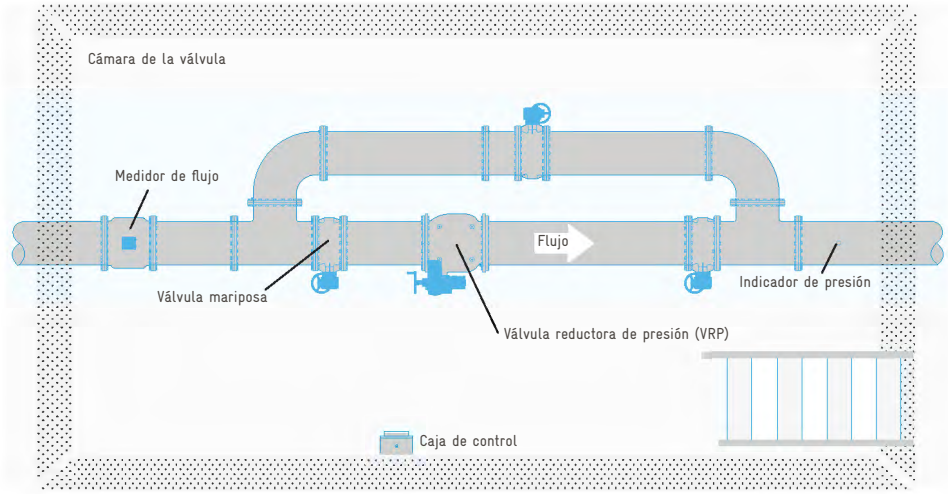
colaboración con las empresas de agua. Esto implica soporte técnico y solución de problemas, monitoreo en línea (remoto) o in-situ, análisis de datos del sistema así como volver a calibrar el sistema en el caso de cambios en las condiciones de límite.

(c) Instalación del sistema de gestión de la presión

Generalmente se tiene que instalar una cámara de válvulas subterránea en el punto de ingreso de la zona de distribución seleccionada para instalar el sistema de gestión de la presión. La cámara se debe poder drenar y tiene que proveer suficiente espacio para la instalación, operación y mantenimiento del sistema.

Todo el sistema consiste usualmente de una VRP (ya sea una válvula de paso anular o de diafragma), un medidor de flujo, sensores de presión, dos válvulas de aislamiento, una pieza de desmantelamiento y un gabinete de control. Las válvulas de diafragma requieren que se instale un colador con una trampa de tierra corriente arriba de la VRP. Se debe instalar una válvula de aire corriente abajo de la VRP si las troncales corriente abajo son descendentes. Se recomienda la instalación de una válvula de aire corriente arriba de la VRP para las troncales corriente arriba que ascienden o son horizontales. Es aconsejable tener un bypass con una válvula de aislamiento también para mantener el suministro a los clientes durante los trabajos de mantenimiento de la VRP. Se debe usar válvulas de mariposa o de compuerta como válvulas aislantes. La *Figura 6.18* ilustra un diseño general de la cámara de la válvula y un sistema completo incluyendo el bypass.

Figura 6.18 Diseño general de la cámara de la válvula y el sistema de gestión de la presión con una válvula de paso anular y bypass



El medidor de flujo registra continuamente el volumen real de agua que se suministra al área de distribución. El sensor de presión detrás del bypass se usa para registrar la presión real como dato ingresante para la función de reducción de la presión del controlador lógico programable (CLP). El CLP registra, procesa y archiva los datos medidos del sensor que se necesitan para controlar la válvula de paso anular. Reúne información de situación sobre los volúmenes y presiones medidos y sobre el actuador. Opcionalmente se puede transferir todos los datos registrados a la sala de control de la empresa de agua. La válvula de paso anular se acciona por medio de energía DC, AC o por un actuador trifásico dependiendo del suministro de energía local.

Material suplementario 6.3

Implementación del sistema de gestión de la presión

Se puede instalar una segunda VRP en paralelo en caso el rango de flujos sea más alto que la capacidad de una VRP única. Una VRP más grande que opera sola captura flujos dentro de su rango de flujos mínimos y máximos. La válvula más pequeña opera sola en el caso de tasas de flujo más bajas. Si ambas válvulas están operando simultáneamente, la capacidad general es igual a la suma de la tasa de flujo máxima de ambas válvulas. [77]

Se puede instalar dos VRPs en serie si el diferencial de presión requerido causa riesgo de cavitación. En este caso, se reduce la presión en dos pasos y cada válvula opera dentro de un área libre de cavitación. El controlador de la modulación de presión se instala en la válvula corriente abajo. [77] Donde el diferencial de presión es alto, se debe instalar también una VRP en el bypass para mantener el servicio durante el mantenimiento.

6.4.6 Limitaciones de la gestión de la presión

Siempre debe recordarse que la gestión de la presión no es una solución universal, sino un método de reducir la pérdida de agua que debe ser complementado por otras medidas como la detección y reparación de fugas, la gestión de la infraestructura así como la implementación y constante monitoreo de DHMs.

La gestión de la presión no repara ni una sola fuga, pero puede reducir considerablemente las tasas de flujo de las fugas. Este es un importante primer paso que debe aliviar la presión sobre las empresas de agua y alentar medidas adicionales.

No obstante, hay algunos puntos importantes que considerar cuando se implementa gestión de la presión a una red o distrito: incluso si se reduce la presión solamente a un nivel que todavía cumple con las necesidades de los usuarios domésticos y comerciales, algunos aparatos pueden ser afectados como los sistemas instantáneos de agua caliente, los sistemas de rociadores contra incendios o los sistemas de diálisis a domicilio. La instalación de bombas elevadoras de presión en edificios de varios pisos puede ser necesaria para distribuir el agua a los pisos más altos.

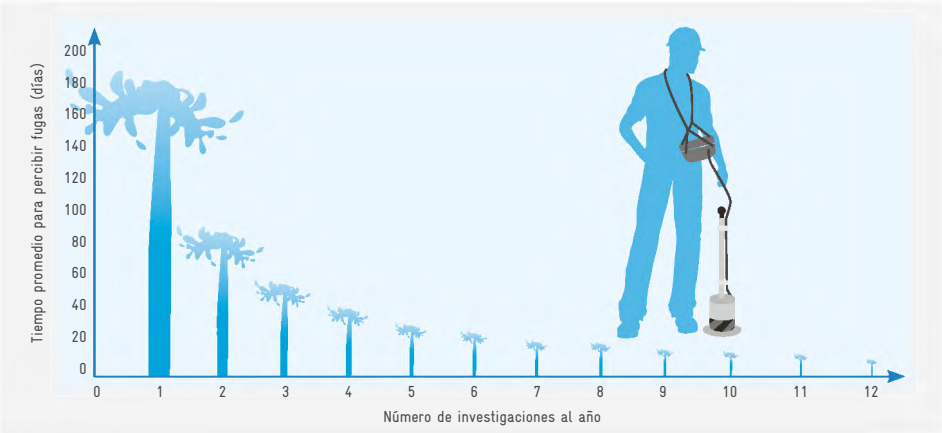
Las necesidades de los bomberos locales son un aspecto importante a considerarse cuando se instala un sistema de reducción de la presión. Los impactos negativos sobre la capacidad de la lucha contra incendios deben evitarse por cualquier medio, ya sea por un bypass de emergencia o usando modulación del flujo. La modulación del flujo permite controlar la presión con un perfil presente relacionado a la relación cambiante entre la pérdida de carga y la tasa de flujo dentro del SGP. En este caso, el controlador incrementa la presión elevando el flujo y esto asegura que la red tenga presión adecuada para la lucha contra incendios. [57]

6.5 Control activo de fugas (CAF)

6.5.1 Definición y propósito del control activo de fugas

El control activo de fugas es un método de intervención para contrarrestar las pérdidas reales de agua en el que una empresa de agua utiliza fondos, personal y equipo técnico para detectar y reparar activamente fugas que actualmente existen bajo tierra pero que no están detectadas. [77] El propósito principal del CAF es reducir el tiempo durante el cual drenan las fugas ocultas para minimizar las pérdidas reales de agua. La *Figura 6.19* muestra cómo las investigaciones regulares influencian el tiempo que toma percibir nuevas fugas en una red de distribución o DHM.

Figura 6.19 Efecto del número de investigaciones sobre el tiempo que toma percibir nuevas fugas, según [58]



El proceso del CAF se puede dividir en tres pasos importantes:

1. Percepción: El monitoreo y análisis continuos de los flujos son esenciales para percibir nuevas fugas en su etapa inicial. Los DHMs y los SGPs proveen una buena oportunidad de monitorear áreas discretas de la red de distribución de agua y facilitar una percepción temprana de fugas incluso pequeñas.

2. Detección de fugas: Este es el proceso de determinar las fugas en un área específica de la red o en una cierta sección de tubo. Las opciones incluyen subdividir los DHMs cerrando temporalmente válvulas (pruebas paso a paso), utilizando registradores de ruidos de fuga o conduciendo investigaciones de sondeo.

3. Ubicación de las fugas: Se dispone de varios métodos acústicos y no acústicos para encontrar las fugas: varas de escucha, micrófonos subterráneos, correlacionadores de ruidos de fugas, radares subterráneos e inyecciones de gas, para nombrar unos cuantos. La detección exhaustiva de fugas es una precondición para los esfuerzos eficientes de ubicación de fugas. La *Figura 6.20* ilustra los tres pasos del control activo de fugas.

Para implementar esfuerzos eficientes de detección y ubicación de fugas es importante asegurar que los trabajadores de detección de fugas estén equipados con mapas exactos y actualizados del sistema y sus componentes. La mayoría de tecnologías de ubicación acústica de fugas depende de la disponibilidad de información precisa sobre el material de los tubos, su diámetro y longitud. La mala información de partida lleva a una ubicación incorrecta de las fugas lo cual resulta en trabajos de excavación engorrosos e innecesarios y que se conocen como huecos secos.

6.5.2 Métodos para la percepción

Se dispone de tres métodos principales para percibir tempranamente nuevas fugas y reducir eficazmente el tiempo de fuga: monitoreo del flujo, monitoreo de la presión y monitoreo del ruido.

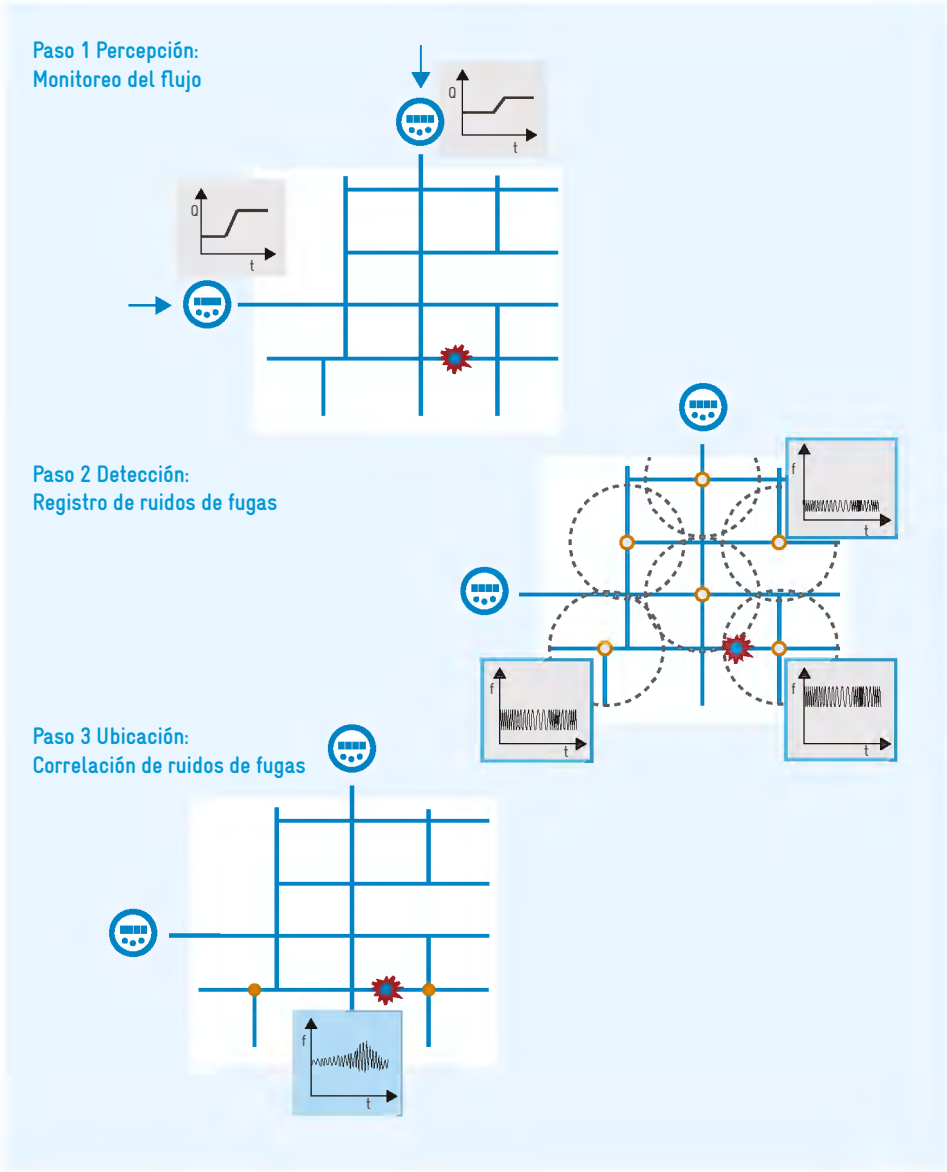
Monitoreo del flujo

Las roturas y estallidos de tubos causan una elevación más o menos abrupta en el caudal que se puede detectar monitoreando constantemente el flujo que ingresa a una red abierta o a un DHM. Con este fin, se debe monitorear continuamente el flujo entrante y por lo menos una hora durante condiciones de flujo nocturno mínimas y se debe comparar a un valor de referencia medido previamente. Si el mayor caudal permanece estable por más de tres días, probablemente el cambio se deba a una fuga y no a un uso excepcional de los clientes. Kober and Gangl [41] describen un nuevo enfoque para establecer un sistema de alerta temprana en base a medidores de flujo ultrasónicos instalados en posiciones hidráulicamente relevantes en una red abierta. De esta manera, se puede monitorear los flujos sin haber implementado previamente un DHM.

