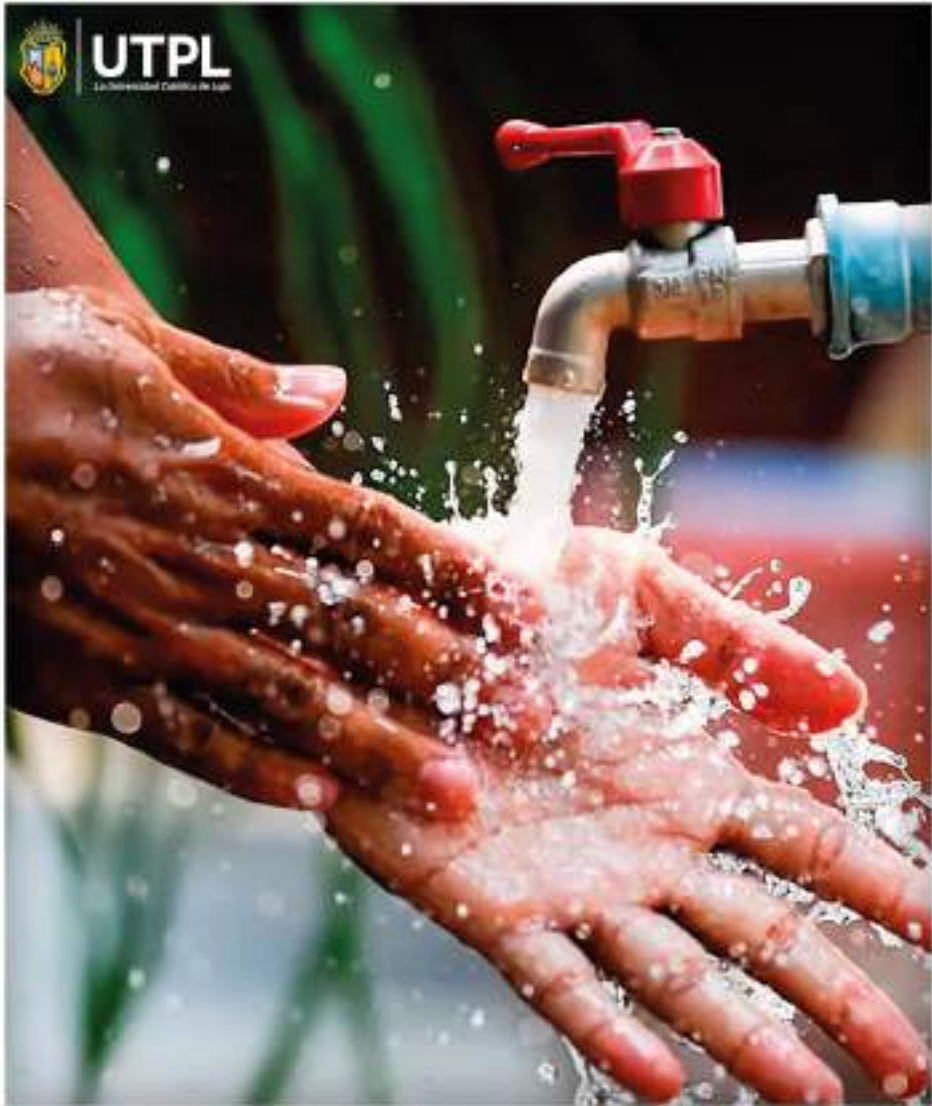


PRÁCTICA INTEGRAL PARA LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS DE AGUA



**GUÍA COMPLETA PARA
PROFESIONALES EN REDES PRESURIZADAS**

*Pedro González Cartuche
Holger Benavides Muñoz*

EDITORIAL QUEVAN

Guía de capacitación para la detección y localización de fugas de agua

Contemplado con base en las normativas técnicas vigentes y el ODS 6.4 de las Naciones Unidas: “De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua”



Copyright 2025 Compañía Editorial
© Editorial QUEYÁM Cía. Ltda.
© Universidad Técnica Particular de Loja

Pérez de Anda 01-180 y Castillo
Ambato – Ecuador
Teléfono: (+593) 96 239 7155
editorial@queyam.com

Primera edición

ISBN: 978-9942-7409-1-5
Fecha de publicación: 2025

AUTORES:

Pedro González Cartuche
Holger Benavides Muñoz

Equipo editorial

Director:	Diego Salinas Morales
Coordinador editorial:	Fernanda Núñez Ambato
Editor literario:	Nathaly Obregón Aguilar
Diseño y diagramación:	Fernando Ortiz Betancourt

Revisores:

Ing. Jorge Cuascota Cuzco, M.Sc.

Ingeniero Civil, Magíster en Gestión de Proyectos (Ecuador)

Ing. Edward Tovar Romero, M.Sc.

Ingeniero Sanitario, Magíster en Ingeniería Civil, Doctorando en Ingeniería, (Colombia)

Ing. Christian Cuellar Triana, M.Sc.

Ingeniero Hidráulico, Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, (Cuba-España)

© Editorial QUEYÁM Cía. Ltda., 2025.

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida, almacenada o transmitida en ninguna forma ni por ningún medio sin autorización previa de la editorial.

PRÁCTICA INTEGRAL PARA LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS DE AGUA EN REDES PRESURIZADAS

Actividades de campo

Holger Manuel Benavides Muñoz
Bryan David Sarango Cuenca
Roosevelt David Jaramillo Rodríguez
Jonathan Fernando Quezada Puglla
Harthman Michael Sarango Tene



Agradecimiento

Agradecemos a la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL) y al equipo de investigación por su compromiso y apoyo en la realización de este trabajo.

CAPÍTULO 1

Prólogo.....	XV
Introducción.....	XIX
1. PÉRDIDAS EN LAS REDES DE AGUA POTABLE.....	1
1.1. Conceptos básicos de hidráulica en redes presurizadas	3
1.2. Objetivo de la determinación de pérdidas en las redes de agua potable	7
1.3. Impacto de las fugas de agua en la operación de la red	7
1.4. Causas comunes de fugas en redes de distribución de agua	10
1.5. Conceptos operativos clave en la gestión de pérdidas	16

CAPÍTULO 2

2. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS DE AGUA.....	21
2.1. Clasificación de las fugas de agua	23
2.2. Objetivo de la detección y localización de fugas de agua	29
2.3. Equipos acústicos utilizados en la detección y localización de fugas de agua	29
2.4. Tecnologías emergentes en la detección y localización de fugas de agua	44

CAPÍTULO 3

3. USO Y OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS EN LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA.....	49
3.1. Identificación de una fuga de agua	51
3.2. Diferencia entre detección y localización de fugas de agua	51
3.3. Caso de estudio.....	67
3.4. Modelación hidráulica para detección preventiva de fugas.....	85

CAPÍTULO 4

4. RECURSOS HUMANOS EMPLEADOS EN LA DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y REPARACIÓN DE FUGAS DE AGUA.....	91
4.1. Recursos humanos	93
4.2. Equipos, herramientas y materiales utilizados en la detección, localización y reparación de una fuga de agua	94
4.3. Trabajos realizados por el personal	95

CAPÍTULO 5

5.SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (SST)	99
5.1. Importancia de la SST	101
5.2. Políticas de la SST	101
5.3. Equipos de Protección Personal (EPP)	101
5.4. Promoción de la salud en el trabajo	104
5.5. Gestión de emergencias y planes de contingencia	104
6. BIBLIOGRAFÍA.....	107
7. ANEXOS	117

ÍNDICE DE FIGURAS CAPÍTULO 1

Figura 1. Simulación de fuga de agua.....	7
Figura 2. Falla en tubería por falta de mantenimiento	10
Figura 3. Falla en conexión de accesorio por corrosión.....	10
Figura 4. Fuga de agua en unión mal instalada	11
Figura 5. Válvula de paso desgastada	12
Figura 6. Fuga de agua por exceso de presión.....	12
Figura 7. Válvulas de paso de sistema de riego	13
Figura 8. Bombas del sistema de impulsión.....	13
Figura 9. Ruptura de tubería por mantenimiento.....	14
Figura 10. Ruptura de tubería por la presencia de raíces	15
Figura 11. Conexiones ilegales al suministro de agua potable.....	16

ÍNDICE DE FIGURAS CAPÍTULO 2

Figura 12. Fuga en la red de agua potable	24
Figura 13. Caudalímetro Thermo Scientific en funcionamiento.....	31
Figura 14. Caudalímetro ChronoFlo 2 en funcionamiento.....	31
Figura 16. Data loggers de presión en funcionamiento.....	34
Figura 17. Data logger de presión recopilando datos.....	34
Figura 17. Correlador MicroCorr Touch	38
Figura 18. Geófono Xmic	38
Figura 19. Cámara termográfica.....	41
Figura 20. Presencia de humedad en pared por fuga de agua.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS CAPÍTULO 3

Figura 21. Manómetro registrando la presión del sistema de bombeo durante pruebas de presión.....	53
Figura 22. Data loggers registrando presión durante pruebas en el sistema hidráulico.....	53
Figura 23. Bomba 2 marca General Pumps en funcionamiento.....	54
Figura 24. Placa de identificación de la Bomba 2 marca General Pumps.....	54
Figura 25. Esquema del sistema de bombeo, desde el tanque de succión hasta el tanque de reserva.....	55
Figura 26. Caudalímetro ChronoFLO2 instalado y en funcionamiento.....	56
Figura 27. Transductores y regleta del caudalímetro instalados en la tubería.....	57

Figura 28. Caudalímetro ChronoFLO2 instalado y en funcionamiento.....	58
Figura 29. Collarín y tapón metálico instalados en la tubería.....	61
Figura 30. Data logger y micrófono de correlador instalados en accesorios conectados a la tubería.....	61
Figura 31. Transmisor 1 del correlador instalado en la tubería.....	63
Figura 32. Transmisor 2 del correlador instalado en la tubería.....	63
Figura 33. Esquema de conexión y recepción de señal del correlador.....	63
Figura 34. Correlador recibiendo la señal de ruidos de fuga de los transmisores.....	63
Figura 35. Sensor tipo trípode utilizado para superficies no pavimentadas.....	65
Figura 36. Sesión de escucha con geófono en tubería principal.....	65
Figura 37. Operador realizando sesión de escucha con geófono sobre pavimento.....	66
Figura 38. Distritos hidrométricos del proyecto “Regenerar”	69
Figura 39. Esquema de tanque de reserva	74
Figura 40. Estaciones de Bombeo Zona: Centro Este de Loja	75
Figura 41. Perfil de impulsión, E.B. Las Peñas, bombas trabajando en paralelo.....	77
Figura 42. Perfil de impulsión de la E.B. Clodoveo Alto, bombas trabajando en paralelo.....	79
Figura 43. Perfil de impulsión, E.B. Noroccidental, bombas trabajando en paralelo.....	81
Figura 44. Pozo 1 excavado para la instalación del transmisor 1 del correlador.....	83
Figura 45. Pozo 2 excavado para la instalación de llave de paso con fines de simulación de fuga.....	83
Figura 46. Pozo 3 excavado para la instalación del transmisor 2 del correlador.....	83
Figura 47. Esquema de instalación de correladores y punto de simulación de fuga	83
Figura 48. Simulación de fuga de agua.....	84
Figura 49. Correlador recibiendo la señal de ruido de fuga desde los transmisores.....	84
Figura 50. Correlador recibiendo la señal de ruido de fuga desde los transmisores.....	85
Figura 51. Sesión de escucha con geófono	85
Figura 52. Niveles de ruido captados.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS CAPÍTULO 4

Figura 53. Herramientas utilizadas para la detección y localización de fugas.....	94
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS CAPÍTULO 5

Figura 54. Equipos de protección personal.....	103
Figura 55. Equipos de protección colectiva.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos registrados en la estación de bombeo Las Peñas, bomba 1	76
Tabla 2. Datos registrados en la estación de bombeo Las Peñas, bomba 2	76
Tabla 3. Datos registrados en la estación de bombeo Clodoveo Alto, bomba 1.....	78
Tabla 4. Datos registrado en la estación de bombeo Clodoveo Alto, bomba 2	78
Tabla 5. Datos registrados en la estación de bombeo Noroccidental, bomba 1.....	80
Tabla 6. Datos registrados en la estación de bombeo Noroccidental, bomba 2	80
Tabla 7. Datos de principales características ingresados en la calibración del caudalímetro.....	81
Tabla 8. Datos obtenidos del aforo del caudalímetro.....	82

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Simulación de fuga en campo, bajo condiciones controladas, obtenida con datos de campo	25
Gráfica 2. Tipos de fugas por su caudal y criterio de rentabilidad	26

Prólogo

En el contexto actual de creciente presión sobre los recursos hídricos, la detección y localización de fugas en redes de distribución presurizadas constituye una prioridad técnica y operativa en la gestión eficiente del agua potable. Las pérdidas físicas de agua no contabilizada comprometen tanto la sostenibilidad del servicio como la integridad de las infraestructuras hidráulicas, generando repercusiones económicas, ambientales y sociales.

Este manual se presenta como una guía técnica integral destinada a profesionales, operadores y técnicos del sector hídrico, con el objetivo de proporcionar herramientas metodológicas y criterios operativos para la identificación precisa de fugas en sistemas de conducción a presión. Su contenido combina fundamentos teóricos, procedimientos operativos y experiencias prácticas de campo, con el fin de fortalecer las capacidades institucionales en materia de control de pérdidas.

Las fugas no representan únicamente una disminución en la eficiencia del sistema, sino que además contribuyen a la degradación ambiental y a la reducción de la disponibilidad del recurso para futuras generaciones. En este sentido, el uso de tecnologías adecuadas para la detección oportuna y la intervención eficaz se convierte en una acción clave dentro de los principios de sostenibilidad y gestión integrada del recurso hídrico.

Se espera que esta obra constituya un referente técnico y una herramienta útil para quienes desempeñan funciones en la planificación, operación y mantenimiento de redes de agua potable. La localización de fugas no debe entenderse solo como una tarea técnica, sino como un compromiso profesional orientado al uso racional del agua y a la protección de un recurso estratégico para el desarrollo humano y ambiental.

Introducción

La gestión eficiente del agua, recurso limitado y vital, resulta fundamental para el bienestar colectivo. En el contexto de las urbes contemporáneas, las redes de distribución de agua potable desempeñan un rol clave al abastecer de manera continua a hogares, industrias y comercios, permitiendo el desarrollo normal de las actividades cotidianas. Entre las infraestructuras urbanas, las redes presurizadas (diseñadas para mantener un flujo constante de agua bajo presión) se distinguen por su complejidad y sofisticación. No obstante, estas redes están sujetas a fallos que, si no se gestionan de manera efectiva, pueden generar consecuencias significativas.

Las fugas, en particular, representan un desafío técnico relevante, ya que afectan la disponibilidad del recurso y comprometen su sostenibilidad económica y ambiental. Una fuga en una red presurizada implica además de la pérdida de agua, un posible deterioro en la infraestructura, afectar la calidad del servicio e incrementar los costos operativos. Asimismo, el desperdicio de agua potable conlleva impactos ambientales significativos. De acuerdo con investigaciones internacionales, las fugas en las redes de distribución son responsables de pérdidas que, en algunos casos, alcanzan hasta un 40 % del volumen suministrado, lo que resalta la urgencia de implementar mecanismos eficaces para su detección y reparación.

La detección de fugas en estas redes constituye, por tanto, una necesidad crítica para los organismos encargados de la gestión del recurso hídrico. Más allá de la eficiencia operativa, su control tiene implicaciones directas en el ahorro económico, la preservación del entorno natural y la mejora de la calidad de vida de la población. Las causas de las fugas son diversas y pueden incluir tanto defectos estructurales como tuberías corroídas o uniones deficientes, como problemas operativos, tales como la sobrepresión en el sistema. Independientemente de su origen, todas las fugas generan pérdidas tangibles de agua que deben ser abordadas con prontitud y precisión.

Este manual tiene como objetivo proporcionar un conjunto integral de procedimientos orientados al mantenimiento de sistemas de distribución de agua. Su propósito es fortalecer las competencias del personal operativo mediante conocimientos técnicos que les permitan identificar vulnerabilidades relacionadas con las fugas y responder con eficiencia. De este modo, se mejora el desempeño operativo y se posibilita una intervención más precisa y oportuna.

El contenido teórico del manual está respaldado por material gráfico que facilita la comprensión de los procedimientos técnicos. El primer capítulo, titulado “Pérdidas en los sistemas de agua potable”, analiza las causas principales de pérdida y desarrolla el concepto de agua no contabilizada. El segundo capítulo, “Tecnología para la detección y localización de fugas de agua”, describe los instrumentos y dispositivos empleados en esta labor, incluyendo aquellos que permiten detectar fugas no visibles.

El tercer capítulo, “Procedimientos de uso y operación de equipos para detección de fugas”, expone los beneficios de la tecnología aplicada a la localización rápida de fugas y presenta un caso de estudio práctico en campo. El cuarto capítulo, “Recursos humanos en la detección, localización y reparación de fugas”, detalla las responsabilidades específicas de los integrantes del equipo de intervención. Finalmente, el quinto capítulo, “Salud y seguridad en el trabajo”, aborda las condiciones necesarias para garantizar que las operaciones se realicen de forma segura, preservando la integridad del personal técnico.

Este manual, en síntesis, constituye una herramienta clave tanto para la formación técnica de los operarios como para el perfeccionamiento continuo en la gestión de las redes de agua potable, con el objetivo último de minimizar pérdidas y asegurar una distribución sostenible y eficiente del recurso.

CAPÍTULO

1

PÉRDIDAS EN LAS REDES DE AGUA POTABLE

1.1. Conceptos básicos de hidráulica en redes presurizadas

La hidráulica es la rama de la ingeniería que estudia el comportamiento de los fluidos, en especial del agua, tanto en movimiento como en reposo, así como su interacción con las estructuras que los contienen o por las que circulan (Iqbal & Riaz, 2024). En el ámbito de las redes presurizadas de agua potable, esta disciplina resulta fundamental, pues permite comprender y predecir el flujo del líquido a través de las tuberías, evaluar cómo las variaciones de presión inciden en el sistema y optimizar el uso de los recursos para garantizar un suministro eficiente y seguro (Joseph et al., 2024). En este documento se abordan conceptos esenciales de la hidráulica que constituyen la base para el diseño, operación y mantenimiento de redes de agua presurizada.

1.1.1. Flujo de agua en una red presurizada

El flujo de agua en una red presurizada está determinado por la diferencia de presión entre dos puntos del sistema. Esta diferencia de presión impulsa el agua a través de las tuberías, de modo que el agua se desplaza desde áreas de mayor presión hacia áreas de menor presión. El flujo puede ser laminar o turbulento dependiendo de la velocidad del agua y las características de las tuberías (Fox et al., 2021).

- **Flujo laminar.** Se presenta cuando las partículas de agua se mueven en capas ordenadas y sin mezclar. Este tipo de flujo ocurre a bajas velocidades o con alta viscosidad.
- **Flujo turbulento.** Se presenta cuando las partículas de agua se mezclan de manera desordenada, generando remolinos y vórtices. Se presenta en situaciones de alta velocidad de flujo y es más difícil de controlar, ya que aumenta la resistencia al paso del agua.

Para un flujo ideal en una red de agua, se debe buscar un régimen lo más laminar posible, ya que el flujo turbulento incrementa las pérdidas de energía debido a la fricción.



1.1.2. Presión en una red de distribución

La presión es la fuerza ejercida por el agua sobre las paredes o la sección transversal completa de las tuberías (Arboleda, 2020). En una red presurizada de agua potable, esta variable debe mantenerse dentro de rangos específicos para garantizar un flujo adecuado hasta los puntos de consumo (Nishikawa & Udo, 1982). La presión es determinante para evaluar la capacidad del sistema de abastecer agua a distintas alturas o distancias, y su distribución está condicionada por factores como la topografía del terreno, el diseño hidráulico y las condiciones operativas (Fox et al., 2021; Casillas et al., 2013).

- **Presión estática.** Es la presión que ejerce el agua en reposo, es decir, cuando el fluido no está en movimiento. Esta presión depende de la altura de la columna de agua y de las características del sistema.
- **Presión dinámica.** Es la presión del agua cuando esta se encuentra en movimiento. Esta presión depende de la velocidad del agua y de las pérdidas de carga en el sistema (Fox et al., 2021; Martínez, 2018).

El control de la presión en una red de agua potable es indispensable, ya que una presión demasiado alta puede dañar las tuberías y accesorios, mientras que una presión demasiado baja puede dificultar el suministro adecuado de agua, especialmente en puntos elevados o distantes de la fuente.



1.1.3. Pérdidas de carga en la red

Las pérdidas de carga representan la disminución de presión que ocurre cuando el agua fluye a través de las tuberías y otros elementos del sistema (Prasuhn, 1987). Estas pérdidas se deben a la fricción del agua con las superficies internas de las tuberías, la turbulencia en los codos y cambios de dirección, y las obstrucciones en las válvulas y filtros (Arboleda, 2020). Existen dos tipos principales de pérdidas de carga:

- **Pérdidas por fricción.** Ocurren a lo largo de las tuberías y dependen de factores como el material de la tubería, el diámetro, la longitud, la rugosidad interna y la velocidad del agua (Reyes, 2019).

Para el cálculo de las pérdidas por fricción a lo largo de una tubería, se emplea la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

- h_f es la pérdida de carga por fricción (m).
- f es el coeficiente de fricción de Darcy.
- L es la longitud de la tubería (m).
- D es el diámetro interno de la tubería (m).
- V es la velocidad media del flujo (m/s).
- g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

El valor del coeficiente f depende del régimen de flujo (laminar o turbulento) y de la rugosidad relativa ϵ/D , donde ϵ es la rugosidad absoluta del material de la tubería. Este coeficiente puede obtenerse mediante la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Donde Re es el número de Reynolds del flujo. Valores típicos de rugosidad absoluta (ϵ) según el material (Chow, 1959):

Material de la tubería	Rugosidad absoluta ϵ (mm)
PVC	0.0015
Acero comercial nuevo	0.046
Hierro fundido	0.26
Concreto	0.3 – 3.0
Tuberías envejecidas o corroídas	>0.5

Con el tiempo de explotación y operación del sistema, el valor de ϵ puede incrementarse debido a fenómenos como incrustaciones, corrosión o biofilm, lo cual aumenta el coeficiente de fricción f y, por consiguiente, las pérdidas de carga.

- **Pérdidas locales.** Se producen en componentes como válvulas, codos, reducciones, y otros accesorios, donde el flujo del agua cambia de dirección o velocidad, generando una caída de presión.

Las pérdidas de carga localizadas se calculan mediante la expresión:

$$h_L = K \times \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

- h_L es la pérdida de carga localizada (m),
- K es el coeficiente de pérdida local, que depende del tipo de accesorio,
- V es la velocidad del flujo en la sección correspondiente (m/s).

Valores típicos de K (Chaudhry, 2014):

Elemento	Coeficiente K
Codo a 90°	0.3 – 1.0
Reducción repentina	0.3 – 0.8
Expansión repentina	0.2 – 0.5
Válvula totalmente abierta	0.1 – 0.2
Válvula parcialmente cerrada	>1.0

El estudio de la hidráulica en redes presurizadas es fundamental para garantizar que el agua se distribuya de manera eficiente, segura y sostenible. Conocer los principios hidráulicos como el flujo de agua, la presión, las pérdidas de carga y las leyes fundamentales como la de Darcy-Weisbach y Bernoulli, permite a los ingenieros diseñar, operar y mantener redes de agua que no solo proporcionen un suministro constante, sino que también minimicen las pérdidas, el consumo energético y los costos

Para mitigar las pérdidas de carga, es esencial diseñar la red utilizando tuberías de diámetro adecuado, minimizar las curvas y reducciones innecesarias, y optimizar la selección de válvulas y accesorios. Las pérdidas de carga influyen directamente en el consumo de energía de las bombas, por lo que su control es clave para la eficiencia operativa de la red.



operativos. Este conocimiento es esencial para prevenir y gestionar problemas como las fugas, y para asegurar una distribución eficaz de las infraestructuras hidráulicas.

1.2. Objetivo de la determinación de pérdidas en las redes de agua potable

El agua representa un recurso esencial sin importar la ubicación geográfica, que, en ocasiones, se ve limitado e incluso escaso. No obstante, factores como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico, entre otros, generan una alta demanda tanto en los recursos hídricos como en la infraestructura encargada de suministrar el agua potable (Al-Washali et al., 2016).

Las considerables pérdidas de agua debido a fugas (véase Figura 1) en las redes de distribución y los volúmenes de agua distribuidos sin ser facturados (agua no facturada) añaden complejidad a la situación del suministro de este recurso, por lo tanto el objetivo de la determinación

de estas pérdidas radica en implementar un programa de detección y reparación de fugas y pérdidas en la red de agua potable con el fin de mejorar la eficiencia del sistema de distribución (Arboleda, 2020).



Figura 1. Simulación de fuga de agua
Nota. Fotografía obtenida en campo.

1.3. Impacto de las fugas de agua en la operación de la red

Las fugas de agua en las redes de distribución presurizadas representan uno de los mayores desafíos para los sistemas de abastecimiento de agua potable. Su presencia no solo afecta la eficiencia operativa de la red, sino que también tiene consecuencias muy significativas en términos económicos, ambientales y sociales (Arboleda, 2020). Por otro lado, en términos ingenieriles,

las fugas pueden inducir una serie de efectos adversos que afectan la calidad del servicio, la sostenibilidad del sistema y la confiabilidad a largo plazo de la infraestructura hidráulica (Martínez, 2018). A continuación, se presentan los principales impactos de las fugas en la operación de las redes de distribución.

Pérdida de agua y reducción en la disponibilidad del recurso. El impacto más directo de las fugas es la pérdida de agua, que es un recurso cada vez más escaso. El agua que se desperdicia debido a las fugas no solo se pierde en términos volumétricos, sino que también representa un derroche económico, ya que el sistema debe generar y distribuir agua para suplir las pérdidas (Thornton et al., 2008; Bustamante et al., 2022). Esta situación reduce la cantidad de agua disponible para los consumidores finales, afectando la cobertura del servicio en áreas donde la demanda es alta o las reservas de agua son limitadas (Reyes, 2019).

Incremento de los costos operativos y mantenimiento. Las fugas de agua incrementan los costos operativos de la red, tanto por el volumen de agua que se pierde como por las actividades necesarias para detectar y reparar las fugas (Martínez, 2018). Cuando una fuga no es identificada a tiempo, la pérdida puede convertirse en un problema mayor, lo que obliga a realizar reparaciones más costosas y complejas (Arboleda, 2020). Los costos asociados a la reparación de fugas incluyen:

- **Mano de obra especializada.** La identificación, localización y reparación de fugas requieren personal técnico capacitado y el uso de equipos avanzados.
- **Materiales y componentes.** El reemplazo de tuberías o la instalación de nuevos dispositivos (válvulas, juntas, conexiones) genera un gasto adicional.
- **Tiempo de inactividad.** Durante la intervención para reparar las fugas, las partes de la red pueden quedar fuera de servicio.
- **Energía eléctrica.** Aparte de la pérdida de agua, las fugas pueden llevar a un consumo innecesario de energía, especialmente cuando el sistema necesita trabajar más para mantener la presión o el volumen de agua requerido.

Pérdidas de presión y alteración en el flujo del agua. Las fugas pueden alterar la distribución de presión en la red, lo que tiene un efecto en cadena sobre el flujo de agua. En los sistemas de distribución presurizados, la presión es un parámetro crítico que garantiza que el agua fluya adecuadamente a través de las tuberías y llegue a los puntos de consumo con la calidad y cantidad requeridas.