Monitoreo de la presión

Las pérdidas de carga en la red también estarán en un mínimo durante el período más bajo de consumo, y la presión general puede alcanzar casi el nivel hidrostático en los sistemas con pocas fugas. Las tasas de flujo con muchas fugas pueden causar velocidades de flujo mayores y reducir la presión. El monitoreo de la presión en una red sólo puede detectar fugas principales porque las tasas de flujo de las fugas pequeñas no reducirán significativamente la presión. Se puede utilizar la información del monitoreo de la presión para priorizar el trabajo: es aconsejable comenzar con los trabajos de detección de fugas en el punto donde se midió la máxima caída de presión.

Figura 6.20 Ejemplo del control activo de fugas en tres pasos: percepción, detección y ubicación de las fugas



Monitoreo del ruido

La descarga de agua desde una fuga produce ondas u oscilaciones acústicas. Estas ondas acústicas se propagan en la columna de agua en cualquier dirección de la fuga y se pueden detectar por registradores de ruidos de fuga que se instalan usualmente en válvulas o grifos. Las ondas acústicas sólo viajan por un rango limitado, dependiendo del material, diámetro, espesor de pared, presión, tierra circundante de los tubos y otros factores. Por lo tanto, se tiene que colocar una cuadrícula relativamente densa de registradores de ruidos de manera temporal o permanente. La ventaja del monitoreo de los ruidos es que se puede implementar y manejar con poco personal porque la instalación es simple y se puede leer los datos gracias a un vehículo que pasa por el lugar. Una desventaja es que la intensidad del ruido no se conecta directamente a la tasa de flujo de la fuga, lo cual hace imposible distinguir las rupturas mayores de las fugas menos importantes.

6.5.3 Métodos de detección de fugas

Una empresa de agua dispone de tres métodos para llegar a las fugas en una cierta área de la red o a una sección de tubo específica: pruebas por pasos, registradores de ruidos de fuga e investigaciones de sondeo.

Pruebas por pasos (*step testing* en inglés)

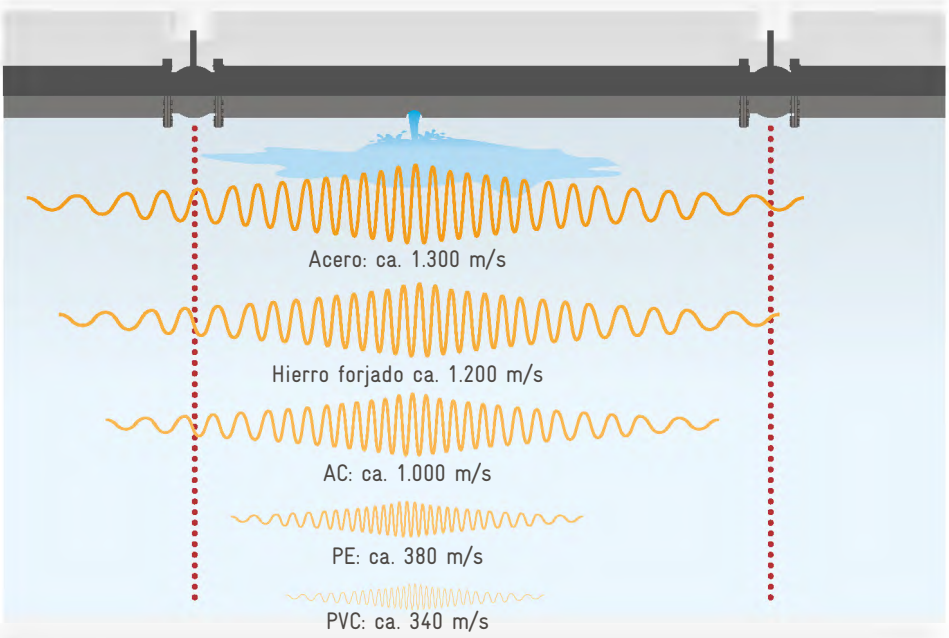
Una vez que se ha identificado una fuga dentro de un DHM o una red abierta por medio de los métodos de percepción descritos anteriormente, se puede subdividir temporalmente la zona en áreas más pequeñas. Se tiene que instalar medidores de flujo en los puntos de ingreso de cada subdivisión para monitorear el flujo ingresante. Ahora se puede reducir sistemáticamente cada subdivisión cerrando válvulas. Una gran caída en la tasa de flujo indica una fuga en la sección que acaba de cerrarse. [22] Se requiere trabajo nocturno porque las pruebas por pasos deben ejecutarse durante condiciones de caudal mínimo nocturno. Adicionalmente, esto involucra normalmente la interrupción del servicio para los clientes.

Registradores de ruidos de fugas

Una vez que se ha identificado una nueva fuga, el equipo de detección de fugas puede colocar registradores de ruidos de fugas en los puntos estratégicos de la red para determinar la ubicación aproximada de la fuga. Los registradores de ruidos de fugas son unidades compactas que consisten en un sensor acústico (acelerómetro) y un registrador de datos programable. [28] Cuando se asigna los registradores se tiene que considerar que los materiales predominantes del tubo influencian significativamente la propagación de ondas de sonido en

una red de distribución de agua *(ver Figura 6.21)*. El rango entre dos registradores de ruido de fuga puede ser de hasta 200 m en redes predominantemente metálicas, mientras que el rango puede reducirse a 80 m en redes que tienen grandes cantidades de tubos de PE y de PVC. El revestimiento interno de concreto también puede debilitar la calidad y propagación de las ondas acústicas. [33]

Figura 6.21 Relación entre el material y la propagación de las ondas acústicas, según [33]



Los registradores de ruidos se pueden dividir en dos grupos: (1) sensores de ruidos que usualmente tiene una base magnética para facilitar su instalación sobre válvulas, grifos y accesorios y (2) hidrófonos que son micrófonos insertados dentro de los tubos para tener contacto directo con el agua y aprovechar una mejor propagación de las ondas acústicas en la columna de agua.

Los registradores de ruidos se pueden programar para monitorear el ruido del sistema entre 2 y 4 am cuando los sonidos que interfieren del ambiente o del consumo están en un mínimo. [77] La fuga estará más cerca al registrador de ruido ahí donde se ha registrado la mayor intensidad de ruido.

Investigaciones de sondeo

Las investigaciones de sondeo incluyen escucha de ruidos de fuga directamente en válvulas, grifos y caños de las conexiones de servicio o en la superficie por encima del alineamiento del tubo. [22] El sondeo se ejecuta usualmente con varas de escucha (varas mecánicas simples o varas amplificadas electrónicamente con un micrófono y audífonos) o micrófonos de tierra.

La investigación de sondeo es un método eficaz pero que toma tiempo porque se tiene que tener acceso prácticamente a cada válvula. Se debe sondear en particular los caños porque una buena porción de las fugas ocurre en las conexiones de servicio. Cuanto más corta sea la distancia entre cada sondeo, mejor serán las posibilidades de recibir incluso ondas acústicas débiles de una fuga. El éxito de las investigaciones acústicas depende a menudo de la experiencia y los oídos entrenados de los trabajadores de detección de ruidos de fugas. [33]

6.5.4 Métodos de ubicación de fugas

Material suplementario 6.4

Métodos de detección y ubicación de fugas

Una vez que el área aproximada de una fuga se ha determinado, se debe utilizar métodos de ubicación de fugas para encontrar la ubicación exacta (± 1 m) de modo que se reduzcan los esfuerzos de excavación. Se puede utilizar varios métodos acústicos por ejemplo las varas de escucha, los micrófonos de tierra y la correlación de ruidos de fuga. Si los métodos acústicos no tienen éxito, también existen varios métodos no acústicos.

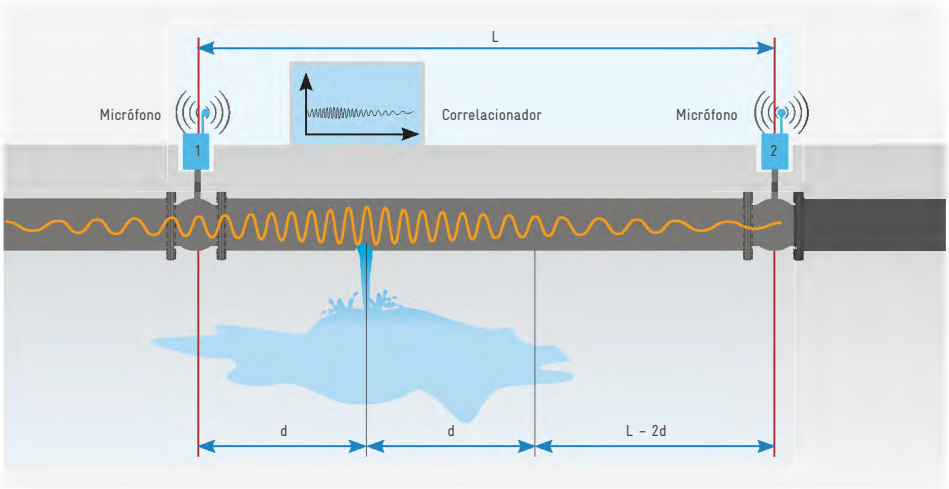
Varas de escucha y micrófonos subterráneos

El agua que fluye de una fuga en condiciones de alta presión causa vibraciones en el tubo y en la tierra circundante. Esta vibración se transmite a lo largo del tubo como ruido proveniente de la estructura y en la tierra circundante como ruido proveniente de la tierra. El contacto directo entre una vara de escucha y el tubo en válvulas o grifos permite escuchar el ruido que proviene de la estructura, siempre y cuando sea suficientemente alto y distinguible del ruido de fondo. La amplificación del ruido con micrófono electro acústico permite detectar ruidos de fugas incluso en redes de PE y PVC con características desfavorables de propagación acústica. Una vez que se identifica la sección de tubo entre dos válvulas donde se ubica la fuga, se debe investigar el alineamiento de los tubos escuchando el ruido proveniente de la tierra por medio del micrófono de tierra. Para este propósito, el micrófono, protegido contra el ruido el tráfico y el viento por una funda aislante se coloca por encima del tubo en la superficie a intervalos de 1 o 2 metros hasta que se identifica la posición exacta de la fuga. [3]

Correlación de ruidos de fuga

La correlación es un método matemático para calcular el retraso entre dos señales emitidas desde la misma fuente. En la práctica, se coloca dos micrófonos a una válvula o grifo en ambos extremos en una sección de tubo. Los micrófonos están equipados con transmisores para transferir los resultados medidos al correlacionador. Las ondas acústicas (señales) emitidas desde una fuga (fuente) en esta sección del tubo viajan a lo largo del tubo y alcanzan los micrófonos luego de un cierto tiempo. La señal alcanzará primero al micrófono ubicado más cerca de la fuga. El correlacionador analiza la estructura del ruido y mide el retraso Δt hasta que se registre un ruido de la misma estructura en el segundo micrófono. El uso de la correlación es así imposible, si la señal es demasiado débil para alcanzar ambos micrófonos. La *Figura 6.22* ilustra la funcionalidad de la correlación de ruidos de fuga.

Figura 6.22 Ilustración esquemática de la funcionalidad de los correlacionadores de ruidos de fuga



Ecuación 6.1

$$d = \frac{L - v \times \Delta t}{2}$$

Donde:

d	[m]	Distancia de la fuga al micrófono 1
L	[m]	Longitud de la sección de tubo
Δt	[s]	Demora temporal
v	[m/s]	Velocidad de propagación de la onda acústica

El correlacionador es capaz de calcular la posición exacta de la fuga por medio de la *Ecuación 6.1 en la página anterior* que considera el retraso Δt entre los dos micrófonos, la longitud de la sección de tubo, así como el diámetro y material del tubo.

Es esencial tener información precisa sobre el material del tubo, su diámetro y longitud, por ejemplo desde el registro de la red para producir resultados correctos para el correlacionador de ruidos de fuga.

Métodos no acústicos

Los métodos descritos anteriormente pueden detectar fugas que producen una cierta cantidad de ruido. Se debe aplicar otros métodos si el agua que emite el ruido no genera un sonido audible, o si las ondas acústicas son absorbidas por el material del tubo.

- **Gas de rastreo:** La sección de tubo a investigarse tiene que salir de servicio y se la debe aislar cerrando válvulas. Luego, se inyecta gas de helio o de hidrógeno en la sección aislada del tubo. El gas que escapa a través de las fugas, sube a la superficie y se puede detectar utilizando detectores de gas. [77]
- **Radar que penetra bajo tierra (RPT):** El RPT es una técnica de reflejos que utiliza ondas electromagnéticas de alta frecuencia para adquirir información subterránea. Las ondas del radar se reflejan por cambios en el material o condiciones subterráneas. De esta manera, se puede identificar las fugas, ya sea encontrando vacíos subterráneos creados por la emisión de agua o detectando cambios anómalos en las propiedades del material circundante debido a la saturación de agua. [19]

Los métodos no acústicos de ubicación de fugas como el gas de rastreo requieren generalmente personal muy capacitado y también implican mayor esfuerzo. No obstante, puede ser una alternativa viable a los métodos acústicos en redes que tienen muy baja presión, suministro intermitente o para ubicar fugas de fondo difíciles de encontrar.

6.6 Reparación de fugas

6.6.1 Propósito

Tal como se describió en el *Capítulo 3*, el tiempo general en que ocurre una fuga va desde la percepción hasta la ubicación y la reparación *(ver Figura 3.2 en la página 51)*. Los tiempos de fuga largos generarán grandes cantidades de pérdidas de agua, incluso desde fugas relativamente pequeñas. Por lo tanto, las empresas de agua siempre deben tratar de reducir los tiempos de percepción, ubicación y reparación hasta un mínimo económico. El *Capítulo 6.5* describió distintos métodos para minimizar el tiempo de percepción y ubicación para las nuevas fugas. Este capítulo resaltará la importancia de realizar reparaciones de fugas rápidas y seguras de modo que se reduzcan las pérdidas de agua.

6.6.2 Cuestiones organizativas y procedimientos operativos

Normalmente varios departamentos de una empresa de agua participan en el proceso de reparar las fugas, por ejemplo el equipo de servicio al cliente (recibe quejas de los clientes y emite órdenes de trabajo), la sala de control (observa un mayor consumo en una zona y pide a la cuadrilla de detección y reparación de fugas que actúe), el departamento de almacenamiento (mantiene los materiales de reparación en stock y ordena los suministros) y la cuadrilla misma de reparación de fugas. Es importante que se organice eficientemente los procesos operativos entre todos los departamentos involucrados y que estén bien documentados. [16] Se debe priorizar la reparación de fugas de acuerdo con el tamaño de las fugas y considerando la seguridad del suministro a lo largo del sistema.

Es importante que el personal de reparación de fugas esté bien capacitado, motivado y equipado con todo el equipo, vehículos, aparatos de comunicaciones y equipo de seguridad necesarios. El número de cuadrillas de reparación debe ser apropiado al número de fugas y estallidos que debe repararse en determinado tiempo meta.

El departamento de almacenes debe asegurarse de tener en inventario los repuestos que se utilizan más frecuentemente y determinar qué tiempos de entrega no son tolerables. El análisis de bases de datos de fallas y tasas de fallas puede ayudar a identificar los tipos de tubos y válvulas que tienden a dañarse *(ver Capítulo 5.7)*.

La política de la empresa de agua también tiene una fuerte influencia sobre la velocidad y calidad de las reparaciones. Los tiempos de las reparaciones se pueden reducir fijando metas de desempeño respecto a cuán rápido se debe reparar la ruptura de una troncal, la fuga de una conexión de servicio o una válvula defectuosa. Respecto a las conexiones de servicio,

usualmente el obligar a los clientes a reparar o reemplazar cualquier parte de propiedad privada de la conexión del servicio hasta el contador del cliente es muy ineficiente y causa grandes pérdidas de agua. En muchos casos será más eficiente que una empresa de agua ofrezca una reparación o reemplazo gratuito o subsidiado sin pasivos, lo cual puede ser cubierto por un pequeño honorario adicional que se cobra con la tarifa de agua del cliente. [77]

6.6.3 Ejecución de trabajos de reparación

La calidad de las reparaciones de fugas desempeña un papel significativo en el proceso general de manejo de fugas. [77] Los malos materiales, la necesidad de improvisación y la mala calidad de la mano de obra hacen que sea probable que ocurran nuevas fugas en el mismo lugar. Por lo tanto, las reparaciones de fugas las deben ejecutar trabajadores calificados y bien capacitados. A menudo las reparaciones tienen que realizarse bajo presión de tiempo. No obstante, se debe evitar un ritmo frenético y se debe cumplir con las reglas de seguridad siempre:

- equipo de seguridad adecuado para todo el personal
- seguridad estructural del pozo de excavación
- señalización y desvíos del tráfico
- iluminación para trabajos nocturnos
- bomba de sumidero para permitir un lugar de trabajo seco
- información a todos los clientes afectados. [74]

En general, los métodos óptimos de reparación varían dependiendo del tipo de fuga. Las rajaduras en circunferencia se pueden reparar con abrazaderas de reparación de fugas. Se dispone de abrazaderas flexibles si los extremos de los tubos están desalineados. Las rajaduras longitudinales generalmente son demasiado grandes para las abrazaderas de reparación. En este caso, se tiene que cambiar secciones enteras de tubo. Las fugas de punto causadas por la corrosión o la perforación también se pueden reparar por medio de abrazaderas de reparación. Si hay muchas picaduras en una sección de tubo se puede considerar el cambio del tubo. Las fugas de las uniones entre tubos normalmente se detienen desmantelando y reemplazando la empaquetadura de jebe. Se debe reemplazar las válvulas defectuosas y accesorios y quizás se pueden reparar en el taller de la empresa. [3] En caso de conexiones de servicio, usualmente es más razonable reemplazar que reparar las conexiones defectuosas.

Cada reparación se debe medir, documentar y se debe definir su posición exacta, por ejemplo por medio de receptores manuales de GPS. Se debe transferir los datos a la base de datos de fallas para su análisis estadístico y visualización gráfica en el SIG, lo cual puede ayudar a mejorar los procesos de mantenimiento y reparación de la empresa de agua.

6.7 Gestión de la infraestructura

6.7.1 Revisión general

Es indispensable la gestión de la infraestructura y los activos desde una perspectiva de reducción de pérdidas de agua. La meta es satisfacer el nivel requerido de servicio de la manera más económica creando, adquiriendo, manteniendo, operando, rehabilitando y descartando activos para las empresas de agua, presentes y futuras, que opten por las soluciones de reducción de pérdidas de agua.

La gestión de la infraestructura también es una integración sistemática de técnicas de manejo avanzadas y sostenibles en un paradigma de manejo o manera de pensar donde el foco principal es el ciclo de vida a largo plazo del activo y su desempeño sostenido, más que los aspectos de corto plazo y del día a día. Los sistemas de suministro de agua necesitan manejo de infraestructura para:

- resolver los problemas causados por activos de infraestructura de agua que están envejeciendo, antes de que fallen
- mantener los activos productivos y no permitirles convertirse en pasivos que interrumpan el servicio
- tratar todas las decisiones como decisiones de inversión para maximizar los recursos financieros limitados
- hacer los costos transparentes para apoyar las decisiones financieras. [87]

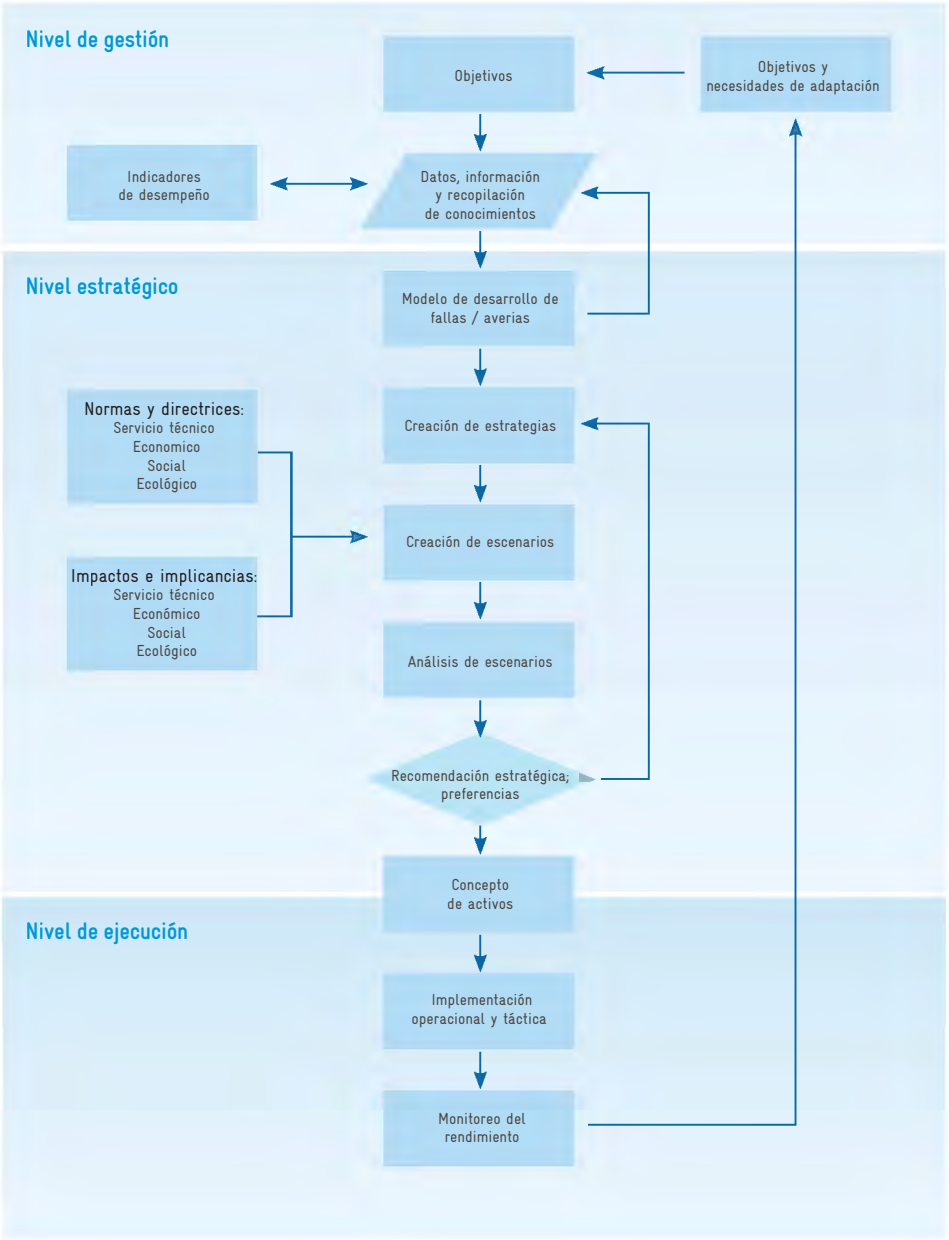
La *Figura 6.23 en la página siguiente* esboza un flujograma para el manejo de activos a niveles de gerencia, estratégico y de ejecución. Es un proceso continuo que tiene por objetivo mejorar el desempeño en el corto, mediano y largo plazo.

La vida de la infraestructura se prolonga implementando gestión de la presión. Reducir la presión en la tubería no solamente ahorra agua reduciendo pérdidas reales sino que reduce las nuevas roturas de tubos, incrementa la vida de los activos y difiere los reemplazos de tubos.

6.7.2 Factores que contribuyen al deterioro de la infraestructura de la empresa

Se espera que un tipo de tubo que funciona inicialmente falle luego de un cierto periodo de operación. Tres factores contribuyen básicamente hacia un desempeño reducido de la infraestructura:

Figura 6.23 Flujograma para el manejo de activos de infraestructura



- deterioro
- envejecimiento del material
- deterioro funcional.

Además del proceso natural de deterioro, se puede acelerar el envejecimiento del material por falta de mantenimiento *(ver figura a continuación)*. El mantenimiento también involucra características del material, las condiciones de tendido y lecho en la tierra y el ciclo de inspección y aseguramiento de la calidad.

El entorno físico también tiene que especificarse en relación con el envejecimiento del material (envejecimiento sustancial). Por un lado, el tubo sufre esfuerzos internos en base al tipo de operación, la presión máxima y transitoria y posibles movimientos de la tierra. Por otro lado hay menos puntos de oscilación, como la carga de hielo, carga de tráfico e influencia de terceros debido a obras civiles.

El tercer punto del envejecimiento del material se relaciona con las características de la red de abastecimiento. Estas tienen antecedentes naturales como una intrusión y/o permeado de películas biológicas y contaminantes.

También se puede expresar el deterioro funcional por medio del envejecimiento inmaterial no sustancial. Esto incluye cambios en la capacidad de la red hidráulica debido a cambios demográficos o a elevación de los estándares. También se debe considerar los cambios legales que pueden influenciar el deterioro funcional.