Cuando una fuga ocurre, especialmente en puntos cercanos a las estaciones de bombeo o en áreas de alta presión, puede provocar una caída local en la presión del sistema. Esta caída de presión afecta a los usuarios aguas abajo de la fuga, quienes pueden experimentar interrupciones en el suministro o disminución en el caudal de agua disponible (Farah & Shahrou, 2024).

Aumento de los riesgos de contaminación del agua. Las fugas en redes presurizadas, especialmente en zonas subterráneas o en áreas de difícil acceso, pueden ser puntos de vulnerabilidad para la calidad del agua. Si las fugas se producen cerca de fuentes de contaminación, como aguas residuales o aguas pluviales, existe el riesgo de que sustancias indeseables ingresen a la red de distribución (Ladera et al., 2025; Rathore et al., 2023). Este fenómeno se conoce como infiltración cruzada y puede comprometer la potabilidad del agua suministrada a los usuarios. En estos casos, la reparación de la fuga es urgente no solo para evitar la pérdida de agua, sino también para prevenir problemas de salud pública (Chaudhry, 2014).

Deterioro de la infraestructura y mayor desgaste de los componentes. Las fugas no controladas, especialmente las de largo plazo, pueden acelerar el desgaste y la corrosión de las tuberías y otros componentes del sistema de distribución. El agua que se filtra desde las tuberías genera un ambiente húmedo y corrosivo que puede afectar las estructuras circundantes, como el asfalto, las aceras y las cimentaciones de los edificios cercanos. Con el tiempo, el agua filtrada puede socavar la estabilidad de la red, aumentando la probabilidad de fallos adicionales (Silva et al., 2024; Lamaddalena & Pereira 2007).

1.4. Causas comunes de fugas en redes de distribución de agua

1.4.1. Causas estructurales

1.4.1.1. Fracturas en tuberías. Las fracturas en las tuberías pueden originarse por un diseño deficiente, el uso de materiales de baja calidad o el envejecimiento natural del sistema (Serafeim et al., 2024). Las conducciones sometidas a esfuerzos excesivos, impactos mecánicos o cargas no previstas pueden desarrollar grietas o rupturas, generando puntos críticos de fuga. Este tipo de daño también puede ser consecuencia de la fatiga del material, especialmente en redes hidráulicas con largos años de operación sin mantenimiento preventivo ni renovación estructural (véase Figura 2).

1.4.1.2. Corrosión en materiales.

La corrosión es un proceso químico que deteriora los materiales metálicos, en particular el acero y el hierro fundido, como resultado de la interacción continua con el agua y el oxígeno (Reyes, 2019). A lo largo del tiempo, las tuberías afectadas por la corrosión pierden su integridad estructural, lo que facilita la formación de fisuras o perforaciones por donde puede escaparse el agua (Martínez, 2018). Este fenómeno también debilita las uniones y conexiones dentro de la red, aumentando el riesgo de rupturas y fugas (véase Figura 3). En los sistemas de agua potable, las tuberías metálicas son especialmente susceptibles si no reciben un mantenimiento preventivo adecuado.

1.4.1.3. Fugas por uniones defectuosas. Las uniones o empalmes entre tramos de tuberías y componentes del sistema, como



Figura 2. Falla en tubería por falta de mantenimiento

Nota. Imagen tomada de Fuga en tubería
[Fotografía], por Pixabay, 2021.



Figura 3. Falla en conexión de accesorio por corrosión

Nota. Tomado de Volante y válvula de cierre
[Fotografía], por Pixabay, 2018.

válvulas o accesorios, pueden volverse defectuosas por diversas causas, entre ellas sellados inadecuados, defectos de fabricación o errores durante la instalación (Silva et al., 2024). Estos puntos de conexión son particularmente vulnerables a la aparición de fugas si no se ajustan o sellan correctamente en las etapas de montaje o mantenimiento (véase Figura 4).

Además, las uniones defectuosas pueden deteriorarse más rápidamente debido a la presión interna del sistema, lo que favorece el debilitamiento de los materiales y la generación de nuevas fugas.

1.4.1.4. Fallos en válvulas y accesorios.

Las válvulas y accesorios, como codos, reductores y tees, son componentes fundamentales en las redes de distribución de agua, ya que permiten controlar el flujo y la presión dentro del sistema. Cuando estos elementos presentan fallas ocasionadas por mantenimiento inadecuado, desgaste mecánico o defectos de fabricación, pueden convertirse en puntos críticos de fuga.



Figura 4. Fuga de agua en unión mal instalada
Nota. Tomado de Power plant project activity for water treatment plant and checking equipment [Fotografía], por Vecteezy, 2020.

Un ejemplo frecuente es el mal funcionamiento de las válvulas que no logran un sellado hermético, lo cual permite la fuga de agua a través de las juntas o partes móviles. Asimismo, la obstrucción o el deterioro de estos dispositivos puede provocar un aumento de presión interna, lo que incrementa la probabilidad de fallas estructurales en el sistema (véase Figura 5).

1.4.2. Causas Operativas

1.4.2.1. Excesiva presión en la red. Las redes de distribución de agua deben operar dentro de un rango de presión controlado que garantice un flujo eficiente sin comprometer la integridad de las tuberías ni de sus componentes (Fox et al., 2021). Cuando la presión excede los niveles de diseño, se genera un esfuerzo adicional sobre las conducciones y

accesorios, lo que incrementa significativamente el riesgo de fallos estructurales y fugas (véase Figura 6).

La sobrepresión en las redes de agua puede originarse por diversas causas, comprometiendo la vida útil y la seguridad de la infraestructura. Las causas más comunes incluyen:

Problemas en el control de equipos. El funcionamiento deficiente de las bombas y la falta de calibración o ausencia de válvulas de alivio son factores fundamentales. Estos equipos permiten mantener la presión dentro de los límites de diseño; cuando fallan, pueden provocar picos de presión repentinos y sostenidos que afectan la integridad del sistema.

Manejo inadecuado de la red. La operación de la red, especialmente durante el llenado y vaciado de tuberías, requiere un control minucioso durante todo el proceso. No considerar la ventilación y extracción de aire puede causar fenómenos transitorios o golpes de ariete, además de cavitación. Del mismo modo, la apertura y el cierre brusco de válvulas son causas directas de la generación de transitorios hidráulicos.

Falta de protección contra transitorios hidráulicos. La infraestructura que no cuenta con protecciones adecuadas contra estos fenómenos, como válvulas anti-ariete, cámaras de aire o tanques de amortiguación,



Figura 5. Válvula de paso desgastada

Nota. Tomado de Válvulas [Fotografía], por Pixabay, 2019.



Figura 6. Fuga de agua por exceso de presión

Nota. Tomado de Power plant project activity for water treatment plant and checking equipment [Fotografía], por Vecteezy, 2020.



es vulnerable. Las ondas de sobrepresión y subpresión comprometen la estructura de las tuberías y accesorios, aumentando el riesgo de fallas.

Estas condiciones, al generar un estrés adicional en la red y fatiga de los materiales, reducen la durabilidad y confiabilidad del sistema. Esto incrementa el riesgo de pérdidas de agua por fugas y fallos estructurales.

1.4.2.2. Vibraciones de las tuberías.

Las vibraciones en las tuberías pueden generarse por múltiples causas, entre las que se incluyen el funcionamiento de bombas (véase Figura 8), cambios bruscos de presión ocasionados por la apertura o cierre repentino de válvulas (véase Figura 7), así como la circulación de maquinaria pesada en las inmediaciones de la red hidráulica.

Un manejo inadecuado de las válvulas puede inducir fenómenos transitorios, como el golpe de ariete, el cual implica un aumento súbito de presión que puede comprometer la integridad de la infraestructura (Fox et al., 2021). Adicionalmente, existen otras fuentes de vibración asociadas a intervenciones operativas en la red, tales como el purgado del sistema durante trabajos de mantenimiento, la conexión de hidrantes de abastecimiento en caso de incendio y el registro de consumo en los medidores de acometidas domiciliarias (Montoya & Montoya, 2012).



Figura 7. Válvulas de paso de sistema de riego

Nota. Fotografía obtenida en campo por el autor, 2024.



Figura 8. Bombas del sistema de impulsión

Nota. Fotografía obtenida en campo por el autor, 2024.

1.4.3. Causas externas

1.4.3.1. Daños físicos (excavaciones, impacto de vehículos).

Las excavaciones o actividades de construcción realizadas en las proximidades de la red de agua pueden provocar daños en las tuberías, ya sea por impactos directos con maquinaria o por la presión ejercida sobre los conductos durante el movimiento de tierras (véase Figura 9). Este tipo de afectaciones representa un riesgo significativo, especialmente cuando no se cuenta con planos actualizados o cuando no se delimitan correctamente las zonas de intervención.

Asimismo, el tránsito de vehículos pesados sobre sectores donde las tuberías están enterradas puede generar cargas verticales que exceden la resistencia estructural del material, originando fisuras o roturas. Estos daños físicos son más comunes en zonas donde las redes hidráulicas se encuentran instaladas a poca profundidad o en áreas urbanas con alto flujo vehicular (Martínez, 2018).

1.4.3.2. Daños por crecimiento de raíces.

Las fugas de agua causadas por la intrusión de raíces representan un problema frecuente en sistemas de tuberías subterráneas. Las raíces de árboles y plantas, al crecer en busca de humedad, tienden a invadir las conducciones de agua, especialmente cuando estas se encuentran enterradas a poca profundidad o en zonas con alta densidad de vegetación (véase Figura 10).



Figura 9. Ruptura de tubería por mantenimiento
Nota. Fotografía obtenida en campo por el autor, 2024.

Este fenómeno ocurre con mayor frecuencia en redes antiguas, con juntas deterioradas o microfisuras, a través de las cuales las raíces pueden penetrar. Una vez dentro del sistema, las raíces no solo obstruyen el flujo, sino que también pueden fracturar el material de la tubería, generando fugas y daños estructurales adicionales.

1.4.3.3. Conexiones clandestinas.

Las conexiones clandestinas se producen cuando individuos o entidades se enlazan ilegalmente a la red de suministro de agua sin contar con la autorización de las autoridades competentes (véase Figura 11). Este tipo de práctica constituye una infracción técnica y legal, y puede comprometer tanto la integridad de la red hidráulica como la sostenibilidad del sistema de distribución. Las razones por las cuales ocurren estas conexiones irregulares son diversas y, en muchos casos, están relacionadas con factores sociales, económicos o de gestión ineficiente. A continuación, se describen las motivaciones más comunes:



Figura 10. Ruptura de tubería por la presencia de raíces

Nota. Elaboración propia.

- **Evasión de pagos.** Al conectarse ilegalmente, los usuarios evitan abonar las tarifas correspondientes por el servicio, lo cual representa una pérdida directa para la entidad operadora.
- **Reducción de costos.** Algunas personas o empresas optan por evitar los gastos asociados con una conexión formal, incluyendo derechos de conexión, instalación de medidores y cánones mensuales.
- **Acceso sin restricciones.** En sectores donde el suministro de agua es limitado, intermitente o sujeto a restricciones, se recurre a conexiones clandestinas para obtener un abastecimiento constante.
- **Ausencia de infraestructura formal.** En áreas urbanas marginales o zonas rurales, la falta de redes de distribución adecuadas puede inducir a las comunidades a establecer conexiones ilegales como una medida de necesidad.

- **Deficiencia del servicio oficial.** Cuando el sistema de suministro es insuficiente o poco confiable, algunos usuarios recurren a medios alternativos, incluyendo la instalación de derivaciones no autorizadas.
- **Falta de regulación y control.** En contextos donde las autoridades tienen capacidades limitadas para monitorear y fiscalizar la red, la percepción de impunidad fomenta este tipo de prácticas.

Estas conexiones no autorizadas pueden generar pérdidas significativas de agua, afectar la presión del sistema y dificultar el control operativo de la red. Además, comprometen la equidad en el acceso al recurso y obstaculizan la sostenibilidad económica de los servicios públicos.

1.5. Conceptos operativos clave en la gestión de pérdidas

La gestión eficiente de las pérdidas de agua en redes de distribución requiere no solo de métodos instrumentales, sino también de herramientas conceptuales y operativas que permitan cuantificar, localizar y reducir las pérdidas reales. Entre los conceptos fundamentales que sustentan las estrategias modernas de control de fugas se encuentran el balance hidráulico, la sectorización de la red y el análisis del caudal mínimo nocturno. Estos elementos constituyen la base metodológica promovida por organismos internacionales como la International Water Association (IWA) para establecer diagnósticos precisos y planes de intervención eficaces.



Figura 11. Conexiones ilegales al suministro de agua potable

1.5.1. Balance hidráulico

El balance hidráulico, también conocido como auditoría del agua, es una herramienta contable que permite cuantificar con precisión los volúmenes de agua que ingresan, se consumen, se pierden o no se contabilizan dentro de un sistema de distribución. Esta metodología clasifica el uso del agua en categorías específicas y permite identificar la proporción correspondiente a pérdidas reales y aparentes.

Según la IWA, el balance hidráulico se construye con base en cuatro componentes principales:

- **Agua suministrada al sistema.** Volumen total de agua que entra en la red desde las fuentes de abastecimiento.
- **Agua facturada autorizada.** Agua registrada como consumo legal y efectivamente cobrada a los usuarios.
- **Pérdidas aparentes.** Derivan de errores de medición, fraudes o conexiones ilegales.
- **Pérdidas reales.** Representan el volumen de agua que se pierde físicamente por fugas en las tuberías, accesorios o conexiones.

Este análisis se expresa en forma tabular o diagramática (como el “Water Balance IWA”) y es el punto de partida para determinar indicadores como el Índice de Agua No Contabilizada (ANC), el Índice de Pérdidas Reales (IPR) o la eficiencia hidráulica del sistema.