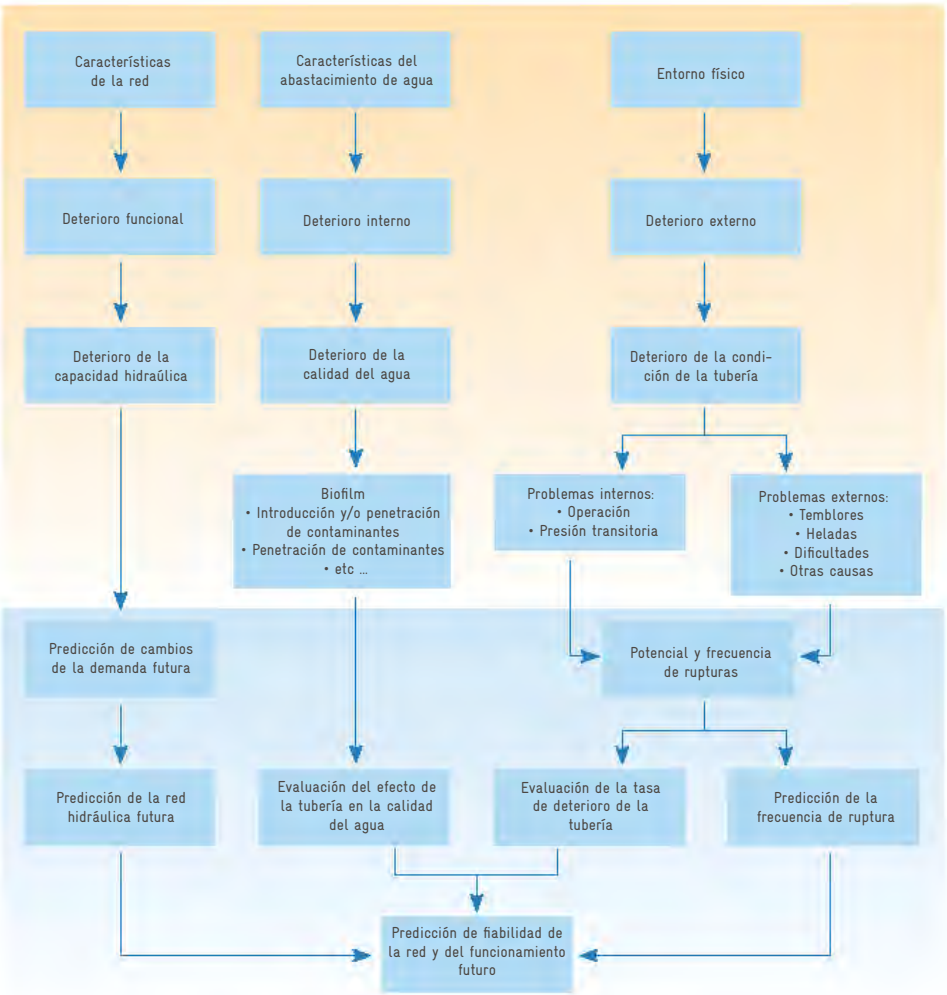
6.7.3 Recolección y organización de información sobre los activos

Es esencial recolectar y organizar la información descriptiva sobre los activos para adquirir conocimiento de la infraestructura. Esto incluye:

- edad, tamaño, materiales de construcción, ubicación e instalación
- una evaluación de la condición de los activos
- información clave sobre historia de operación, mantenimiento y reparación
- la vida útil esperada y remanente de los activos
- presión operativa
- valor de los activos incluyendo costo histórico, valor depreciado y costo de reemplazo.

Los datos recolectados se tienen que verificar para determinar su plausibilidad respecto de su consistencia formal, lógica y temporal. El siguiente paso es determinar identificadores únicos que describan un proceso de agrupación.

Figura 6.24 Factores y mecanismos que alimentan el proceso de toma de decisiones



6.7.4 Análisis de datos

Este paso sigue al proceso de recolección y organización de los datos e implica un análisis en base a indicadores específicos. Estos indicadores son la vida de servicio y el riesgo de falla y apoyan el proceso de evaluación de riesgo y el análisis del costo del ciclo de vida.

Se puede definir la vida de servicio como el tiempo entre la instalación del tubo y su reemplazo y se clasifica por medio de las siguientes características:

- **Técnico/servicio:** El periodo sobre el cual se mantiene una propiedad para un propósito o nivel de servicio particular.
- **Operación usual:** Vida de servicio que debe esperarse según condiciones normales de mantenimiento y operación local.
- **Económica:** El periodo durante el cual el valor neto anual equivalente está en su mínimo.
- **Depreciación:** El periodo durante el cual se deprecia la inversión en los libros contables.
- **Residual:** Vida de servicio remanente de tubos en operación respecto de la condición de su material y de los esfuerzos de mantenimiento definidos. [31]

Tal como se menciona anteriormente, el segundo indicador es el riesgo de falla, el cual se puede subdividir de la manera siguiente:

- **Riesgos exógenos:** El riesgo de falla que se origina de factores que están totalmente fuera del control de la gerencia de la empresa.
- **Riesgos operativos:** Un tipo de falla que existe en condiciones operativas normales cuando los sistemas de la empresa no reciben presiones externamente o anormalmente.
- **Riesgos de suministro:** Una falla que se produce como falta de suministro de agua no potable en comparación con la demanda. [10]

El proceso de evaluación de riesgo analiza la disposición que tienen los proveedores de agua de asumir el riesgo y puede cambiar debido a aspectos locales y culturales.

Se debe realizar un análisis del costo del ciclo de vida como paso final de análisis de datos. La meta es determinar una asignación de costo real por kilómetro tomando en cuenta los aspectos de centralización y descentralización de la red de suministro instalada.

6.7.5 Integración de datos y toma de decisiones

El proceso de integración de datos se clasifica en distintas categorías:

1. Mantenibilidad

La mantenibilidad es la probabilidad de que un sistema o componente que ha fallado sea restaurado o reparado a una condición específica dentro de un periodo. Se puede separar en:

- Mantenimiento reactivo, que se realiza en respuesta a clausuras no planificadas o programadas de una unidad, usualmente como resultado de una falla.
- Mantenimiento preventivo, que es una clausura programada, usualmente periódica con un conjunto de tareas bien definido, como inspección y reparación, reemplazo, limpieza, etc.
- Mantenimiento predictivo, que estima cuándo una parte está cercana a la falla y se debe reparar o reemplazar a través de herramientas y mediciones de diagnóstico y por lo tanto elimina presumiblemente mantenimiento no programado más costoso.
- Mantenimiento proactivo sólo se debe realizar cuando se requiere y en la medida en que sea económico. El mantenimiento proactivo generalmente se asume como menos costoso que el mantenimiento reactivo. [84]

2. Indicadores de desempeño

Los indicadores de desempeño (basados en especificaciones de la IWA) facilitan el análisis y comparación continuos. El objetivo es describir los recursos utilizados (por ejemplo, costo de reparaciones/km) o las condiciones (por ejemplo, número de fallas/km), para comparar sub-áreas o redes enteras y estimar los beneficios de una rehabilitación o programa de gestión de la presión. Es importante distinguir entre calcular reparaciones de las troncales (por 100 km/año) y de los servicios (por 1.000 conexiones/año). Además, se puede clasificar las reparaciones de acuerdo con su tipo y ubicación.

3. Confiabilidad del suministro de agua

La integración de la confiabilidad del suministro de agua ayuda a identificar los puntos más vulnerables en un sistema de suministro de agua y sus tubos. También evalúa la importancia relativa de cada tubo en términos de confiabilidad hidráulica y se basa en el archivo de datos de ingreso del modelo de simulación hidráulica.

4. Confiabilidad general

El análisis de confiabilidad por sí mismo incorpora los datos de supervivencia, la curva de supervivencia, un modelo de fallas, un planeamiento de rehabilitación de largo plazo y un planeamiento de rehabilitación anual.

El modelo de fallas, por ejemplo predice la probabilidad de fallas de tubos y agrupa los tubos que muestran comportamiento similar.

El planeamiento de la rehabilitación de largo plazo explora las necesidades de inversión y las consecuencias para la rehabilitación futura y define la estrategia óptima de rehabil-

itación. También permite predecir el comportamiento de la red en el largo plazo para predefinir los escenarios de rehabilitación. Se basa en la distribución de vida de servicio esperada para cada grupo de materiales y proporciona un presupuesto global en apoyo al plan estratégico de rehabilitación.

El planeamiento anual de rehabilitaciones selecciona los proyectos de rehabilitación más económicos para una programación anual de la rehabilitación que tome en cuenta varios criterios.

Material suplementario 6.5

Agrupamiento

5. Activos

Como se mencionó anteriormente la integración de la información sobre los activos se clasifica en estado de los activos actual y crítico. Esto se puede determinar haciendo las preguntas apropiadas sobre la red y es esencial para la toma de decisiones ulterior.

6. Costo social de las fallas

El costo social de las fallas tiene un gran impacto y se tiene que considerar en esta etapa de integración de datos y toma de decisiones. Los costos directamente incurridos por la empresa son:

- costos administrativos y legales de los daños
- costos de seguridad pública
- costos de reparación y retorno al servicio
- costos de mitigación de caídas del servicio
- costos de respuesta de emergencia de la empresa. [10]

Debe considerarse los efectos en los patrones de rutina, como el impedimento al acceso y los costos de retraso de los trayectos y cierre del servicio al cliente hasta los costos de sustitución. Los puntos siguientes generalmente tienen bajos niveles de incidencia, pero un alto impacto:

- daño a la salud
- daño directo al punto de falla
- enfermedades provenientes del agua introducidas como resultado de la falla
- daños a la propiedad.

Los puntos mencionados anteriormente (del 1 al 6) contribuyen al proceso de toma de decisiones.

6.8 Resumen y pasos siguientes

Los contenidos del *Capítulo 6* de este manual técnico permitirán al lector:

- ☑ Comprender cómo distintas estrategias de mantenimiento (pasivo, reactivo o pro-activo) influencian la condición de la red de distribución y el nivel de fuga.
- ☑ Diseñar, implementar y operar DHM para monitorear flujos y reducir el tiempo durante el cual el agua fuga.
- ☑ Conocer los principios de la gestión de la presión y sus impactos en los flujos de fuga.
- ☑ Comprender los distintos conceptos de modulación y las características de diferentes tipos de VRPs y sus respectivas ventajas y desventajas.
- ☑ Seleccionar el caso de empleo óptimo para una aplicación específica de gestión de la presión.
- ☑ Ejecutar las etapas típicas del proyecto para diseñar, implementar y operar sistemas de gestión de la presión.
- ☑ Emplear métodos para la percepción, detección y ubicación de fugas en una red de distribución de agua.
- ☑ Comprender los beneficios de la gestión de la infraestructura para asegurar la funcionalidad de las redes y reducir las pérdidas.

Los estudios de casos presentados en el Capítulo siguiente demuestran como se puede poner a la práctica el conjunto de los métodos y técnicas con el objetivo de reducir efectivamente las pérdidas de agua.

6

Foto: © C. Behlert, 2010

Estudios de caso 7

Foto: © J. Baader, 2008

Control del actuador por la VRP

Presentación en el centro de capacitación de SEDAPAL, Lima, Perú

Foto: © E. Oertlé, 2010

Cámara de válvulas con medidor de flujo

Foto: © J. Baader, 2010

7.1 Módulos de capacitación en GP – El ejemplo de Lima, Perú

Título del proyecto	Reducción de pérdidas de agua en las áreas marginales de Lima
Nombre de las áreas	Comas (Sector S86) y Breña (Sector S25), Lima, Perú
Agua no facturada (ANF)	37,5% (SEDAPAL, 2008)
Período/situación del proyecto	2008 - 2010

7.1.1 Antecedentes

El agua potable es un recurso escaso en el Perú, particularmente su capital Lima, que está situada en una región desértica de la costa peruana. La contaminación ambiental y los insuficientes recursos de agua agravan la provisión de agua potable adecuada. Adicionalmente, el sistema de suministro de agua registra pérdidas reales de agua de hasta el 50% del agua alimentada en la red debido a tubos que fugan y mantenimiento insuficiente.

SEDAPAL, una empresa de propiedad estatal, está a cargo de proporcionar a los distritos de Lima y Callao servicios municipales de agua potable y desagüe y es un actor clave en el sector de agua y saneamiento peruano.

7.1.2 Desarrollo del proceso – El enfoque del centro de capacitación

Se ha identificado la gestión de la presión (GP) como una solución eficiente para reducir las pérdidas de agua en Lima y Callao. Además de la instalación técnica de tecnología de GP, el objetivo de este proyecto es mejorar la capacidad gerencial y operativa de las empresas en cuestión.

Generalmente, es importante capacitar a los profesionales locales sobre cómo operar sistemas de GP para que puedan aprender cómo mantener los componentes técnicos y cómo medir por sí mismos los beneficios de una inversión así. Se ha preparado materiales técnicos y educativos para el personal. Además, los técnicos locales en el centro de capacitación de servicio de SEDAPAL han recibido instrucción. Más aún, se ha redactado un memorándum de entendimiento entre SEDAPAL, la asociación nacional de empresas del sector agua y saneamiento (ANEPSSA), así como la red para mejorar las capacidades en el sector de agua y saneamiento (SFCS) para asegurar una transferencia sostenible del conocimiento sobre GP a nivel nacional. Según este acuerdo, el centro de capacitación de SEDAPAL se integrará a la red de SFCS y el personal de las empresas en todo el Perú se capacitará en la gestión y operación técnica de GP. La instalación de la tecnología y la capacitación del personal de SEDAPAL en dos áreas piloto de Lima sirven como un ejemplo de buenas prácticas.

La idea es que se tenga capacitaciones hechas a la medida para distintos grupos objetivo en el futuro:

1. División de gestión y planeamiento:

- → planeamiento y diseño a largo plazo
- → financiación de la instalación de GP
- → beneficios económicos, ambientales y sociales.

2. Personal operativo:

- → instrucciones técnicas en GP
- → mantenimiento y operación de la tecnología de GP
- → gestión electrónica
- → GP como parte del sistema de suministro de agua y saneamiento.

7.1.3 Logros e impactos

Se ha conseguido los siguientes logros e impactos:

- se ha adquirido experiencia y conocimiento a lo largo del proyecto, la que se ha documentado con precisión y se ha puesto a disposición de los centros y redes de capacitación locales y nacionales
- desarrollo de módulos de capacitación en GP (en español)
- desarrollo de capacidades para el personal a través de sesiones y seminarios de capacitación
- enfoque de capacitación de instructores en el centro de capacitación de SEDAPAL
- módulos de capacitación de GP integrados a la red nacional de SFCS
- se dispone de resultados y experiencias del proyecto para l as empresas de agua en todo el Perú
- existe potencial para aplicar el proyecto
- el proyecto contribuye al desarrollo del sector peruano de agua y saneamiento
- desarrollo de un modelo financiero para garantizar la difusión e implementación futuras de GP dentro del país.

7.1.4 Lecciones aprendidas

Dentro del marco de este proyecto, fue importante construir estructuras y redes tanto nacionales como locales para llegar a las empresas de agua y su personal en todo el país. Se estimulará una comprensión de las soluciones de GP en los sistemas locales de suministro de agua gracias a la sesiones de capacitación sobre tecnología de GP utilizando los módulos de capacitación de la empresa de agua y saneamiento. Sin embargo, esto permite que las empresas de agua aprendan sobre tecnología de GP y consideren si existe el potencial para replicar las medidas de GP dentro de su propio sistema.

7.1.5 Referencias

- Página web de FSC, *www.vivienda.gob.pe*, visitada en julio de 2010.
- Página web de SEDAPAL, *www.sedapal.com.pe*, visitada en julio de 2010.

Fotos páginas 196 + 197 derecha: © B.Itzicovitch, 2005

Instalación de una válvula reductora de presión (VRP)

Area de proyecto

Instalación de una válvula reductora de presión (VRP)

7.2 Reducción de las pérdidas de agua por gestión de la presión – El ejemplo de Santo Amaro, Brasil

Título del proyecto	Gestión Sostenible del Agua y los Recursos Naturales en Sao Paulo
Nombre de las áreas	Santo Amaro, São Paulo, Brasil
Habitantes	36.000
Conexiones de servicio	8.895
Longitud de los tubos de distribución	83 km
Pérdidas de agua **01/2005 – 09/2005** **10/2005 – 01/2006** **02/2006 – 06/2006**	 301.702 m3/mes 203.947 m3/ mes 178.039 m³/ mes
Periodo/situación del proyecto	Marzo 2004 – Junio 2006

7.2.1 Antecedentes

El consumo de agua se está incrementando continuamente en el área metropolitana de Sao Paulo. Hoy en día la empresa de agua de propiedad estatal Compañía de Saneamiento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) enfrenta el desafío de satisfacer la demanda de más de 17 millones de habitantes y asegurar un suministro constante y suficiente de agua potable en cantidades adecuadas. A pesar de la alta calidad del servicio proporcionada por SABESP, a veces ocurren periodos de suministro rotativo debido a la falta de recursos durante un periodo seco. Una razón de la falta de abastecimiento de agua es el alto volumen de pérdidas de agua que ocurren durante la operación debido a las fugas en puntos críticos como troncales y accesorios.

7.2.2 Desarrollo del proceso

Se instaló un sitio piloto en el distrito de Santo Amaro, que consiste en un sistema de reducción de pérdidas de agua de última generación que incluye válvulas de regulación de la presión, paneles de control, instalaciones de telemetría y el software de soporte. *(Oppinger, 2009)*

Se implementó dos tecnologías: primero modulación basada en el tiempo y segundo modulación basada en nodos remotos (modulación de flujo de punto crítico). Se espera que la modulación de flujo rinda mejores resultados ya que la VRP ajusta continuamente la presión de modo que la presión permanezca tan cerca como sea posible del valor fijado en el punto crítico.

7.2.3 Resultados y buenas prácticas

Los resultados obtenidos con las dos tecnologías instaladas se resumen en la *en la Tabla más adelante*, que muestra ahorros de agua de hasta 41%. Por otro lado, se redujo las nuevas rupturas de tubos en aproximadamente 50%. El proyecto tuvo un tiempo de retorno de inversión de aproximadamente cuatro a cinco meses.

F. Paracampos (SABESP) reportó sus observaciones desde la unidad de negocios central de SABESP en 2007: las frecuencias de rupturas en troncales y servicios eran de alrededor de 10 por km/año en las 180 zonas con gestión de la presión. Sin embargo, las frecuencias de ruptura eran casi el doble en áreas sin gestión de la presión (aproximadamente 19 por km/año).

Tecnología	Periodo	Pérdidas de agua [m3/mes]	Ahorros de agua [%]
Sin GP	01/2005 – 09/2005	301.702	
Modulación basada en el tiempo	10/2005 – 01/2006	203.947	-33%
Modulación basada en nudos remotos	02/2006 – 06/2006	178.039	-41%

Resultados obtenidos en el distrito de Santo Amaro entre Enero de 2005 y Junio de 2006

7.2.4 Lecciones aprendidas

Este sitio piloto ha demostrado que la gestión modulada de la presión reduce significativamente tanto el volumen de agua perdida como la frecuencia de nuevas rupturas de tubos. Para el distrito de Santo Amaro, esto significa una reducción de hasta el 50% en nuevas rupturas de tubos y 30% de volumen disponible adicional de agua, lo cual es suficiente para abastecer a 800 personas más con agua potable. Esto tiene una importancia particular en una metrópolis que crece rápidamente con Sao Paulo.

7.2.5 Referencias

- Oppinger P., *Reducing Water Losses by Pressure Management (Reducción de Pérdidas de Agua por Gestión de la Presión)*. Water & Wastewater International, 2009.
- Thornton, J., y Lambert A. O., *Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs (La gestión de la presión extiende la vida de la infraestructura y reduce costos de energía innecesarios). Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007'*, Bucarest, Rumania, 2007.
- Paracampos, F., Thornton, J. and da Costa e Silva A. C., *SABESP's Innovative and Proactive Approach to Water Loss Control and Demand Management (El Enfoque Innovador y Proactivo de SABESP para el Control de las Pérdidas de Agua y la Gestión de la Demanda). Proceedings of the AWWA Annual Conference and Exposition*, Orlando, Florida, Estados Unidos 2004.
- Paracampos, F., *Curbing demand in Sao Paulo through a successful water efficiency initiative (Control de la demanda en Sao Paulo a través de una iniciativa exitosa de eficiencia en el agua)*. Actas de la Cumbre Global sobre Fugas de Agua, Londres, Reino Unido, 2007.

Ubicación de ls cámara de válvulas en el mapa

Fotos página 200 + 201: © Y. Marinoff, 2009

Cámara de válvulas

7.3 Modelación hidráulica – El ejemplo de Ouagadougou, Burkina Faso

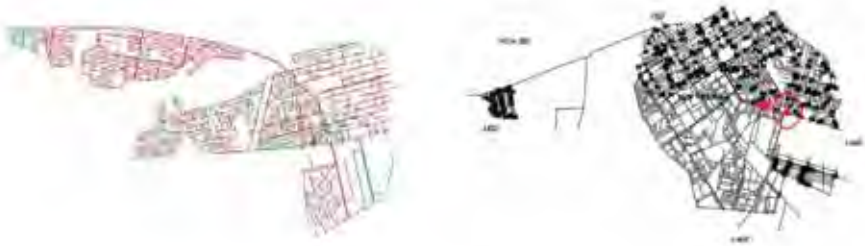
Título del proyecto	Modelación hidráulica en Burkina Faso
Nombre de las áreas	Ouagadougou, áreas de abastecimiento de agua R7 y RE
Pérdidas de Agua **Área de suministro RE** **Área de suministro R7**	 306m³/día 120m³/día
Periodo/situación del proyecto	De Febrero a Noviembre de 2009

7.3.1 Antecedentes

El agua potable es un recurso escaso en Burkina Faso, y grandes partes de la ciudad de Ouagadougou se están expandiendo a las áreas circundantes sin un sistema organizado de abastecimiento de agua cada año. Las áreas de suministro R7 y RE *(ver figura más adelante)* han tenido abastecimiento continuo de agua sin interrupciones desde que se completó el proyecto Ziga en 2006. A pesar de los beneficios de este proyecto, las pérdidas reales de agua se han incrementado desde que el sistema se opera continuamente. Esto se debe al hecho de que los tubos de distribución están produciendo constantemente tasas mayores de flujo de fuga bajo el incremento de la presión. El objetivo de implementar proyectos piloto en las áreas de suministro R7 y RE es reducir las pérdidas reales de agua al 20%.

La Oficina Nacional de Agua y Saneamiento (ONEA) es la autoridad nacional de agua y desagüe y la compañía de agua nacional más grande. La reestructuración inicial ha separado el suministro de agua rural y urbano. Esta reforma tiene como

objetivo hacer que la compañía sea financieramente viable y hacer que las personas de bajos ingresos puedan pagar el acceso al agua y al saneamiento. La introducción de la modelación hidráulica mejoró la eficiencia del costo de mantenimiento y la toma de decisiones en el mediano a largo plazo. Hoy, se considera que la ONEA es una de las compañías mejor manejadas en la región.



Representación SIG de la zona R7 (izquierda) y identificación del punto critico de la zona RE mediante EPANET (derecha)

7.3.2 Desarrollo del proceso – modelación hidráulica

Una meta de la modelación hidráulica es identificar la mejor solución técnica y económica para una red de suministro de agua. Se tiene que entender que el sistema propone alternativas y que se debe optimizar. En el caso presente, la modelación hidráulica fue un paso importante para investigar la posibilidad de instalar un sistema de gestión de la presión que consistía de los siguientes pasos:

Paso 1: Recolección de datos y establecimiento del modelo

- La ONEA suministró su modelo hidráulico existente al proveedor de la solución.
- Actualización del modelo hidráulico en EPANET (herramienta de software para modelizar el EPA de los Estados Unidos) para la red de distribución de agua respecto a los DHMs R7 y RE (diámetros pequeños, curvas internas, tuberías desconectadas, etc.).

Paso 2: Correcciones del modelo

- Verificación de los datos ingresantes y verificación de plausibilidad – consistencia local lógica y temporal de los datos.
- Las inexactitudes que tienen impactos importantes en la calidad de la modelación serán corregidas en coordinación con la ONEA.

Paso 3: Calibración del modelo

- → El proceso de calibración se realizó sobre los modelos corregidos utilizando los patrones de consumo observados durante varios días cuando se realizó mediciones simultáneas de flujo y presión.
- → Se ha considerado la rugosidad del tubo dependiendo del material del tubo y de su edad.
- → Verificación del nivel del reservorio y sus impactos en la modelación.
- → Se introdujo pérdidas menores al modelo.

Paso 4: Selección de válvulas

- → Se ha utilizado el modelo calibrado para corridas de simulación de los DHMs. El análisis de los resultados de simulación se ha utilizado para seleccionar y dimensionar las válvulas apropiadas de reducción de la presión.

7.3.3 Resultados y estrategia

La solución recomendada para un sistema eficiente GP en ambos DHMs (R7 y RE) es el uso de varios ingresos de agua equipados con válvulas reductoras de presión. En ambos casos, se obtiene mejores resultados con válvulas reductoras de presión controladas dinámicamente para bajar la presión excesiva innecesaria durante las horas nocturnas. La *tabla siguiente* muestra resultados de simulación para diversas variantes del modelo:

Reducción de pérdidas de agua [m3/día]		
Alternativa	VRP – control de salida fija	VRP – control de punto crítico
VRP a la salida del reservorio (variante R7-1)	116	120
Creación de tres sectores independientes, cada uno con una VRP en el ingreso (variante R7-2)	51	79
VRP en la salida del reservorio (variante RE-1)	65	231
Una VRP en cada uno de los dos puntos de suministro principales (variante RE-2)	289	305

Comparación de reducción simulada de pérdidas de agua con dos variantes

La alternativa R7-2 se recomienda para el área R7 ya que ofrece mayor flexibilidad para operar el sistema. Se instala tres válvulas en los puntos principales de abastecimiento para cada sub-área recién creada, lo cual ayuda a reducir las posteriores pérdidas por día. El punto que se fija para cada válvula se puede ajustar de acuerdo con las necesidades de cada área.

RE-2 es la opción recomendada para operar el área RE. En esta opción, se instala dos válvulas de DN 300 en los puntos de abastecimiento principales.

7.3.4 Mejores prácticas

En este estudio de caso, los modelos de red hidráulica se utilizaron para diseñar el DHM y seleccionar y dimensionar la VRP. Este proceso requiere que se disponga de datos ingresante confiables sobre la red existente y predicciones respecto del desarrollo de la población, las tendencias del consumo de agua y las medidas planificadas para la rehabilitación y la extensión en la red de suministro de agua analizada.