1.5.2. Sectorización de la red (District Metered Areas - DMA)

La sectorización consiste en dividir la red de distribución en sectores hidráulicamente independientes, denominados áreas con macromedición o District Metered Areas (DMA). Cada uno de estos sectores cuenta con uno o más puntos de entrada medidos, válvulas de cierre controladas y, en algunos casos, medidores en puntos de salida. Este enfoque facilita el monitoreo sistemático del comportamiento hidráulico del sistema y permite:

- Detectar aumentos anómalos de caudal o presión en zonas específicas.
- Aislar y priorizar áreas con alta probabilidad de fugas.
- Evaluar la efectividad de las reparaciones o intervenciones.
- Mejorar la eficiencia operativa al reducir las pérdidas reales y aparentes.

La sectorización también permite una mejor gestión de presiones, reduce el tiempo de respuesta ante incidentes y facilita el uso de tecnologías avanzadas como la modelación hidráulica y los sistemas SCADA. Su implementación requiere un levantamiento topológico detallado y una estrategia de instalación de válvulas, macromedidores y data loggers.

1.5.3. Caudal mínimo nocturno

El caudal mínimo nocturno (CMN) es una herramienta analítica utilizada para la detección indirecta de fugas dentro de un sector o DMA. Este indicador se obtiene midiendo el flujo de agua que entra a un sector durante el periodo de menor demanda, típicamente entre las 2:00 y 4:00 a. m., cuando el consumo legítimo es mínimo o nulo.

Si durante este intervalo se registra un caudal constante elevado, es probable que se esté produciendo una pérdida no visible, ya que las fugas continúan liberando agua incluso en ausencia de consumo. El CMN se interpreta comparándolo con:

- El consumo mínimo esperado (calculado en función del número de usuarios y hábitos locales).
- Los datos históricos del sector.
- Modelos hidráulicos calibrados.

Cuando el caudal medido supera significativamente el estimado, se recomienda realizar campañas de detección directa con equipos acústicos, gases trazadores o correladores. Este método es especialmente útil en redes sectorizadas, con medición continua mediante data loggers o sistemas de telemetría.

1.5.4. Importancia operativa

La incorporación de estos tres conceptos en la gestión de redes permite a los operadores:

- Optimizar la asignación de recursos técnicos y humanos.
- Diseñar estrategias proactivas de mantenimiento y renovación de infraestructura.
- Sustentar decisiones basadas en indicadores cuantitativos y no solo en evidencias visuales o sonoras.
- Integrar la detección de fugas dentro de un modelo de gestión de activos.

En conjunto, el balance hidráulico, la sectorización y el caudal mínimo nocturno constituyen pilares estratégicos para una detección de fugas más eficiente, sistemática y basada en datos, alineada con las buenas prácticas internacionales en el ámbito de la ingeniería hidráulica urbana (Cembrano et al., 2014).

CAPÍTULO

2

EQUIPOS UTILIZADOS EN LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS DE AGUA



La detección de fugas en redes de agua potable es un desafío constante para las autoridades municipales, las empresas de servicios públicos y los operadores de infraestructuras (Martínez, 2018). La conservación del agua y la gestión eficiente de los recursos hídricos son prioridades fundamentales en un mundo donde el suministro de agua dulce es cada vez más escaso y su conservación es sumamente importante (Cheng et al., 2025).

En este contexto, los equipos acústicos emergen como una herramienta invaluable para la localización temprana y precisa de fugas en las redes de agua potable. Estos equipos se basan en el principio de que el flujo de agua a través de una tubería produce un sonido característico que puede ser captado y analizado para identificar la ubicación y la magnitud de la fuga (Fan et al., 2022).

2.1. Clasificación de las fugas de agua

La clasificación de las fugas de agua es fundamental para entender y abordar los problemas relacionados con el suministro de agua en diferentes entornos, ya sea en hogares, edificios comerciales o infraestructuras públicas. Una clasificación comúnmente utilizada distingue entre fugas visibles y no visibles, cada una con sus propias características y desafíos particulares (Nishikawa & Udo, 1982). Estas categorías se refieren a la capacidad de detectar la fuga a simple vista o si se requieren métodos de detección especializados para identificarla (Fox et al., 2021).

2.1.1. Fugas de agua visibles

Las fugas visibles son aquellas que pueden identificarse directamente mediante inspección visual. Suelen manifestarse en forma de goteos, chorros o acumulaciones de agua en zonas donde no debería haber presencia de líquido (Martínez, 2018). Este tipo de fugas es común en grifos, tuberías expuestas, sistemas de riego y en instalaciones sanitarias de uso doméstico o institucional.

Dado que su detección no requiere equipos especializados, la identificación y reparación de fugas visibles suele ser un proceso rápido y directo, lo que permite intervenir de manera oportuna para evitar pérdidas mayores (véase Figura 9).

Características. Las fugas visibles presentan atributos específicos que permiten su rápida detección y atención. A continuación, se detallan sus principales características:

- **Evidencia visual.** Este tipo de fugas suele estar acompañado de signos perceptibles a simple vista, lo que permite su identificación sin necesidad de instrumentos especializados.
- **Localización rápida.** Dado que son evidentes, su ubicación y reparación pueden realizarse con mayor rapidez, lo cual reduce el tiempo de intervención y minimiza el desperdicio de agua.
- **Potencial de daño.** Aunque son más fáciles de detectar, si no se atienden de manera oportuna pueden ocasionar daños significativos a la propiedad, como la degradación de elementos estructurales o el deterioro de materiales (véase Figura 12).

2.1.2. Fugas de agua no visibles

Las fugas no visibles son más sutiles y difíciles de detectar mediante inspección visual directa. Este tipo de fugas puede presentarse en el interior de muros, bajo la superficie del suelo, en sistemas de alcantarillado o en otras infraestructuras subterráneas (Reyes, 2019; véase Figura 13). A menudo, este tipo de pérdidas pasa desapercibido durante períodos prolongados, lo que puede ocasionar daños estructurales, desperdicio significativo de agua y aumentos sustanciales en los costos operativos del sistema de suministro (Farah & Shahrour, 2024).



Figura 12. Fuga en la red de agua potable
 Nota. Tomado de Tubería rota con palanca
 [Fotografía], por Freepik, 2010.

► Características

- **Detección especializada.** La identificación de fugas no visibles requiere el uso de técnicas y equipos especializados, tales como inspección mediante cámaras de video, dispositivos de ultrasonido, correladores acústicos o pruebas de presión (Fox et al., 2021).
- **Pérdida silenciosa.** Debido a que este tipo de fugas no son evidentes a simple vista, puede permanecer sin ser detectado durante períodos prolongados, lo que conlleva un desperdicio constante de agua, así como daños ocultos en la infraestructura.
- **Mayor dificultad de reparación.** La naturaleza no visible de estas fugas complica su localización y reparación, lo cual puede requerir intervenciones prolongadas, particularmente si se encuentran en zonas de difícil acceso (Reyes, 2019; véase Gráfica 1).



Gráfica 1. Simulación de fuga en campo, bajo condiciones controladas, obtenida con datos de campo
Laboratorio de Hidráulica - UTPL, 2024.

► Subcategorías de las fugas no visibles

- **Fugas de fondo.** También denominadas “fugas indetectables”. Se refieren a aquellas fugas cuyos valores aproximados de caudal son de hasta 10 litros por hora. La detección temprana de las fugas de fondo requiere tecnologías especializadas como sensores acústicos y pruebas de presión para monitorear las condiciones dentro del sistema (Reyes, 2019).
- **Fugas no comunicadas.** Las fugas no comunicadas pueden clasificarse en dos tipos: aquellas difíciles de detectar, con un caudal de entre 10 L/h y 200 L/h, y las que son fácilmente detectables, cuyo caudal puede variar de 200 L/h a 500 L/h. Aunque no son perceptibles a simple vista, estas fugas pueden ocasionar un daño importante a las infraestructuras si no se detectan a tiempo. Se pueden localizar mediante equipos avanzados como cámaras termográficas, tecnología de ultrasonido o pruebas de presión en conductos y sistemas cerrados (véase Gráfico 2).



Gráfica 2. Tipos de fugas por su caudal y criterio de rentabilidad

2.1.3. Clasificación de las fugas según el balance de IWA

El balance de IWA (International Water Association) proporciona un marco útil para comprender y clasificar las pérdidas de agua dentro de los sistemas de distribución. Este modelo es fundamental para identificar las diferentes fuentes de pérdidas y gestionar de manera más eficiente los recursos hídricos, ayudando a las autoridades y empresas de agua a enfocar sus esfuerzos en las áreas que más lo requieren. Dentro de este marco, las fugas de agua se clasifican en fugas aparentes y fugas reales.

► Fugas aparentes

Se refieren a las pérdidas de agua que no son el resultado de daños físicos en el sistema, sino que provienen de errores en la medición, fraude o facturación incorrecta. También se trata de aquellos volúmenes de agua que son consumidos sin que la compañía tenga identificado el punto de consumo. Esto incluye, por ejemplo:

- **Errores de medición.** Cuando los medidores de agua no funcionan correctamente o no se calibran adecuadamente, lo que resulta en lecturas incorrectas.
- **Fraude o acometidas no autorizadas.** Casos en los que los usuarios manipulan los medidores de agua o se conectan ilegalmente al sistema de suministro.
- **Fugas en la medición.** Situaciones donde las fugas no son visibles, pero el sistema no puede medir con precisión el agua que se pierde debido a fallos en los medidores o el software de facturación.

Estas fugas tienen un impacto económico muy significativo debido a los ingresos perdidos y la necesidad de corregir los procesos de medición y facturación. La identificación y corrección de las fugas aparentes generalmente se abordan mediante mejoras en la gestión administrativa y el control de los equipos de medición.

► Fugas reales (físicas)

Por otro lado, las fugas reales o fugas físicas ocurren debido a la rotura o deterioro de las infraestructuras del sistema de distribución de agua, como tuberías, válvulas, uniones y otros componentes estructurales.

Estas fugas tienen el mayor impacto en el suministro de agua y la sostenibilidad del sistema, ya que resultan en una pérdida física del recurso y pueden causar daños a las infraestructuras. Hasta la fecha, es imposible eliminar por completo este tipo de escapes de la red, ya que aún no existen sistemas de abastecimiento totalmente estancos.

Las fugas reales son el foco principal de este documento, dado que se trata de un tipo de pérdida que afecta directamente la cantidad de agua disponible, así como el costo operativo del sistema de distribución. La detección temprana de estas fugas es crucial para minimizar su impacto y evitar que el agua se desperdicie, lo que requiere el uso de tecnologías avanzadas y equipos especializados para localizarlas de manera rápida y precisa.

Entre los principales desafíos asociados con las fugas reales se encuentran:

- **Dificultad de localización.** Muchas fugas ocurren bajo el suelo o en lugares de difícil acceso, lo que hace que su localización sea más compleja y costosa.
- **Impacto económico.** Las fugas físicas aumentan los costos operativos, no solo por la pérdida de agua, sino también por las reparaciones y el mantenimiento necesario para reparar las infraestructuras dañadas.
- **Daños a las infraestructuras.** Si no se detectan a tiempo, las fugas reales pueden ocasionar un deterioro considerable en las estructuras de las tuberías, lo que puede resultar en averías mayores, inundaciones y daños a las propiedades cercanas.



En este contexto, el estudio y análisis de las fugas reales es esencial para proponer soluciones eficaces en la detección, localización y reparación de las fugas en los sistemas de distribución de agua. Esta investigación se enfoca en las fugas físicas, ya que son las que presentan mayores desafíos tanto para la eficiencia del sistema como para la gestión adecuada del recurso hídrico.

2.2. Objetivo de la detección y localización de fugas de agua

A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas tecnologías para la detección de fugas de agua, que abarcan desde métodos tradicionales hasta soluciones tecnológicas avanzadas (Ladera et al., 2025). Estas herramientas desempeñan un papel crucial en la identificación temprana de fugas, ya que permiten una intervención rápida y eficaz, lo cual contribuye a minimizar el desperdicio del recurso hídrico y a prevenir daños estructurales significativos (Serafeim et al., 2024). En las siguientes secciones, se describen algunas de las tecnologías más relevantes empleadas en la detección de fugas en sistemas de distribución de agua.

2.3. Equipos acústicos utilizados en la detección y localización de fugas de agua

Los equipos acústicos permiten detectar sonidos característicos generados por fugas de agua en tuberías subterráneas o sistemas de plomería. Estos sonidos pueden incluir goteo, burbujeo o el paso de agua a presión a través de una abertura en la tubería. La identificación de estos patrones acústicos facilita la localización precisa de la fuga sin requerir excavación directa.

► Caudalímetro

Un caudalímetro es un dispositivo utilizado para medir el flujo de un fluido, como agua, aire, gas o petróleo (Martínez, 2018). Estos instrumentos se emplean en una amplia gama de aplicaciones industriales, comerciales y domésticas, permitiendo monitorear y controlar el flujo en sistemas de tuberías (véanse Figuras 13 y 14).

► Funcionamiento

Los caudalímetros operan midiendo variables como la velocidad, la presión o los cambios en el movimiento del fluido, a fin de determinar el caudal. Existen diversos tipos de caudalímetros, cada uno con principios de funcionamiento específicos (Farah & Shahrour, 2024), entre los cuales se destacan los siguientes:

- **Caudalímetros de desplazamiento positivo.** Miden el volumen de fluido desplazado a través de cámaras o compartimentos. Cada ciclo de desplazamiento es contabilizado y convertido en una medida de caudal (Rathore et al., 2023; Farley & Trow, 2003).
- **Caudalímetros electromagnéticos.** Funcionan con base en el principio de inducción electromagnética para medir la velocidad del fluido en una tubería. La velocidad está relacionada con el voltaje inducido en los electrodos, lo que permite calcular el caudal (Fox et al., 2021).
- **Caudalímetros ultrasónicos.** Utilizan ondas ultrasónicas para medir el tiempo que tarda un pulso en viajar a través del fluido en direcciones opuestas. La diferencia de tiempo se emplea para calcular la velocidad y, por ende, el caudal (Martínez, 2018).
- **Caudalímetros de turbina.** Incorporan una turbina que gira por efecto del flujo del fluido. La velocidad de rotación es proporcional a la velocidad del fluido, lo que permite calcular el caudal (Rathore et al., 2023; Farley & Trow, 2003).