7.3.5 Lecciones aprendidas

- → Los resultados del modelo son confiables solamente si los datos ingresantes son exactos.
- → La modelación hidráulica permite ahorro de tiempo y de dinero, ya que se puede simular y comparar varias opciones sin necesitar implementación real.
- → La cooperación y comunicación constante con los socios locales es necesaria para tener una idea clara de la situación real del sistema de distribución de agua.
- → La calibración del modelo en base a datos de campañas de medición es esencial para producir resultados confiables.

7.3.6 Desarrollo ulterior/perspectivas futuras

El siguiente paso será instalar el sistema de gestión de la presión en el área R7 y optimizar el sector RE.

7.3.7 Referencias

- S&P Consult, *Reporte Final PPP Burkina Faso*. No publicado, 2009.
- S&P Consult, *Identification of Problems in Water Supply Net Areas RE and R7 (Identificación de Problemas en las áreas RE y R7 de suministro de agua-PPP Burkina Faso)*. No publicado, 2009.
- Página web de VAG – Armaturen GmbH, *www.vag-armaturen.com*, visitada en julio de 2010.
- Página web de la ONEA, *www.burkina.at/ONEA*, visitada en julio de 2010.

Foto: © T. Baier, 2008

Instalación de una válvula de diafragma con bypass

Instalación de válvulas y componentes

7.4 Pérdidas de agua reducidas hasta el 40% – El ejemplo de Ain Al Basha, Jordania

Título de proyecto	Reducción de las pérdidas de agua en Ain Al Basha a través de gestión efectiva de la presión (GP)
Nombre del área	Ain Al Basha, Amman Jordania
Conexiones de servicio	4.098
ANF	47,1% (2005)
Período /situación del proyecto	Enero de 2007 - Julio de 2008 (completado)

7.4.1 Antecedentes

Se estima que Jordania tiene un nivel de agua no facturada (ANF) de más del 50% en 2004. Esto es bastante alarmante dado que se considera que Jordania es uno de los países más áridos del mundo.

La condición del sistema de distribución de agua en Ain Al Basha plantea un gran número de problemas: un porcentaje muy alto de las pérdidas reales de agua consume recursos financieros y naturales considerables y lleva a un suministro limitado de agua para los clientes del servicio. Además, las fuertes variaciones de presión dentro del sistema llevan a nuevas rupturas frecuentes de tubos.

7.4.2 Desarrollo del proceso

El objetivo del proyecto fue reducir las pérdidas reales de agua por medio de métodos eficaces de gestión de la presión e incrementando la capacidad del personal que se

ocupa de la operación de la red. El proyecto se llevó a cabo en cooperación estrecha con la Autoridad del Agua de Jordania (WAJ) y se planteó en dos fases.

Fase I: Instalación técnica de un sistema de gestión de la presión

Se tuvo que emprender al inicio del proyecto un estudio de factibilidad, una documentación, recolección y evaluación exhaustiva de datos. Las distintas partes del equipo se fabricaron, entregaron e instalaron de acuerdo con el plan detallado del proyecto. Se instaló un sistema SCADA y se conectó a la oficina de la WAJ para operar el sistema de GP a plena potencia y monitorear su desempeño continuamente. Este paso permite a los técnicos e ingenieros monitorear y controlar el sistema precisamente en base a datos reales y reaccionar rápidamente a demandas cambiantes.

Fase II: Inculcando el conocimiento de la GP

Una vez que se instaló la tecnología, se emprendió cursos de capacitación e instrucción en el trabajo para permitir al socio local continuar operando el nuevo sistema. Los gerentes e instructores de WAJ asistieron a un curso intensivo de capacitación en Alemania al inicio.

Al mismo tiempo los expertos de VAG ayudaron a mejorar el centro local de capacitación para ingenieros de agua en Amman. La instalación fue equipada con válvulas de capacitación y cuadros murales y se utilizará para enseñar el uso de las válvulas y las válvulas reductoras de presión a 400-600 técnicos e ingenieros al año de manera apropiada. Adicionalmente los instructores jordanos se han capacitado para incorporar sosteniblemente conocimiento de GP dentro de la WAJ. Se empleó mucho tiempo en capacitación práctica y teórica sobre las válvulas. Al final, los instructores tuvieron la oportunidad de practicar lo que habían aprendido.

7.4.3 Buenas prácticas

Las ventajas del proyecto para la WAJ incluyen:

- mayor eficiencia y menores costos del suministro de agua
- menos estallidos de tubos a través de presión controlada y reducida
- un mayor ciclo de vida del sistema de tubos
- reducción de las pérdidas de agua (hasta el 30% de la ANF), esto ahorró agua, la que se utilizó para aumentar/mejorar el suministro de agua
- control de las válvulas por medio del sistema SCADA
- informes de evaluación (día/semana/mes/año)
- desarrollo de capacidades para el personal jordano.

Reducción del caudal mínimo nocturno (a las 2 horas de la madrugada)					
Fecha	Sin control (m³/h)	Fecha	Con control (m³/h)	Reducción del caudal mínimo nocturno (m³/h)	
03.02.2008	55.01	02.03.2008	37.20	-17.81	32%
04.02.2008	55.01	03.03.2008	37.92	-17.09	31%
05.02.2008	62.86	04.03.2008	35.28	-27.58	44%
06.02.2008	49.46	05.03.2008	34.08	-15.38	31%
07.02.2008	51.30	06.03.2008	32.37	-18.93	37%
08.02.2008	56.65	07.03.2008	41.05	-15.59	28%
09.02.2008	47.16	08.03.2008	36.90	-10.27	22%

Resultados obtenidos en el districto de Santo Amaro entre enero 2005 y junio 2006

7.4.4 Lecciones aprendidas

El enfoque del proyecto de no solamente implementar sistemas de GP, sino también de inculcar conocimiento sobre GP dentro de las estructuras del socio local fue exitoso. El WAJ monitorea el sistema de GP a través de tecnología SCADA. Adicionalmente se puede pedir soporte de VAG en cualquier momento por medio del internet. La extensión del centro de capacitación de WAJ para los ingenieros de agua, ofreciendo cursos de GP en Amman, sirve al desarrollo sostenible de capacidades que se subraya aún más por el concepto de *capacitar a los capacitadores*.

7.4.5 Referencias

- Página web de VAG –Armaturen GmbH, *www.vag-armaturen.com*, visitada en julio 2010.
- Página web de la GIZ Jordania, *www.gtz.de/en/weltweit/maghreb-naher-osten/1511.htm*, visitada en julio 2010.
- Página web de Pressure Management, *www.waterlossreduction.com*, visitada en julio 2010.
- Grupo Dorsch, Engicon y sebaKMT, *Effective Leak Detection, repair & maintenance Management in Ain Al Basha district - PPP Jordan (Detección Eficaz de fugas, gestión de la reparación y el mantenimiento en el distrito de Ain Al Basha – PPP Jordania)*. No publicado, 2009.

Foto: © P. Klingel, 2006

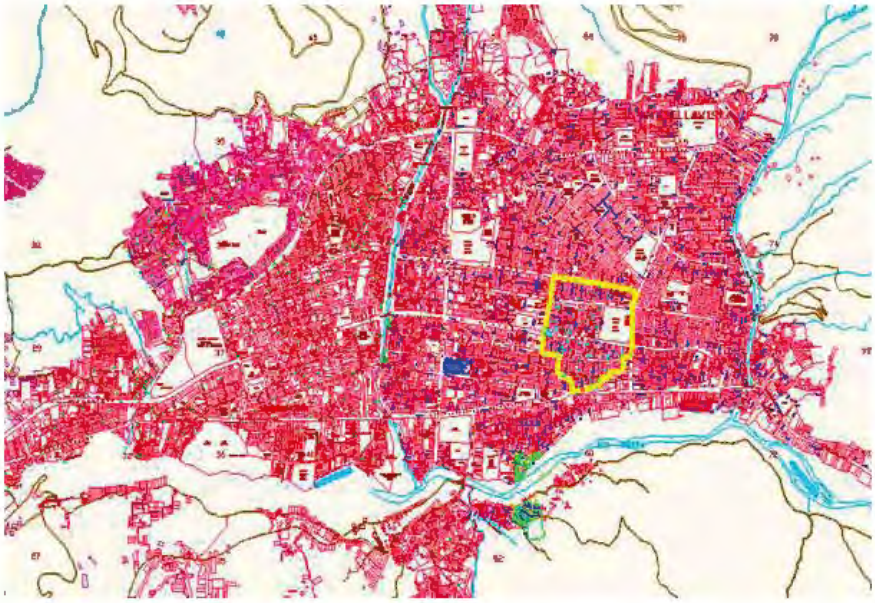
7.5 Reducción de las pérdidas aparentes de agua – El ejemplo de Huaraz, Perú

Título del proyecto	Investigación de pérdidas de agua y mejoramiento de la eficiencia hidráulica en un sector piloto de la ciudad de Huaraz.
Nombre del área	Distrito de Huaraz, provincia de Huaraz, Perú
Habitantes **Conexiones de servicio**	101.430 22.483
Agua no facturada	51,4%
Periodo/situación del proyecto	2008-2010
Referencia	Programa de medidas de rápido impacto (PMRI)

7.5.1 Relevancia

La ciudad de Huaraz con 100.000 habitantes se ubica en el noreste del Perú a una altura de 3.030 metros. Huaraz es una ciudad turística en el callejón de Huaylas rodeada por la cadena de montañas más grande del país. Su agua se genera fundiendo agua de la Cordillera Blanca. La empresa de agua Chavín EPS SA es responsable de administrar la distribución de agua en las provincias de Huaraz, Huaylas, Chiquián y Aija.

El agua no facturada en la empresa de agua es en general de 51,4% y el promedio es más alto que el promedio nacional que es de 42,1%. Además, la ciudad tiene una de las tasas de consumo más altas en el país con un consumo de agua per cápita diario de 388 litros.



Municipio de Huaraz y el área piloto (amarillo)

Estas altas pérdidas se generan por un gran número de problemas incluyendo: mala medición del agua, una gran cantidad de fugas no reportadas, tuberías viejas, técnicas inadecuadas de mantenimiento y una organización mal preparada para resolver estos problemas.

Empresas de Agua	Volumen (m3)	Volumen (m3)	Porcentaje de ANF (%)				
			2009	2008	2007	2006	2005
TOTAL	1.285.370	740.861	42,10	42,30	42,40	43,30	43,90
SEDAPAL	658.748	411.835	38,50	37,50	37,50	39,10	41,10
De gran tamaño	393.050	215.481	43,30	45,20	46,00	46,60	46,40
De tamaño mediano	194.124	99.449	49,70	48,80	49,40	49,60	48,20
De pequeño tamaño	39.446	14.094	53,00	62,00	54,00	53,60	50,50

Agua no facturada en el Perú entre 2005 y 2009. (SUNASS, 2010)

Las metodologías alternativas se probaron dentro de la cooperación que GIZ lleva a cabo con la empresa de agua en un programa de medidas de rápido impacto (PMRI). Estas incluyeron herramientas, como el balance hídrico, el inventario de las pérdidas y la modelación de la red hidráulica para mejorar el desempeño hidráulico de las redes y establecer una metodología sistemática para detectar y controlar las pérdidas de agua.

7.5.2 Desarrollo del proceso

El trabajo consistió en probar una metodología usando la sectorización y la medición como herramientas para determinar y controlar la condición del sistema de suministro:

- Comenzó con la selección de un área piloto que tomaba en cuenta varios criterios, incluyendo la simplicidad del cierre, la alta continuidad, el alto nivel de presión así como diversas categorías de patrones de consumo.
- Se han actualizado los parámetros catastrales, técnicos y comerciales para conducir la modelación de la red y estimar la demanda de agua.
- Se realizó la sectorización aislando el área piloto del resto del sistema. El área piloto se compone 263 conexiones de servicio.
- Se leyó cada medidor instalado para descubrir cuánto de menos se había reportado, lo cual se analizó posteriormente por marca y edad.
- Luego del aislamiento del área piloto con una entrada única, se ha instalado un contador de agua a granel, permitiendo que se registre el consumo horario bruto del sector en periodos de 24 horas y que se determine el balance hídrico en flujos nocturnos mínimos. Además, el monitoreo del nivel de agua del tanque permitió que se adoptara métodos de regulación de la presión.
- Se ha llevado a cabo un inventario de pérdidas permitiendo la identificación de los factores que las causan. Se tomó medidas correctivas, comerciales y operacionales. En las nuevas condiciones, se realizó la modelación hidráulica y se regularon las presiones dentro del sector.
- Finalmente, un nuevo balance hídrico permitió que se midiera los resultados de las medidas adoptadas.

7.5.3 Resultados y buenas prácticas

El balance hídrico inicial mostró un nivel de agua no facturada de 69% en un área donde el 91% de los tubos de cemento de asbestos tenían más de 40 años y 68% de las conexiones habían recibido en promedio una medición hace seis años.

El inventario de pérdidas reveló que el 80% de las pérdidas eran pérdidas aparentes y el 20% remanentes eran pérdidas reales.

Las medidas correctivas incluyeron la instalación de contadores en 121 domicilios, la renovación de sub-medidores y el completamiento de la medición del sector al 100%. Además, se inspeccionó 3.1 km de la red de agua con geófonos acústicos, se detectó diez fugas no reportadas y se las reparó, ocho de las cuales se encontraron en conexiones domiciliarias. También se ha regulado la presión reduciendo la presión pico de 45 a 25 m.