► Aplicaciones

- **Industria química y petroquímica.** Para medir el flujo de productos químicos y petroquímicos en procesos de producción.
- **Industria alimentaria y farmacéutica.** Para controlar el flujo de ingredientes y productos durante la fabricación de alimentos y medicamentos.

- **Abastecimiento de agua y saneamiento.** Para medir y controlar el caudal en sistemas de distribución, tratamiento y recolección de aguas residuales.
- **Industria energética.** En aplicaciones relacionadas con la medición de flujo de combustibles, gases y otros fluidos utilizados en la generación de energía.
- **Monitoreo ambiental.** Para la medición del flujo de gases en sistemas de ventilación y control ambiental, así como en estudios de calidad del aire.



Figura 13. Caudalímetro Thermo Scientific en funcionamiento

Nota. Fotografía obtenida en campo; equipos propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.



Figura 14. Caudalímetro ChronoFlo 2 en funcionamiento

Nota. Fotografía obtenida en campo; equipos propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.

► Data loggers de presión

Un data logger de presión es un dispositivo electrónico diseñado para registrar y almacenar datos de presión a intervalos regulares de tiempo. Además, permite conservar los valores obtenidos en el sistema hidráulico para su posterior análisis (Nimri et al., 2023). Estos equipos se utilizan ampliamente en contextos que requieren monitoreo continuo y preciso de la presión, como en entornos industriales, investigaciones científicas, estudios ambientales y otras aplicaciones especializadas (Romagnoli et al., 2020).

► Funcionamiento

Los data loggers de presión incorporan sensores capaces de transformar la presión del fluido en una señal eléctrica proporcional, la cual es registrada por el dispositivo (Lyman et al., 2020). Esta información se almacena en una memoria interna o en tarjetas de almacenamiento externas, según el modelo del equipo. El registro de presiones es esencial para realizar análisis comparativos, lo que justifica el uso de estos dispositivos en diversos sistemas hidráulicos (véanse Figuras 16 y 17).

► Características

Los data loggers de presión presentan características técnicas que los hacen adecuados para múltiples entornos de aplicación:

- **Sensores de presión.** Utilizan diversos tipos de sensores según el rango de presión y el tipo de aplicación. Entre los más comunes se encuentran los sensores piezorresistivos, capacitivos y piezoeléctricos (Silva et al., 2024).
- **Precisión y resolución.** Estos dispositivos ofrecen alta precisión y resolución en la medición de presión, lo que permite detectar variaciones mínimas en el entorno o proceso monitoreado (Fox et al., 2021).
- **Intervalos de muestreo configurables.** Permiten establecer el intervalo entre lecturas, adaptando la frecuencia de muestreo a las necesidades específicas del sistema (Bruno et al., 2021).
- **Capacidad de almacenamiento.** Cuentan con memoria suficiente para registrar grandes volúmenes de datos durante largos períodos, reduciendo la necesidad de intervención humana (Martínez, 2018).
- **Conectividad y descarga de datos.** Algunos modelos ofrecen interfaces USB, Bluetooth o Wi-Fi, que facilitan la transferencia de datos a otros dispositivos para su análisis (Al-Washali et al., 2016).



Además, muchos data loggers modernos incorporan capacidades de comunicación remota mediante tecnologías móviles como 3G, 4G o LTE. Asimismo, algunos dispositivos están diseñados para operar con redes específicas de Internet de las Cosas (IoT), como NB-IoT, lo que permite una transmisión de datos eficiente y de bajo consumo hacia plataformas en la nube. Estas funciones amplían significativamente las posibilidades de monitoreo en tiempo real y de gestión remota en sistemas hidráulicos (Morgado et al., 2022; Wang et al., 2021).

► Configuraciones combinadas de Data loggers

Además de los data loggers dedicados exclusivamente a la medición de presión, existen configuraciones más avanzadas que integran sensores múltiples en un solo dispositivo. Entre los más utilizados se encuentran los data loggers del tipo Q+P, que permiten el registro simultáneo de datos de caudal (Q) y presión (P).

Esta combinación resulta especialmente útil para estudios de diagnóstico hidráulico, balance hídrico, detección de fugas y evaluación del rendimiento de redes de distribución de agua potable (Puust et al., 2010; Al-Washali et al., 2016). La capacidad de registrar ambas variables de forma sincronizada ofrece una visión más integral del comportamiento dinámico del sistema, facilitando análisis transitorios y validación de modelos hidráulicos.

► Aplicaciones

Los data loggers de presión se emplean en múltiples ámbitos técnicos y científicos, entre ellos:

- **Monitoreo ambiental.** Para registrar presión atmosférica, barométrica y del aire en estudios meteorológicos y de calidad del aire (Lyman et al., 2020).
- **Procesos industriales.** Para el control de presión en sistemas hidráulicos, neumáticos y procesos de producción industrial (Serafeim et al., 2024).

- **Investigación científica.** Utilizados en disciplinas como geología, hidrología, oceanografía, física y biología, donde se requiere monitorear presiones en distintos entornos (Martínez, 2018).
- **Control de calidad.** En las industrias alimentaria, farmacéutica y manufacturera, para asegurar que los procesos se mantengan dentro de los parámetros de presión establecidos.



Figura 16. Data loggers de presión en funcionamiento
Nota. Fotografía obtenida en campo; equipos propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.



Figura 17. Data logger de presión recopilando datos
Nota. Fotografía obtenida en campo; equipos propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.

► Correladores

Los correladores son dispositivos electrónicos de alta sensibilidad diseñados específicamente para la localización de fugas en tuberías a presión (véase Figura 17). Equipados con sensores y micrófonos ultrasensibles, estos instrumentos permiten estimar con precisión la ubicación de una fuga dentro de la red de tuberías (Fanner & Thornton, 2005; Farah & Shahrour, 2024).

Estos dispositivos acústicos se han consolidado como herramientas fundamentales en la ingeniería y gestión de sistemas de distribución de agua, gas y otros fluidos presurizados. Su principal función es la detección y localización de fugas en redes de conducción, tanto nuevas como existentes (Puust et al., 2010).

Gracias a sus avances tecnológicos, los correladores modernos permiten identificar fugas con alta precisión, incluso en condiciones complejas. Incorporan sensores avanzados, como micrófonos piezoeléctricos e hidrófonos, que se acoplan directamente a las tuberías, ofreciendo una sensibilidad significativamente superior a la de otros métodos convencionales (Karpf et al., 2021).

► **Funcionamiento**

El principio de operación de un correlador acústico se basa en la detección del sonido generado por una fuga. Para ello, el sistema dispone de micrófonos instalados estratégicamente en diferentes puntos de la red (Romagnoli et al., 2020). Estos micrófonos captan las ondas sonoras producidas por la fuga y transmiten la señal al equipo correlador, el cual compara las señales detectadas por cada sensor.

El análisis de la diferencia en los tiempos de llegada de las ondas permite calcular con alta precisión la distancia relativa entre los micrófonos y, en consecuencia, localizar el punto donde se origina la fuga (Reyes, 2019).

► **Tipos y procedimiento operativo**

Los correladores acústicos se clasifican, en términos funcionales, en dos categorías principales:

- **Correladores permanentes.** Diseñados para el monitoreo continuo de redes críticas, permanecen instalados en puntos estratégicos de la infraestructura, transmitiendo datos en tiempo real.
- **Correladores portátiles.** Son dispositivos móviles, utilizados en intervenciones puntuales. Debido a su versatilidad y facilidad de instalación, son los más empleados por los técnicos de campo en labores de detección y localización de fugas.

► Etapas del procedimiento en campo con correladores portátiles**1. Inspección preliminar**

Se realiza una evaluación inicial del tramo sospechoso mediante un geófono (ground stick), con el objetivo de detectar ruidos anómalos que sugieran la presencia de una fuga.

2. Selección de puntos de monitoreo

Se identifican dos puntos accesibles de la red (típicamente válvulas, acometidas o hidrantes), ubicados a ambos lados del tramo donde se presume que ocurre la fuga.

3. Instalación de sensores acústicos

Los sensores del correlador se acoplan a las tuberías en los puntos seleccionados. Estos dispositivos captan las ondas sonoras generadas por la fuga.

4. Adquisición y procesamiento de señales

El equipo correlador registra las señales acústicas provenientes de ambos sensores y calcula el desfase temporal entre ellas, correspondiente al tiempo de propagación del sonido.

5. Estimación de la ubicación de la fuga

Mediante algoritmos de correlación, el sistema determina la diferencia en los tiempos de llegada de las señales y calcula la distancia relativa al punto de fuga con alta precisión.

6. Verificación final e intervención

Con base en la localización estimada, se delimita el área de intervención, lo que permite reducir el alcance de las excavaciones y optimizar la reparación, minimizando costos y daños colaterales (Romagnoli et al., 2020; Reyes, 2019).

La principal ventaja de los correladores acústicos radica en su capacidad para detectar fugas ocultas, incluso en tuberías enterradas, sin necesidad de realizar excavaciones innecesarias. Esto reduce significativamente los costos operativos y los daños colaterales, además de contribuir a la conservación de recursos y al cumplimiento de normativas ambientales.

► Aplicaciones

Los correladores acústicos tienen un amplio rango de aplicaciones en diferentes sectores, entre los que se destacan los siguientes:

- **Sector de servicios públicos.** Utilizados por empresas proveedoras de agua y gas para detectar fugas en redes de distribución enterradas, incluso bajo pavimento o en áreas de difícil acceso. Facilitan la localización precisa de las fugas, optimizando las tareas de reparación y mantenimiento.
- **Industria petrolera y petroquímica.** Empleados para detectar fugas en tuberías que transportan fluidos a alta presión a lo largo de extensas distancias. Su uso permite reducir riesgos, evitar pérdidas de producto y proteger el entorno natural.
- **Sector de la construcción.** Utilizados en la verificación de la integridad de redes recién instaladas o en operación. Permiten identificar fallos de sellado o instalaciones defectuosas antes de que se presenten problemas mayores.
- **Mantenimiento de instalaciones industriales.** Aplicados en plantas químicas, refinerías o centrales eléctricas para prevenir interrupciones no planificadas y garantizar la seguridad operativa mediante la detección temprana de fugas.
- **Sector medioambiental.** Empleados en el monitoreo de sistemas de tratamiento de aguas residuales y vertederos, con el fin de prevenir la contaminación del suelo y del agua y garantizar el cumplimiento de normativas ambientales (Al-Washali et al., 2016).



- **Gestión de infraestructuras urbanas.** Utilizados para mantener en óptimas condiciones las redes de agua potable y gas en zonas urbanas. Su eficiencia en la detección de fugas ayuda a evitar interrupciones en los servicios básicos y reduce el impacto sobre la población.



Figura 17. Correlador MicroCorr Touch

Nota. Fotografía obtenida en el Laboratorio de Hidráulica; equipo propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.

► **Geófono**

El geófono es un equipo de medición acústica utilizado para la detección de fugas de agua en el subsuelo. Está compuesto por una pantalla que permite visualizar la intensidad del ruido generado, auriculares, y tres tipos de micrófonos, cada uno diseñado para adaptarse a diferentes condiciones del terreno (Jian et al., 2022).

Entre los componentes más comunes se encuentran: un micrófono acampanado, empleado sobre superficies duras como pavimento, hormigón, baldosa o cerámica; un micrófono tipo trípode, utilizado en superficies blandas como césped y tierra (véase Figura 18); y un micrófono en forma de barra con punta, destinado a la escucha directa sobre la tubería (Sanz & Rodríguez, 2011; Leite et al., 2024).

► **Funcionamiento**

En la localización de fugas de agua, los geófonos desempeñan un papel fundamental al detectar y registrar las vibraciones generadas por escapes en tuberías subterráneas. El procedimiento técnico seguido en campo comprende las siguientes etapas:



Figura 18. Geófono Xmic

Nota. Fotografía obtenida en el Laboratorio de Hidráulica; equipo propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.

1. **Colocación preliminar con ground stick.** Inicialmente, se utiliza un accesorio denominado ground stick, que consiste en una varilla de contacto directo con elementos de la red (válvulas, hidrantes, acometidas, etc.). Este instrumento permite al técnico detectar ruidos anómalos en puntos estratégicos de la infraestructura, ayudando a acotar la zona donde se sospecha la existencia de una fuga (Nimri et al., 2023).
2. **Instalación de los correladores (si aplica).** En casos que requieren mayor precisión o confirmación adicional, se proced. Estos equipos permiten correlacionar las señales acústicas a instalar correladores acústicos portátiles en puntos extremos del tramo sospechoso y calcular con mayor exactitud la ubicación de la fuga (Romagnoli et al., 2020).
3. **Detección localizada con geófono tipo campana.** Finalmente, se emplea el geófono con accesorio tipo campana, que se posiciona sobre el pavimento directamente encima del trazado de la tubería. Este dispositivo permite al operador desplazarse a lo largo del recorrido, escuchando en tiempo real las variaciones de intensidad del sonido, lo que facilita la localización puntual de la fuga.
4. **Análisis y confirmación.** Las vibraciones registradas por los sensores son convertidas en señales eléctricas, que pueden visualizarse o analizarse posteriormente. Se interpretan patrones característicos como aumentos repentinos de amplitud, cambios de frecuencia o persistencia del ruido para confirmar la existencia y ubicación precisa de la fuga (Martínez, 2018).

► Aplicaciones

Los geófonos tienen múltiples aplicaciones en el ámbito de la detección de fugas en sistemas de transporte de fluidos. A continuación se describen los principales escenarios de uso:

- **Redes de distribución de agua potable.** Se utilizan para localizar fugas en tuberías enterradas o bajo superficies pavimentadas, permitiendo monitoreo continuo de las vibraciones generadas por el flujo del agua y la detección de anomalías.
- **Redes de distribución de gas.** En estos sistemas, los geófonos permiten identificar cambios en las vibraciones del gas en movimiento, contribuyendo a la prevención de fugas con potencial riesgo para la seguridad.
- **Instalaciones industriales.** En plantas industriales y refinerías, ayudan a verificar la integridad de las redes que transportan productos químicos o combustibles, permitiendo una detección temprana que reduce el riesgo de incidentes graves.
- **Sistemas de calefacción y refrigeración.** En edificaciones con redes centralizadas, los geófonos son útiles para identificar fugas en tuberías de agua caliente o fría, evitando pérdidas de energía y daños estructurales.
- **Infraestructuras subterráneas.** También se emplean para localizar fugas en sistemas de alcantarillado, ductos de cableado y redes de fibra óptica, ayudando a prevenir inundaciones, fallos operativos y deterioro de servicios urbanos (Liu et al., 2024; Jian et al., 2022).

► **Cámaras termográficas y otros equipos avanzados**

Las cámaras termográficas, también conocidas como cámaras infrarrojas, son instrumentos diseñados para detectar y visualizar la radiación térmica emitida por los objetos en su entorno (Silva et al., 2019). Esta radiación se convierte en imágenes térmicas o termogramas, que permiten identificar variaciones de temperatura en las superficies inspeccionadas (véase Figura 19).

En redes de agua, estas cámaras son particularmente útiles para la detección de fugas, ya que el agua que escapa de las tuberías altera la temperatura del entorno inmediato. La diferencia térmica entre el agua y el medio circundante genera una anomalía térmica, visible en el termograma (Pan et al., 2020; Steele & Cohn, 2008).



Figura 19. Cámara termográfica

Nota. Tomado de Medidor de temperatura y termografía [Fotografía], por Pixabay, 2020.

► Funcionamiento

Las cámaras termográficas operan bajo principios físicos de detección de variaciones térmicas. Su funcionamiento incluye los siguientes aspectos:

- **Diferencia de temperatura.** Las fugas en redes hidráulicas enterradas provocan un cambio de temperatura en las superficies cercanas. Por ejemplo, en el caso de una fuga de agua fría, el suelo o el pavimento puede mostrar una reducción térmica detectable en el termograma (Broséus et al., 2021; Romagnoli et al., 2020).
- **Variación térmica en superficies adyacentes.** La interacción del agua con el suelo, vegetación o materiales estructurales altera su temperatura, generando patrones visuales distinguibles mediante termografía (Martínez, 2018; véase Figura 20).
- **Inspección en diferentes condiciones.** Estas cámaras pueden utilizarse tanto de día como de noche, ya que no requieren luz visible para su funcionamiento. La noche suele ser más favorable debido al mayor contraste térmico (Silva et al., 2024).



Figura 20. Presencia de humedad en pared por fuga de agua

Nota. Tomado de Foto del patrón de textura de la pared [Fotografía], por Freepik, 2010.

► Ventajas

- **Detección no invasiva.** Permiten identificar fugas sin necesidad de excavaciones ni daños estructurales, reduciendo costos y tiempo.
- **Identificación temprana de problemas.** Las cámaras termográficas pueden detectar pequeñas fugas antes de que ocasionen daños mayores.
- **Monitoreo continuo.** Pueden implementarse en inspecciones regulares, incluso en áreas de difícil acceso o donde la red no puede ser interrumpida.
- **Localización precisa.** Proveen imágenes detalladas que ayudan a identificar la ubicación exacta de la fuga, optimizando la intervención (Silva et al., 2019; Romagnoli et al., 2020).

Uso de otros métodos avanzados

Además de las cámaras termográficas, existen tecnologías complementarias que permiten mejorar la detección de fugas en redes presurizadas, entre ellas los sensores de humedad, la tecnología de ultrasonido y el uso de cámaras de video submarinas (Fox et al., 2021).

► Sensores de humedad

Los sensores de humedad están diseñados para medir la presencia de humedad en el suelo o estructuras. Al instalarse cerca de las tuberías, permiten detectar aumentos en la humedad relativa del entorno causados por fugas (Silva et al., 2019; Reyes, 2019).

► Características

- **Detección de fugas subterráneas.** Eficaces en casos donde el agua no emerge a la superficie (Sanz & Rodríguez, 2011).
- **Monitoreo de largo plazo.** Pueden instalarse de forma permanente en puntos críticos de la red para emitir alertas ante cambios anómalos de humedad (Fox et al., 2021).



- **Automatización.** Se integran con sistemas de monitoreo automatizado que generan alertas en tiempo real.

► Tecnología de ultrasonido

El ultrasonido se basa en la emisión y recepción de ondas sonoras de alta frecuencia para identificar fugas y anomalías estructurales. Es útil tanto en inspecciones superficiales como en medición de caudales y presión interna en tuberías (Jian et al., 2022).

► Características

- **Detección precisa de fugas.** Capta el sonido del agua escapando por fisuras, incluso en tuberías enterradas.
- **Medición en tiempo real.** Ofrece resultados inmediatos para decisiones operativas rápidas.
- **Detección de fugas pequeñas.** Su alta sensibilidad permite detectar fugas incipientes que serían indetectables mediante otros métodos.
- **Aplicación práctica.** Se emplean sensores acústicos fijos o dispositivos portátiles que identifican ondas ultrasónicas generadas por el flujo de agua (Leite et al., 2024; Puust et al., 2010; Martínez, 2018).

► Cámaras de video submarinas

En redes complejas o de difícil acceso (como sistemas de alcantarillado o tramos sumergidos), las cámaras de inspección de tuberías permiten obtener visualización directa del estado interno de la infraestructura.

► Ventajas

- Permiten inspecciones visuales sin necesidad de excavación.
- Al integrarse con sistemas de geolocalización, brindan información precisa para dirigir las reparaciones y evitar intervenciones innecesarias.

2.4. Tecnologías emergentes en la detección y localización de fugas de agua

Las fugas en las redes de distribución de agua potable son un desafío continuo para las autoridades y empresas responsables de la gestión del agua. La detección temprana de fugas es fundamental para evitar pérdidas de agua, daños a la componentes del sistema y elevados costos operativos. En este contexto, las tecnologías emergentes han revolucionado la manera en que se identifican y localizan las fugas, mejorando la precisión, eficiencia y rapidez de la intervención. A continuación, se describen algunas de las tecnologías más relevantes en este campo.

2.4.1. Sensores inteligentes

Los sensores inteligentes están revolucionando la manera en que monitoreamos las infraestructuras de distribución de agua. Instalados en las tuberías, estos dispositivos no solo detectan cambios en parámetros físicos como la presión, la temperatura y el flujo, sino que también pueden identificar comportamientos anómalos que podrían indicar la presencia de una fuga.

- **Detección precoz y eficiente.** Al ser capaces de enviar datos en tiempo real a los operadores, permiten la detección temprana de fugas antes de que se conviertan en problemas graves.
- **Automatización de alertas.** Estos sensores pueden configurarse para activar alarmas automáticamente cuando los valores registrados superen umbrales preestablecidos, lo que permite una intervención inmediata.



- **Integración en sistemas de gestión.** Los sensores inteligentes se pueden integrar con plataformas de gestión de infraestructuras, lo que facilita un enfoque holístico en la monitorización de toda la red de distribución.

2.4.2. Inteligencia artificial (IA)

La inteligencia artificial (IA) ha mostrado un enorme potencial para transformar la gestión de las fugas de agua. Los algoritmos de IA permiten analizar grandes volúmenes de datos recogidos por los sensores, ayudando a detectar patrones de fuga y optimizar el diagnóstico en tiempo real.

► Beneficios prácticos

- **Análisis predictivo.** La IA no solo identifica fugas actuales, sino que puede predecir dónde podrían ocurrir en el futuro, lo que facilita una gestión proactiva.
- **Optimización de recursos.** A través de la optimización del análisis de datos, los sistemas basados en IA pueden identificar las ubicaciones con mayor probabilidad de fuga, permitiendo una asignación más eficiente de los recursos y personal.
- **Reducción de intervenciones innecesarias.** Mediante la mejora en la precisión del diagnóstico, la IA minimiza las intervenciones innecesarias, lo que reduce costos y tiempos de reparación.

► Sistema de Información Geográfica (GIS)

El Sistema de Información Geográfica (GIS) ha ganado una relevancia destacada en la localización y gestión de fugas de agua. Al mapear y analizar datos geoespaciales, el GIS permite visualizar en tiempo real las fugas y los patrones de flujo de agua dentro de la red de distribución.

► Beneficios prácticos

- **Visualización detallada.** Proporciona mapas interactivos que permiten a los operadores ver en tiempo real las áreas más afectadas por fugas, facilitando la toma de decisiones rápida.
- **Mejora en la planificación.** Ayuda a planificar mejor el mantenimiento y las intervenciones en la red, ya que permite identificar las zonas más propensas a sufrir fugas debido a factores como la antigüedad de las infraestructuras o el tipo de terreno.
- **Optimización de la respuesta.** La integración de GIS con otros sistemas de monitoreo permite una gestión más eficiente y una rápida localización de las fugas, reduciendo así los tiempos de inactividad del sistema.

2.4.3. Telemetría

La telemetría se refiere al monitoreo remoto de datos que se recogen a través de sensores instalados en las redes de distribución de agua. Estos datos se transmiten en tiempo real, lo que permite a los operadores detectar problemas rápidamente sin necesidad de estar físicamente presentes.

► Beneficios prácticos

- **Monitoreo constante.** La telemetría proporciona un monitoreo en tiempo real, lo que permite detectar anomalías inmediatamente y tomar medidas correctivas antes de que se produzcan daños importantes.
- **Reducción de costos operativos.** Gracias a la capacidad de gestionar los sistemas de manera remota, la telemetría reduce la necesidad de desplazamientos costosos y largos tiempos de intervención.



- **Intervenciones rápidas.** La transmisión en tiempo real de datos sobre presión, flujo y otros parámetros permite a los operadores identificar precisamente dónde intervenir, reduciendo el impacto de las fugas en el servicio y optimizando los recursos disponibles.



CAPÍTULO

3

USO Y OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS EMPLEADOS EN LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA



En este capítulo se describe, de manera detallada y técnica, el procedimiento operativo de los principales equipos acústicos utilizados en la detección y localización de fugas de agua. La exposición se apoya en una serie de imágenes, registros y experiencias obtenidas directamente en campo, con el propósito de ilustrar de forma clara cada etapa del proceso de inspección.

Asimismo, se proporciona una guía metodológica que permite al lector comprender las condiciones óptimas de uso de los equipos, la interpretación de señales acústicas y los criterios técnicos para la toma de decisiones durante la intervención.

Al finalizar el capítulo, se presenta un caso de estudio aplicado, en el cual se documenta la detección y localización efectiva de una fuga en una red de distribución real. Este caso sirve como ejemplo práctico para demostrar el uso sistemático de los equipos y la obtención de resultados operacionales concretos a partir de su correcta aplicación en terreno.

3.1. Identificación de una fuga de agua

La identificación temprana de las fugas de agua en los sistemas de distribución de agua potable es de vital importancia debido a varios factores ya que estas fugas pueden causar daños significativos a la infraestructura subterránea y a las estructuras circundantes. El agua filtrada puede erosionar el suelo, debilitar cimientos de edificios, y deteriorar carreteras y calles, lo que conlleva costosos y a menudo prolongados procesos de reparación. Estos daños pueden ser aún más graves si las fugas no se detectan y reparan a tiempo, lo que podría resultar en colapsos estructurales y riesgos para la seguridad pública (Joseph et al., 2025).

3.2. Diferencia entre detección y localización de fugas de agua

La detección y localización de fugas de agua son dos procesos complementarios pero diferenciados en el ámbito de la gestión de recursos hídricos y la infraestructura de distribución. La detección tiene como objetivo identificar la presencia de fugas en el sistema, mientras que la localización se enfoca en precisar con exactitud el lugar donde se encuentran dichas fugas.

A continuación, se describirán las herramientas, equipos y técnicas empleadas en cada uno de estos procesos, detallando su funcionamiento y aplicabilidad para optimizar la eficiencia en la gestión de las redes de distribución.

3.2.1. Técnicas comunes para la detección de fugas de agua

La detección de fugas de agua comprende el conjunto de procedimientos destinados a identificar pérdidas no deseadas dentro de un sistema de distribución hidráulico. Estas pérdidas pueden representar tanto un desperdicio significativo de recursos como un riesgo estructural o económico si no se detectan a tiempo. Entre las técnicas más comunes empleadas para esta finalidad, se encuentran las siguientes:

► Análisis de consumo

Consiste en el monitoreo continuo del consumo de agua a través de registros históricos. Cualquier variación atípica en los patrones de consumo, especialmente durante periodos de baja demanda, puede ser indicativa de una fuga no visible.

Para aumentar la efectividad de este método, se implementa la sectorización de la red de distribución, dividiéndola en sectores hidráulicamente independientes (District Metered Areas, DMA), cada uno con medidores de entrada y, en algunos casos, de salida. Esta configuración permite evaluar el comportamiento del consumo en zonas específicas y detectar desviaciones con mayor precisión (Farley & Trow, 2003).

Uno de los indicadores más utilizados dentro de este enfoque es el caudal mínimo nocturno, que se refiere al flujo registrado durante las horas de menor actividad (generalmente entre las 2:00 y 4:00 a. m.), cuando el consumo legítimo es prácticamente nulo. Un caudal nocturno persistentemente elevado, sin justificación operativa, puede ser una señal clara de fuga dentro del sector analizado (Nimri et al., 2023).

► Inspección visual

Implica la observación directa de áreas donde se sospecha una fuga. Señales como manchas húmedas en paredes, suelos o superficies pavimentadas pueden evidenciar la presencia de una fuga oculta.