Adicionalmente, se detectó un rebose en el reservorio Batán que suministra el área donde un volumen diario de 405 m3 se había estado desperdiciando. Este rebose se corrigió cambiando el sistema de control.

El balance hídrico final mostró un nivel de agua no facturada de 29%, lo cual demuestra la eficacia de las acciones tomadas.

7.5.4 Lecciones aprendidas

La investigación inicial de la reducción de pérdidas de agua y las mejorías operativas en un área piloto permitieron resultados de corto plazo visibles con niveles de inversión y costos reducidos. Estos resultados llevaron a conclusiones generales que se pueden convertir en estrategias aplicables para todo el sistema.

La combinación de medidas, como la sectorización, la determinación de un balance hídrico y un inventario de pérdidas, permite la identificación de medidas correctivas de largo plazo. Las medidas correctivas operativas (instalación de medidores y detección de fugas) deben resolverse primero. Sin embargo, los resultados no serán sostenibles sin inversiones significativas en la rehabilitación de viejas redes.

7.5.5 Referencia

- Zegarra, B., Ticona E., Alania, G., Vidalon, F. and Rojas, F., *Reducción de pérdidas y modelación hidráulica. El ejemplo de Huaraz, Perú.* No publicado, 2010.
- SUNASS Gerencia de supervisión y Fiscalización, *Las EPS y su desarrollo.* No publicado, 2010.

ntervención distrito hidrométrico gestión de la infraestruc
aso monitoreo gestión de la presión estrategia sostenibilid
cción de fugas indicadores de desempeño impactos econó
hidráulica requisitos básicos agua no facturada sistemas d
fraestructura desarrollo de capacidades reducción de pérd
sostenibilidad estallidos de tubería control activo de fugas
icos balance hídrico pérdidas aparentes reparación de fug
s de información métodos de intervención distrito hidron
ción de pérdidas de agua estudios de caso monitoreo gest
trol activo de fugas pérdidas reales detección de fugas inc

Referencias

ctura desarrollo de capacidades reducción de pérdidas de
ad estallidos de tubería control activo de fugas pérdidas
omicos balance hídrico pérdidas aparentes reparación de
e información métodos de intervención distrito hidromé
idas de agua estudios de caso monitoreo gestión de la pr
pérdidas reales detección de fugas indicadores de desem
as modelación hidráulica requisitos básicos agua no factu
métrico gestión de la infraestructura desarrollo de capaci
ión de la presión estrategia sostenibilidad estallidos de tu
licadores de desempeño impactos económicos balance hí

Referencias

[1] Asian Development Bank, *Data Book of Southeast Asian Water Utilities 2005.* ADB, Manila, Filipinas, 2008.

[2] Alegre, H., Baptista, J.M., Cabrera, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W. y Parena, R., *Performance Indicators for Water Supply Services. IWA Publishing.* Londres, 2007.

[3] Arenz, B. et al., *Netzmeister - Technisches Grundwissen Gas, Wasser, Fernwärme.* Oldenbourg Verlag, Alemania, 2007.

[4] AWWA. *Computer Modeling of Water Distribution Systems - Manual of Water Supply Practices M32.* [ed.] American Water Works Association, Denver, Colorado, Estados Unidos, 2005.

[5] Berner, M. y Riegler, G., *Integrierte Systemberechnung von Wasserversorgungsnetzen auf der Basis von Netzinformationssystemen (NIS).* energie | wasser-praxis, 6, pp. 12-16, 2003.

[6] Bristol Water, *Assessment of Economic Level of Leakage.* Bristol, Reino Unido, 2007.

[7] Brothers, K., *DMA Design - One Size May Not Fit All.* Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2009.

[8] Charalambous, B., *Effective Pressure Management of District Metered Areas.* Proceedings of Water Loss 2007, Bucarest, Rumania, 2007.

[9] Cornell, R. y Dunphy, J., *Water Distribution System Asset Management - Needs and Nice to Have.* Journal of the American Water Works Association, 2005.

[10] Cromwell, J., Reynolds, H. y Young, K., *Costs of Infrastructure Failure*. AWWA RF and AWWA, Denver, Colorado, Estados Unidos, 2002.

[11] Deuerlein, J., *Zur hydraulischen Systemanalyse von Wasserversorgungsnetzen*. Karlsruhe, Alemania, 2002.

[12] DVGW, *Merkblatt W 395 Schadensstatistik für Wasserrohrnetze.* Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Bonn, Alemania, 1998.

[13] DVGW, *Arbeitsblatt W 392 Rohrnetzinspektion und Wasserverluste - Maßnahmen, Verfahren und Bewertung.* Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Bonn, Alemania, 2003.

[14] DVGW, *Schadensstatistik Wasser: Ergebnisse aus den Jahren 1997 bis 2004.* Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Bonn, Alemania, 2006.

[15] DVGW, *GAWANIS - Datenmodell für die Dokumentation von Gas- und Wasserrohrnetzen.* Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Bonn, Alemania, 2000.

[16] DVGW, *Arbeitsblatt W 400-3 Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) Teil 3: Betrieb und Instandhaltung.* Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Bonn, Alemania, 2006.

[17] DVGW, *Arbeitsblatt GW 120 Netzdokumentation in Versorgungsunternehmen (Entwurf).* Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Bonn, Alemania, 2009.

[18] DVGW, *Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2008*. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Bonn, Alemania, 2008.

[19] Eyuboglu, M. y Al-Shukri, *Detection of water leaks using ground penetrating radar.* Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Geophysics Orlando, Florida, Estados Unidos, 2003.

[20] Fanner, P., *Assessing real water losses: a practical approach*. Water 21 - Magazine of the International Water Association, pp 49-50, 2004.

[21] Fanner, P. y Thornton, J., *The Importance of Real Loss Component Analysis for Determining the Correct Intervention Strategy.* Proceedings of the IWA Specialised Conference Leakage 2005, Halifax, Nueva Escocia, Canada, 2005.

[22] Farley, M., *Leakage Management and Control.* WHO, 2001.

[23] Farley, M. y Trow, S., *Losses in Water Distribution Networks.* IWA Publishing, 2003.

[24] Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, *Water Sector Strategy,* Bonn, Alemania, 2006.

[25] Fuchs H. y Seibitz, P., *Anforderungen an die geografische Datenverwaltung für einen Leitungskataster.* Proceedings of Leitungskataster für Trink- und Abwassernetze, Graz, Austria, 2007.

[26] Guibentif et al., *Acceptable Level of Water Losses in Geneva.* Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007', Bucarest, Rumania, 2007.

[27] Gumbo, B. et al., *Information is a prerequisite for water demand management: experiences from four cities in Southern Africa.* Physics & Chemistry of the Earth, 28, pp. 827-837, 2003.

[28] Hartley, D., *Acoustics Paper.* Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2009.

[29] Headley, M. C., *Guidelines for selecting the proper valve characteristics.* Valve Magazine, Volume 15, No. 2, Washington D.C., Estados Unidos, 2003.

[30] Heiman, A., Meyer, N. y Liemberger, R., *Tailoring the Specifications for Pressure Reducing Valves.* Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2009.

[31] Herz, R., *Rehabilitation engineering (keynotes)*. TU Dresden, Alemania, 2007.

[32] Herz, R., *Bath-tubs and hammock-chairs in service life modelling.* Proceedings of 13th European Junior Scientist Workshop on Service Life Management of Water Mains and Sewers, Technische Universität Dresden, Alemania, 1999.

[33] Heydenreich, M. y Hoch, W., *Praxis der Wasserverlustreduzierung*. wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, 2008.

[34] Heydenreich, M. y Kreft, D., *Erfolgsfaktor Netzbewirtschaftung.* energie | wasser-praxis, 2004.

[35] Hydro-Comp Enterprises, *Billing & Customer Information - Product Overview.* Johannesburg, Sudáfrica, 2010.

[36] Página web de i2o water, *www.i2owater.com*, visitada en julio 2010.
[37] Página web de IBNET, *www.ib-net.org*, visitada en julio 2010.
[38] IDS Water, *Leakage Economics – Plugging the knowlegde gap.* 2004.
[39] Kingdom, B., Liemberger, R. y Marin, P., *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries.*World Bank, Washington, Estados Unidos, 2006.
[40] Klingel, P. y Guth, N., *Integrated Hydraulic analysis and Data Management Tool for Water Supply Systems in Developing Countries.* Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2009, 11th Water Distribution Systems Analysis Symposium (WDSA), 2009.
[41] Kober E. y Gangl G., *New Monitoring Methodology for Water Distribution Systems.* Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2009.
[42] Kocks, H.-J., *Die Bedeutung des Stahlrohres in der Rehabilitation von Rohrleitungen*. GWF – Wasser/Abwasser, 147, pp. 53-60, 2006.
[43] Kropp, I. y Herz, R., *Bewertung von Leitungsnetzen,* wwt wasserwirtschaft wassertechnik, No. 5, 2005.
[44] Lambert, A. O., *International Report: Water losses management and technique.* Water Science and Technology: Water Supply. pp 1-20, 2002.
[45] Lambert, A. O., Brown T.G., Takizawa M. y Weimer D., *A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems.* Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua 48, pp. 227-237, 1999.
[46] Lambert, A. O., *Assessing Non-Revenue Water and its Components - a practical approach.* Water 21 - Magazine of the International Water Association, Vol. Agosto 2003, pp. 50-51, 2003.
[47] Lambert, A. O. y Fantozzi, M., *Recent Developments in Pressure Management.* Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2010', São Paulo, Brasil, 2010.
[48] Lambert, A. O. y Hirner, W., *Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures.* International Water Association, 2000.
[49] Lambert, A. O. y McKenzie, R. D., *Practical Experience in using the Infrastructure Leakage Index,* in Proceedings of the IWA Specialised Conference ,Leakage Management - A Practical Approach, pp 1- 16, Lemesos, Chipre, 2002.
[50] Lambert, A. O., *Ten years experience in using the UARL Formula to Calculate Infrastructure Leakage Index,* Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2009.
[51] Liemberger, R., *Wasserbilanz und Wasserverlust-Indikatoren.* aqua press International, pp. 14-17, 2005.
[52] Liemberger, R., *Analyse und Reduktion von Wasserverlusten.* PowerPoint Presentation, 2008.

[53] Liemberger, R., Brothers, K., Lambert, A.O., McKenzie, R., Rizzo, A. y Waldron, T., *Water Loss Performance Indicators.* Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007' Bucarest, Rumania 2007.

[54] May, J., *Project Manager for Pressure and Leakage Management.* Gold Coast Water, Australia, Personal communication, Junio 2010.

[55] McKenzie, R. y Lambert, A. O., *Best Practice Performance Indicators for Non-Revenue Water and Water Loss Components: A Practical Approach.* Water 21 - Magazine of the International Water Association, Vol. Agosto 2004, pp. 43-45, 2004.

[56] McKenzie, R. y Wegelin, W., *Scope for Pressure Management in South Africa*. Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2010', São Paulo, Brasil, 2010.

[57] Mistry, P., *Fire Incident - Eagleby pressure control area and the benefits of using flow modulation pressure control over traditional pressure control*. Artículo de 2005 encontrado en la página web *www.findmoreleaks.com*, visitada en 2009.

[58] Morrison, J., Tooms, S. y Rogers, D., *District Metered Areas Guidance Notes.* IWA Publishing, Londres, Reino Unido, 2007.

[59] Morrison, J., Tooms, S. y Hall, G., *Sustainable District Metering*. Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007. Bucarest, Rumania, 2007.

[60] Musil, S., *Nutzung eines Netzinformationssystems für Planung und Betrieb von Wasserversorgungsanlagen*. energie | wasser-praxis, 4, pp. 40-42, 2009.

[61] Mutschmann, J. y Stimmelmayr, F., *Taschenbuch der Wasserversorgung*. Braunschweig, Vieweg, 1999.

[62] Niemeyer, R. G., Gilles, K.-P. y Riggers, B., *Reduzierung von Wasserverlusten in Trinkwasserversorgungssystemen in Entwicklungsländern*. BMZ, Weltforum Verlag, 1994.

[63] Oppinger P., *Reducing Water Losses by Pressure Management.* Water & Wastewater International, 2009.

[64] Palmer environmental, *Control Mate Instructions,* ControlMate Users's Guide, CM UG Issue 1, 2001.

[65] Parker, Fanner y Feldman, *Increasing Energy Efficiency of Water Supply - How to introduce carbon credits to the water sector?* IWA Task Force on Water Utility Efficiency, 2008.

[66] Pearson, D. y Trow, S. W., *Calculating Economic Levels of Leakage.* Proceedings of the IWA Specialised Conference 'Leakage 2005', Halifax, Nueva Escocia, Canadá, 2005.

[67] Pierce, K., *The benefits of data integration - the data, the tools, and several case studies*. Proceedings of the GITA's 28th Annual Conference, Geospatial Information & Technology Association (GITA), Denver, Colorado, Estados Unidos, 2005.

[68] Pietilä, P. E. y Seppänen, R.-M., *Practical Problems in Water Network and Water Loss Management in Namibia.* Proceedings of Water Loss 2009, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2009.

[69] Pilcher, R., *Leak detection practices and techniques: a practical approach*. Water 21 - Magazine of the International Water Association. 2003.