- **Pruebas de presión.** Este método se basa en cerrar temporalmente válvulas del sistema para aislar un sector específico, y luego monitorear si existe una pérdida de presión sostenida. Una disminución en la presión sin consumo aparente sugiere una posible fuga (véanse Figuras 21 y 22).



Figura 21. Manómetro registrando la presión del sistema de bombeo durante pruebas de presión
Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje (E.B. Curitroje), 2024.



Figura 22. Data loggers registrando presión durante pruebas en el sistema hidráulico
Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje (E.B. Curitroje), 2024.

3.2.1.1. Aforo volumétrico. El aforo volumétrico es un método utilizado para detectar fugas en sistemas hidráulicos, basado en la comparación de volúmenes medidos antes, durante y después de la operación del sistema de bombeo. Este procedimiento se aplica generalmente en instalaciones donde se dispone de un tanque de succión y un tanque de reserva.

El proceso inicia con la medición de los niveles de agua en ambos tanques, los cuales se registran como medida inicial. A continuación, se pone en funcionamiento la bomba centrífuga del sistema durante un período de cinco minutos. El tiempo de operación se controla mediante un cronómetro, registrando el momento de encendido de la bomba, el tiempo exacto en que el agua comienza a llegar al tanque de reserva y, finalmente, el momento en que se apaga la bomba.

Posteriormente, se registra el tiempo adicional durante el cual el agua continúa ingresando al tanque de reserva después de haber detenido la bomba. Esta información permite estimar el caudal transportado y contrastarlo con el volumen esperado según las especificaciones técnicas del sistema. Una desviación significativa puede indicar la presencia de una fuga en la red.

La bomba utilizada en este procedimiento es una bomba centrífuga GENERAL PUMPS (véase Figura 23), cuyas características técnicas se detallan a continuación (véase Figura 24):

- Caudal (Q): 22,9 m³/h
- Altura de impulsión: 56,0 – 76,5 m
- Potencia: 15 HP



Figura 23. Bomba 2 marca General Pumps en funcionamiento

Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje (E.B. Curitroje), 2024.



Figura 24. Placa de identificación de la Bomba 2 marca General Pumps

Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje (E.B. Curitroje), 2024.

Una vez realizado el encendido del sistema, se procede a registrar nuevamente el nivel del agua tanto en el tanque de succión como en el tanque de reserva. A partir de esta información, se calcula la diferencia de alturas en cada uno de los tanques. Esta diferencia se multiplica por el área transversal del tanque correspondiente, obteniéndose así el volumen de agua succionado en el tanque de succión y el volumen impulsado en el tanque de reserva.

Posteriormente, ambos volúmenes se comparan. En condiciones normales, los valores deberían ser similares; cualquier discrepancia significativa entre ellos podría indicar la existencia de una fuga en la línea de impulsión. Este procedimiento debe repetirse para cada una de las bombas que conforman el sistema de bombeo. Para asegurar la confiabilidad de los datos y permitir una verificación estadística adecuada, se recomienda realizar un mínimo de cinco aforos por bomba.

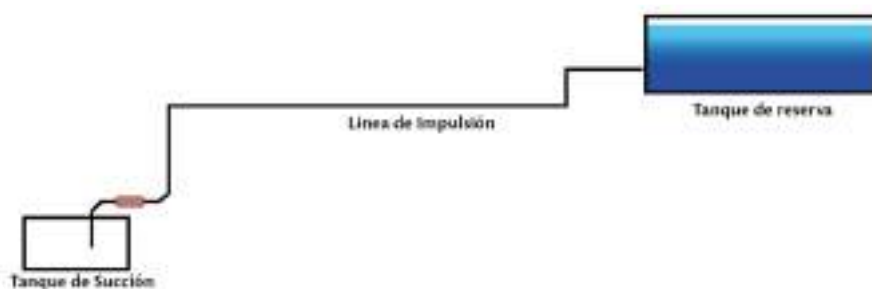


Figura 25. Esquema del sistema de bombeo, desde el tanque de succión hasta el tanque de reserva

Nota. Tomado de Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos. Zona: Centro Norte de Loja [Fotografía], por Jaramillo, 2023.

3.2.1.2. Aforo con caudalímetro

Los caudalímetros ultrasónicos son ampliamente utilizados en la actualidad para la medición de caudal en sistemas hidráulicos, debido a su alta precisión y facilidad de instalación. Estos dispositivos emplean ultrasonidos para calcular el flujo volumétrico de un fluido en movimiento, particularmente en tuberías de impulsión (véase Figura 26).

El principio de funcionamiento se basa en el uso de transductores dispuestos en configuraciones tipo V, W o Z, que emiten y reciben ondas ultrasónicas. A través del tiempo de tránsito de estas ondas, se genera un perfil de velocidad a lo largo de la trayectoria del sonido, permitiendo así una estimación precisa del caudal.



Figura 26. Caudalímetro ChronoFLO2 instalado y en funcionamiento

Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje; equipo propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.

A continuación, se describen los pasos recomendados para la instalación adecuada del caudalímetro y de sus sensores, a fin de garantizar una recolección de datos precisa y confiable.

► Instalación del caudalímetro

La correcta instalación del caudalímetro ultrasónico es fundamental para garantizar una medición precisa del caudal en redes hidráulicas. A continuación, se detalla el procedimiento recomendado:

1. **Preparación de la tubería.** Verificar que la superficie externa de la tubería donde se ubicarán los sensores esté completamente limpia y libre de pintura, óxido u otras obstrucciones que puedan interferir con la transmisión de las ondas ultrasónicas.
2. **Instalación de los transductores.** Los sensores deben colocarse en configuraciones tipo V, W o Z, dependiendo de diversos parámetros como el material de la tubería, el diámetro nominal, el espesor de la pared y las condiciones de operación.
3. **Aplicación de gel de acoplamiento.** Para optimizar la transmisión de señales entre los transductores y la tubería, se debe aplicar un gel especial en el punto de contacto. Este medio mejora la eficiencia de la lectura ultrasónica.



4. **Determinación del posicionamiento.** El diámetro de la tubería es un factor determinante en el posicionamiento exacto de los transductores, lo cual debe calcularse con precisión (véase Figura 27).

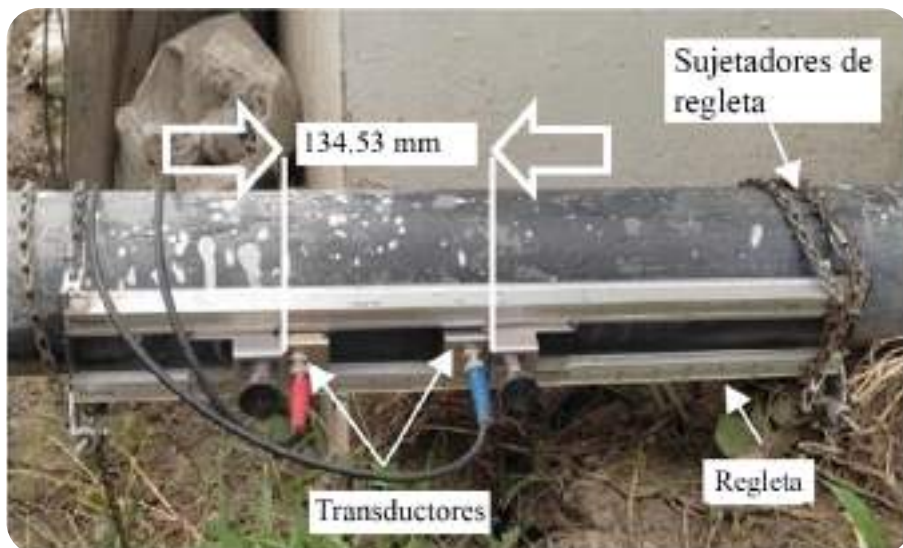


Figura 27. Transductores y regleta del caudalímetro instalados en la tubería

Nota. Fotografía obtenida en campo; equipo propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.

5. **Configuración del intervalo de medición.** Una vez instalado el dispositivo, se debe programar una frecuencia de registro de datos. En este caso, se establece un intervalo de 10 minutos para la recopilación continua (véase Figura 28).
6. **Disposición de los caudalímetros.** Para asegurar una evaluación completa del sistema, se recomienda instalar dos caudalímetros: uno en la línea de succión y otro en la línea de impulsión. Esta configuración permite comparar los valores de caudal succionado e impulsado, facilitando la detección de fugas o anomalías dentro de la red.



Figura 28. Caudalímetro ChronoFLO2 instalado y en funcionamiento

Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje; equipo propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.

3.2.2. Técnicas para la localización precisa de fugas

Una vez detectada la presencia de una fuga en el sistema de distribución, el siguiente paso es determinar con precisión su ubicación, a fin de realizar una intervención oportuna y eficaz. Para ello, se emplean diversas técnicas especializadas, entre las cuales se destacan las siguientes:

- **Geófono.** Los geófonos son dispositivos acústicos que permiten detectar las vibraciones generadas por el flujo de agua subterráneo. Estos equipos captan las ondas sonoras transmitidas a través del suelo, facilitando la identificación del punto donde se produce la fuga.
- **Correladores de ruido.** Esta técnica consiste en registrar los sonidos generados por la fuga desde distintos puntos de la red



de distribución mediante sensores sincronizados. Luego, se comparan los tiempos de llegada de las señales acústicas a cada sensor, lo que permite determinar la ubicación exacta de la fuga mediante correlación matemática.

- **Gases trazadores.** Esta técnica consiste en la inyección de un gas inerte (usualmente una mezcla de hidrógeno (5 %) y nitrógeno (95 %)) en el interior de la tubería presurizada. El gas se comporta como un marcador que, en presencia de una fuga, escapa a través del punto de fisura y asciende hasta la superficie, donde es detectado mediante equipos de alta sensibilidad (Ladera et al., 2025).

► **El procedimiento se desarrolla en las siguientes etapas:**

1. **Purgado de la red (opcional).** Se realiza si la tubería contiene aire o contaminantes que puedan interferir con la detección del gas trazador.
2. **Inyección del gas.** La mezcla gaseosa se introduce en el tramo de red a evaluar, a través de una conexión existente, válvula o hidrante.
3. **Presurización y espera.** Se mantiene la red en condiciones de presión normales para permitir que el gas penetre en las posibles fisuras.
4. **Monitoreo superficial.** Se emplean detectores de hidrógeno de alta sensibilidad que se desplazan a lo largo del trazado de la red, escaneando el terreno y detectando concentraciones anómalas del gas en la superficie.
5. **Confirmación del punto de fuga.** La lectura más alta de concentración en un punto específico indica el área más probable de escape, la cual se marca para excavación y reparación.

Esta técnica es particularmente útil en condiciones en las que los métodos acústicos presentan limitaciones, como:

- Presiones de servicio bajas, donde la fuga no genera suficiente energía acústica para ser captada.
- Tuberías de materiales plásticos (como PEAD o PVC), que amortiguan el sonido, dificultando la transmisión de las señales hacia los sensores acústicos.
- Entornos con superficies asfaltadas o ruidosas, donde los sonidos de fuga pueden perderse entre interferencias externas.

La detección con gases trazadores no depende del sonido, sino del principio físico de difusión de gases, lo que la convierte en una herramienta altamente confiable para redes silenciosas o mal instrumentadas. Su uso permite mejorar significativamente la fiabilidad del diagnóstico, reducir falsos positivos y facilitar decisiones operativas precisas en campo.

3.2.2.1. Uso e instalación del correlador.

Su funcionamiento, aunque conceptualmente simple, es altamente efectivo. Consiste en la instalación de dos o más sensores acústicos en puntos estratégicos de la red, generalmente en válvulas de cierre o bocas de incendio (véanse Figuras 29 y 30). Estos sensores registran el sonido generado por la fuga, que se propaga a través del fluido y la tubería.

La funcionalidad clave del correlador radica en su capacidad para analizar y comparar los patrones de sonido captados por cada sensor. A partir de la diferencia en los tiempos de llegada del sonido a cada punto, y considerando la velocidad de propagación del sonido en el agua y en el material de la tubería, el equipo calcula la distancia y dirección aproximada hacia la fuga. Para garantizar un funcionamiento adecuado del correlador acústico, es fundamental:

- Asegurar una instalación correcta de los sensores sobre los puntos de contacto con la tubería.
- Calibrar el equipo según las especificaciones del fabricante.

- Considerar las condiciones ambientales (ruido de fondo, vibraciones externas) y las características físicas de la red (material, diámetro, longitud) que puedan afectar la propagación del sonido.

Una instalación precisa y una interpretación técnica adecuada de los resultados permitirán localizar la fuga con alta efectividad y reducir la necesidad de excavaciones exploratorias.

Para garantizar un uso eficaz del correlador acústico, es fundamental realizar una instalación adecuada de los sensores sobre la tubería, asegurando un contacto firme y sin interferencias. Asimismo, el equipo debe ser calibrado correctamente conforme a las especificaciones del fabricante.

Adicionalmente, es necesario verificar que las condiciones ambientales (como el nivel de ruido externo) y las características físicas de la tubería (como el material, el diámetro y la longitud) sean compatibles con los parámetros de operación del dispositivo. Estas condiciones influyen directamente en la interpretación precisa de los resultados y, por tanto, en la localización efectiva de las fugas.



Figura 29. Collarín y tapón metálico instalados en la tubería

Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje, 2024.



Figura 30. Data logger y micrófono de correlador instalados en accesorios conectados a la tubería

Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje, 2024.