[70] Rieder, A., *Technisches Risikomanagement – Risikoorientierte Rohrnetzbewertung*. Proceedings of Wasserverluste in Trinkwassernetzen, Graz, Austria, 2009.
[71] Roscher, H., *Sanierung städtischer Wasserversorgungsnetze*. Verlag Bauwesen, 2000.
[72] Saliba, N., *The Utilization of GIS and Geo-Information Technologies in Serving the Non-Revenue Water Directorate, the PMU Experience*. Amman, Jordania, 2005.
[73] SAMSON AG, *Cavitation in Control Valves*. Frankfurt, Alemania, 2003.
[74] Soiné, K.-J. et al., *Handbuch für Wassermeister.* Oldenburg, 1998.
[75] Shamsi U. M., *GIS-Tools for Water, Wastewater and Stormwater Systems*. ASCE Press, 2002.
[76] Thibodeaux, B. K., *People Make the Difference – Staff for Project Success.* Proceedings of the GITA's 28th Annual Conference, Geospatial Information & Technology Association (GITA), Denver, Colorado, Estados Unidos, 2005.
[77] Thornton, J., Sturm, R. y Kunkel, G., *Water Loss Control*. McGraw-Hill, 2008.
[78] Thornton, J. y Lambert A. O., *Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships.* Proceedings of the IWA Specialised Conference 'Leakage 2005', Halifax, Nueva Escocia, Canadá, 2005.
[79] Thornton, J. y Lambert A. O., *Pressure management extends infrastructure life and reduces unnecessary energy costs.* Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007', Bucarest, Rumania, 2007.
[80] Tripartite Group, *Leakage Target Setting for Water Companies in England and Wales.* Tripartite Group. 2002.
[81] Trow, S. y Farley, M., *Developing a Strategy for Leakage Management in Water Distribution Systems.* Water Science and Technology: Water Supply, Vol. 4, pp. 149-168, 2004.
[82] Trow, S., *Alternative Approaches to Setting Leakage Targets*. Proceedings of the IWA International Specialised Conference 'Water Loss 2007', Bucarest, Rumania, 2007.
[83] Trow, S., *Development of a Pressure Management Index (PMI)*. Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference, Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2009.
[84] Trujillo Alvarez, R., *Bedarfsprognose und Strategieentwicklung für die Rehabilitation städtischer Wasserrohrnetze.* Institut für Städtebau und Landesplanung, Universität Karlsruhe, 1995.
[85] UNDP, *Human Development Report 2006 – beyond scarcity:power, poverty and the global water crisis.* United Nations Development Programme, Nueva York, Estados Unidos, 2006.
[86] UNESCO, *The United Nations World Water Development Report 3 - Water in a Changing World.* The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Francia, 2009.
[87] United States Environmental Protection Agency (US EPA) página web, *www.epa.gov*, visitada en 2010.
[88] Walski, T. M. et al., *Advanced Water Distribution Modeling And Management.* Waterbury: Haestad Press, 2003.
[89] Warren, R., Cunningham, A., *Leakage methodology review: variation in per capita consumption estimates.* Dorking, Reino Unido, 2007.

[90] Widauer, M., *Das Ringkolbenventil im Vergleich zum Membranventil.* FORUM Gas Wasser Wärme No. 3/2008, ÖVGW, Linz, Austria, 2008.

[91] World Water Council, *Istanbul Water Consensus For Local and Regional Authorities.* Proceedings of the 5th World Water Forum, Istanbul, Turquía, 2009.

[92] Xulu, M., *Benefits of commercial and network data validation - a case stuy.* Proceedings of the Biennial Conference of the Water Institute of Southern Africa (WISA). pp. 1-11. Durban, Sudáfrica, 2002.

[93] Zeiler, M., *Modeling our World.* Redlands: Environmental Systems Research Institute, 1999.

[94] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (giz) GmbH, *Capacity WORKS - the management model for sustainable development,* Eschborn, Alemania, 2009.

ntervención distrito hidrométrico gestión de la infraestruc
aso monitoreo gestión de la presión estrategia sostenibilid
cción de fugas indicadores de desempeño impactos econó
hidráulica requisitos básicos agua no facturada sistemas d
fraestructura desarrollo de capacidades reducción de pérd
sostenibilidad estallidos de tubería control activo de fugas
icos balance hídrico pérdidas aparentes reparación de fug
s de información métodos de intervención distrito hidron
ción de pérdidas de agua estudios de caso monitoreo gest
trol activo de fugas pérdidas reales detección de fugas inc

Lista de abreviaturas

ctura desarrollo de capacidades reducción de pérdidas de
ad estallidos de tubería control activo de fugas pérdidas
omicos balance hídrico pérdidas aparentes reparación de
e información métodos de intervención distrito hidromé
idas de agua estudios de caso monitoreo gestión de la pr
pérdidas reales detección de fugas indicadores de desem
as modelación hidráulica requisitos básicos agua no factu
métrico gestión de la infraestructura desarrollo de capaci
ión de la presión estrategia sostenibilidad estallidos de tu
licadores de desempeño impactos económicos balance hí

Lista de abreviaturas

AC	Asbesto cemento (Amianto)
AMR	Lectura automática de medidores (AMR - Automatic meter reading)
ANEPSSA	Asociación Nacional de Entidades Prestadoras de Servicio de Saneamiento del Péru
ANF	Agua no facturada (NRW - Non-revenue water)
ASCII	American standard code for information interchange
AWWA	American Water Works Association
CAF	Control activo de fugas (ALC - Active leakage control)
CAPEX	Gastos de capital (Capital expenditures)
CCTV	Circuito Cerrado de Televisión (Closed Circuit Television)
CLP	Controlador lógico programable (PLC - Programmable logic controller)
CMN	Caudal mínimo nocturno (MNF - Minimum night flow)
d.s.p.	Número de días en los que el sistema está presurizado
DAO	Diseño asistido por ordenador (CAD - Computer-aided design)
DHM	Distrito hidrométrico (DMA - District metered area)
DN	Diámetro nominal
DP	Cooperación de desarrollo (DP - Development partnership)
DVGW	Asociación Alemana del Gas y el Agua
EPANET	Programa de modelización hidráulica de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA)
FDN	Factor día/noche (NDF - Night to day factor)
FHNW	Universidad de ciencias aplicadas del noroeste de la Suiza (Fachhochschule Nordwestschweiz)
GAWANIS	Sistema de información de las redes de gas y de agua
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
GP	Gestión de la presión (PM - Pressure management)
GPRS	Servicio general de paquetes vía radio (General Packet Radio Service)
GPS	Sistema de posicionamiento global(Global positioning system)
GSM	Sistema global para las comunicaciones móviles (Global system for mobile communications)
IBNET	International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities
ID	Identificación
ID	Indicador de desempeño (PI- Performance indicator)
IEC	Institute for Ecopreneurship
IFE	Índice de fugas estructurales (ILI - Infrastructure leakage index)
IGP	Índice de gestión de la presión (PMI - Pressure management index)
IWA	Asociación Internacional del Agua (IWA - International Water Association)
IWG	Institute for Water and River Basin Management

KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KIT	Karlsruhe Institute of Technology
MED	Modelo de elevación digital (DEM - Digital elevation model)
MIU	Monitoreo individual de usuarios (IHM - Individual household monitor)
MPRA	Meta de las pérdidas reales anuales (TARL - Target annual real losses)
MZ	Monitoreo de zona (AM - Area monitor)
NEF	Nivel económico de fugas (ELL - Economic level of leakage)
OMS	Organización Mundial de la Salud (WHO - World Health Organization)
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement (Burkina Faso)
OPEX	Gastos operativos (Operational expenditures)
P	Presión
PE	Polietileno
PPP	Public-private partnership
PPZ	Punto promedio de zona (AZP - Average zone point)
PRAA	Pérdidas reales anuales actuales (CARL - Current annual real losses)
PRAI	Pérdidas reales anuales inevitables (UARL - Unavoidable annual real losses)
PVC	Policloruro de vinilo
Q	Caudal
RDA	Red de distribución de agua potable
ROI	Rendimiento sobre la inversión (ROI -Return on investment)
RPA	Reducción de pérdidas de agua (WLR - Water loss reduction)
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP
SCADA	Control Supervisor y Adquisición de Datos (SCADA - Supervisory control and data acquisition)
SEDAPAL	Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima
SGP	Sector de gestión de la presión (PMA - Pressure management area)
SIC	Sistema de información de clientes (CIS - Customer information system)
SIG	Sistema de información geográfica (GIS - Geographic information system)
SSD	Sistema de soporte a las decisiones (DSS - Decision support system)
TIN	Red irregular triangulada (Triangulated irregular network)
UFW	Agua no contabilizada (UFW - Unaccounted-for water)
UNW-DPC	UN-Water Decade Programme on Capacity Development
USD	Dólar de los Estados Unidos
VAG	VAG-Armaturen GmbH
VRP	Válvula reductora de presión
WAJ	Water Authority of Jordan

Pie de imprenta

Publicado por
Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Postfach 5180
65726 Eschborn
Alemania
T +49 6196 79-0
F +49 6196 79-1115
E info@giz.de
I www.giz.de

Eschborn, enero 2011

Desde el 1 de enero de 2011, la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH concentra la competencia y la larga experiencia del DED, de la GTZ y de InWEnt. Para mayor información consulte el sitio web www.giz.de.

Responsable
Dörte Ziegler (GIZ)

Persona de contacto
Katja Hübschen
T +49 6196 79-1865
F +49 6196 7980-1865
E pm@giz.de
I www.giz.de

Autores
Patrick Fallis, Katja Hübschen, Emmanuel Oertlé, Dörte Ziegler (Capitulos 1 & 2);
Philipp Klingel, Axel Knobloch
(Capitulos 3-6, excepto 6.4 & 6.7);
Jörg Baader & Emmanuel Oertlé (Capitulos 6.4);
Raül Trujillo (Capitulos 6.7);
Christine Laures (Material suplementario)
Con el apoyo de
UN-Water Decade Programme for Capacity Development (UNW-DPC)

Diseño e infografía
© creative republic
Thomas Maxeiner Kommunikationsdesign,
Frankfurt am Main/Alemania
T +49 69-915085-60
I www.creativerepublic.net

Fotos
© Jörg Baader, Thomas Baier, Carsten Behlert, Frank Boyer, CUDRC, BMZ – Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, David Heer, B. Itzicovitch, Philipp Klingel, Axel Knobloch, Yves Marinoff, Rita Pietschmann, Tobias Tkaczik.

Producción
Litografía: Rohland&more, Offenbach/Alemania

Notas

Notas

Notas

ntervención distrito hidrométrico gestión de la infraestruc
aso monitoreo gestión de la presión estrategia sostenibilid
cción de fugas indicadores de desempeño impactos econó
hidráulica requisitos básicos agua no facturada sistemas d
fraestructura desarrollo de capacidades reducción de pérd
sostenibilidad estallidos de tubería control activo de fugas
icos balance hídrico pérdidas aparentes reparación de fug
s de información métodos de intervención distrito hidron
ción de pérdidas de agua estudios de caso monitoreo gest
trol activo de fugas pérdidas reales detección de fugas inc

ctura desarrollo de capacidades reducción de pérdidas de
ad estallidos de tubería control activo de fugas pérdidas
omicos balance hídrico pérdidas aparentes reparación de
e información métodos de intervención distrito hidromé
idas de agua estudios de caso monitoreo gestión de la pr
pérdidas reales detección de fugas indicadores de desem
as modelación hidráulica requisitos básicos agua no factu
métrico gestión de la infraestructura desarrollo de capaci
ión de la presión estrategia sostenibilidad estallidos de tu
licadores de desempeño impactos económicos balance hí

« Me complace recomendar esta guía a todos quienes, en cualquier lugar del mundo, deseen abordar problemas de la gestión de la pérdida de agua en sistemas de distribución. La GIZ y VAG se merecen una felicitación por su iniciativa encaminada a promocionar los principios formulados por el grupo de especialistas en materia de pérdida de agua de la IWA, así como tecnologías y conocimientos europeos avanzados, para contribuir a alcanzar este importante objetivo. »

Allan Lambert, Water Loss Research & Analysis Ltd., presidente del 1er grupo de trabajo sobre pérdida de agua de la IWA, 1996-1999

« La guía ofrece una visión de conjunto del amplio alcance de la gestión de la pérdida de agua y es enormemente valiosa para los planificadores en lo concerniente a la gestión estratégicamente fundada de la pérdida de agua. Especialmente la aplicación de una moderna gestión de la presión junto con estructuras virtuales de distritos hidrométricos contribuyen a la eficiencia de la gestión de la pérdida de agua en redes de abastecimiento con altos índices de pérdida y altas frecuencias de fallo. »

Erwin Kober, ingeniero superior, director general, RBS Wave

« Esta guía puede servir a la comunidad del agua en general para reducir la pérdida de agua en los sistemas de distribución. UNW-DPC puede asegurar su difusión a los colaboradores interesados y fomentar su utilización en los eventos de desarrollo de capacidades que celebramos en todo el mundo. »

Dr. Reza Ardakanian, director del Programa de ONU-Agua para el desarrollo de la capacidad en el marco del Decenio (UNW-DPC), Universidad de las Naciones Unidas

Apoyado por:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn
Alemania

T +49 6196 79-0
F +49 6196 79-1115
E info@giz.de
I www.giz.de