► Instalación de correladores

El proceso de instalación del correlador acústico debe seguir una secuencia técnica rigurosa para garantizar la precisión de los datos registrados y la correcta localización de fugas. A continuación, se describen los pasos recomendados para su instalación y operación:

1. **Colocación de los transmisores.** Se debe instalar el transmisor 1 en la conexión realizada previamente, posicionando magnéticamente el micrófono sobre el terminal metálico de la tubería (véanse Figuras 31 y 32). La antena debe desplegarse completamente y ubicarse en un lugar libre de interferencias mecánicas o electromagnéticas. Este procedimiento debe repetirse con el transmisor 2. Una vez instalados, ambos transmisores se conectan al correlador.
2. **Medición del tramo de análisis.** Se debe medir la distancia lineal entre los puntos donde se han colocado los sensores. Esta longitud representa el tramo de red en el cual se evaluará la presencia de fugas.
3. **Ingreso de parámetros al correlador.** Para iniciar la recopilación de datos, es necesario ingresar en el correlador los parámetros técnicos del tramo: longitud del tramo, material de la tubería y diámetro nominal.
4. **Recepción y procesamiento de datos.** Tras la puesta en marcha del equipo, los sensores comienzan a registrar los sonidos generados por posibles fugas. Esta información es enviada al correlador, el cual aplica filtros acústicos y algoritmos de correlación para determinar con precisión la ubicación de la fuga (véanse Figuras 33 y 34).





Figura 31. Transmisor 1 del correlador instalado en la tubería
Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje, 2024.

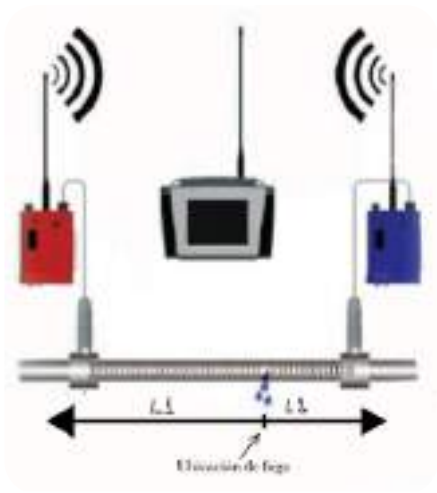


Figura 33. Esquema de conexión y recepción de señal del correlador
Nota. Elaboración propia, 2024.



Figura 32. Transmisor 2 del correlador instalado en la tubería
Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje, 2024.



Figura 34. Correlador recibiendo la señal de ruidos de fuga de los transmisores
Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de Bombeo Curitroje, 2024.

3.2.2.2. Uso del Geófono. El geófono es un dispositivo diseñado para detectar fugas en tuberías enterradas mediante la captación de vibraciones y sonidos generados por el escape de agua a presión. Su aplicación se basa en la técnica de escucha acústica, que permite identificar patrones sonoros anómalos en las conducciones hidráulicas, especialmente en líneas de impulsión de sistemas de bombeo. Dado que este tipo de tubería se encuentra enterrada y las fugas no siempre son visibles, el geófono se convierte en una herramienta fundamental para realizar inspecciones no invasivas. La sensibilidad del dispositivo, sumada a la experiencia del operador, permite localizar con mayor precisión el punto afectado, evitando intervenciones destructivas innecesarias.

► **Procedimiento de uso y operación del geófono**

1. **Selección de sensores según el tipo de superficie.** Se eligen los sensores acústicos adecuados conforme a las características del terreno. El bastón y el trípode de escucha se utilizan en superficies no pavimentadas (véase Figura 35), mientras que la campana de escucha es empleada en pavimentos duros como concreto o asfalto.
2. **Ajuste del volumen de los auriculares.** Antes de iniciar la sesión de escucha, se configura el nivel de volumen en los auriculares para garantizar la comodidad del operador. Durante el desplazamiento del geófono de un punto a otro, los auriculares deben silenciarse para evitar interferencias auditivas.
3. **Determinación de puntos de escucha accesibles.** Se identifican y seleccionan puntos accesibles a lo largo de la línea de impulsión con el objetivo de analizar los niveles de ruido, detectar zonas con presencia de fuga y descartar aquellas sin indicios acústicos anómalos.
4. **Realización de la sesión de escucha.** Se incrementa gradualmente el nivel de la señal a medida que se avanza por la conducción. Este proceso se repite varias veces para comparar patrones acústicos. Si la intensidad del sonido disminuye abruptamente, se interpreta que se ha sobrepasado el punto de fuga, por lo que

se reduce la distancia entre puntos de escucha. La frecuencia más alta detectada indica la ubicación aproximada de la fuga (véase Figura 36).

Para garantizar resultados confiables, se deben considerar las condiciones del terreno y realizar una evaluación crítica que permita descartar interferencias acústicas externas. Se recomienda realizar las sesiones de escucha en horarios nocturnos, cuando los niveles de ruido ambiental son más bajos.



Figura 35. Sensor tipo trípode utilizado para superficies no pavimentadas

Nota. Fotografía obtenida en campo; equipo propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.



Figura 36. Sesión de escucha con geófono en tubería principal

Nota. Fotografía obtenida en campo; equipo propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.

► Recomendaciones para el uso del geófono

Para asegurar una detección eficaz y precisa de fugas en redes hidráulicas mediante el uso del geófono, se recomienda seguir las siguientes buenas prácticas operativas:

- **Calibración y pruebas previas.** Antes de iniciar cualquier procedimiento de escucha, es fundamental calibrar el geófono y realizar pruebas funcionales. Esto incluye verificar la sensibilidad de los sensores y ajustar los parámetros operativos según las condiciones ambientales y del terreno.

- **Exploración metódica.** El proceso de escucha debe llevarse a cabo de forma sistemática. Se recomienda dividir el área en secciones pequeñas y realizar una inspección detallada en cada una, prestando especial atención a puntos críticos como uniones, válvulas, derivaciones y cambios de dirección en la tubería.
- **Movimiento lento y controlado.** El operador debe desplazar el geófono de manera pausada y uniforme sobre la superficie del suelo o estructura hidráulica correspondiente (véase Figura 37). Movimientos bruscos pueden introducir ruido externo y afectar la fiabilidad de la señal acústica.
- **Escucha activa y ajuste de sensibilidad.** Durante la sesión de escucha, es esencial mantener una atención auditiva constante. Se debe estar alerta a cualquier cambio en los patrones de sonido que sugiera la presencia de una fuga. La sensibilidad del dispositivo puede ajustarse en función del tipo de superficie y del nivel de ruido ambiental.
- **Registro y documentación técnica.** Se recomienda documentar detalladamente los datos obtenidos durante la inspección. Esto incluye la ubicación precisa del punto de escucha, la intensidad y tipo de sonido percibido, condiciones del terreno y cualquier otra observación relevante que contribuya a la localización exacta de la fuga.



Figura 37. Operador realizando sesión de escucha con geófono sobre pavimento

Nota. Fotografía obtenida en campo; equipo propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), 2024.



3.3. Caso de estudio

En el presente caso de estudio, se llevaron a cabo diversas prácticas de campo para ilustrar los procesos de detección y localización de fugas, utilizando una combinación de técnicas y herramientas especializadas. Entre los métodos empleados se incluyeron el aforo volumétrico, el aforo con caudalímetro y el uso de equipos de geofonía y correlación acústica.

El objetivo principal de estas prácticas fue demostrar la eficacia y complementariedad de diferentes enfoques en la detección y localización de fugas, así como resaltar la importancia de contar con tecnologías y metodologías adecuadas para la gestión eficiente de los recursos hídricos. Además, se abordaron los aspectos prácticos de la implementación de estas técnicas en condiciones reales, discutiendo las consideraciones esenciales para su aplicación exitosa.

El caso de estudio expuesto en este manual ofrece una visión integral de los procesos involucrados en la detección y localización de fugas en sistemas de distribución de agua, proporcionando información valiosa para profesionales del sector, investigadores y responsables de la toma de decisiones interesados en mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las redes hídricas.

► Área de estudio

El presente proyecto se lleva a cabo en la ciudad de Loja, capital de la provincia y del cantón homónimos, ubicada al sur de Ecuador. Esta ciudad se encuentra en las coordenadas geográficas 03° 39' 55" y 04° 30' 38" de latitud sur (9501249 N – 9594638 N) y 79° 05' 58" de longitud oeste (661421 E – 711075 E). Según el censo realizado en 2010 por el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), la población de Loja ascendía a 170,280 habitantes (Municipio de Loja, 2018).

La distribución y comercialización del agua potable en la ciudad de Loja está a cargo de la Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja (UMAPAL).

Según datos proporcionados por el Departamento de Comercialización de UMAPAL, la ciudad cuenta con 44,857 conexiones domiciliarias de agua potable (Municipio de Loja, 2018).

► **Clima**

La ciudad de Loja, situada al sur de Ecuador, presenta un clima entre húmedo y templado con variaciones bruscas dependiendo de la zona geográfica. Las temperaturas oscilan entre los 16 °C y 21 °C a lo largo del año. En esta ciudad, se pueden identificar dos estaciones: verano e invierno (Duque, 2020).

Según Duque (2020), los períodos más calurosos se presentan de abril a junio y de agosto a octubre. Durante el invierno, se caracteriza por ser nublado y se registra una mayor incidencia de precipitaciones, mientras que el verano se presenta parcialmente nublado y fresco.

► **Topografía**

La topografía de Loja, provincia ubicada en Ecuador, se caracteriza por su terreno accidentado y la presencia de rocas que dificultan su acceso. Aunque posee altitudes propias de la sierra ecuatoriana, no cuenta con nevados en su territorio. Según INERGI, PREDESUR y CONADE (1994), Loja es la última provincia en adoptar la avenida volcánica del norte, lo cual resulta en la existencia de grandes elevaciones y extensos valles cálidos en su paisaje.

► **Población**

Con base en los datos del censo poblacional del año 2010, se afirma que el cantón Loja alberga un porcentaje del 43.2%, de la población total de la provincia. Durante el período comprendido entre 1990 y 2010, se ha registrado un crecimiento promedio anual del 1.7%. Estos datos demuestran que el cantón Loja alberga la mayor cantidad de habitantes en comparación con el resto de la provincia.

► Líneas de transmisión de agua potable

En la ciudad de Loja, las líneas de transmisión de agua potable están organizadas en cuatro circuitos principales. Tres de estos circuitos se originan en la planta de tratamiento de Carigán, mientras que el cuarto corresponde a la planta de tratamiento de Pucará. De acuerdo con información proporcionada por el Municipio de Loja (2018), el sistema de abastecimiento hacia las unidades de reserva opera mediante conducción por gravedad, optimizando el uso de la topografía local para reducir el consumo energético.

Los circuitos de transmisión se denominan de la siguiente manera: Transmisión Norte, Transmisión Centro, Transmisión Sur y Transmisión Pucará – San Cayetano (véase Figura 38).

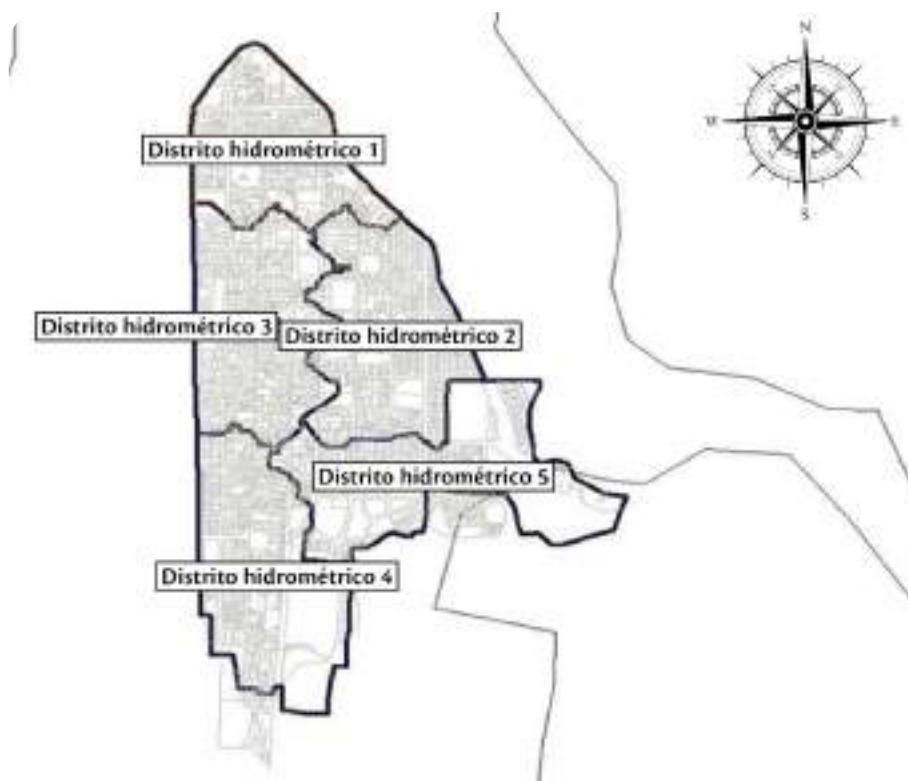


Figura 38. Distritos hidrométricos del proyecto "Regenerar"

Nota. Tomado de Plan de Ordenamiento y Desarrollo Sostenible del Casco Urbano Central de la Ciudad de Loja [Fotografía], 2015, Unidad Municipal de Alcantarillado y Agua Potable de Loja.



Equipos y materiales utilizados. Para la ejecución de actividades de detección y localización de fugas en redes de agua potable, se emplea una combinación de equipos electrónicos especializados y materiales auxiliares de campo, que permiten obtener datos precisos y facilitar el trabajo técnico en terreno.

► **Equipos utilizados para la detección de fugas**

- **Caudalímetro.** Dispositivo que permite medir el caudal del fluido que circula por la tubería, lo que facilita la identificación de variaciones anómalas que podrían estar asociadas a una fuga.
- **Data logger de presión.** Instrumento que registra continuamente los valores de presión en distintos puntos del sistema, lo que permite identificar descensos no programados que puedan indicar la presencia de pérdidas.

► **Equipos utilizados para la localización de fugas**

- **Geófono.** Dispositivo acústico que detecta vibraciones producidas por el escape de agua a presión, permitiendo identificar la ubicación aproximada de la fuga en tuberías enterradas.
- **Correladores acústicos.** Equipos que procesan señales registradas por sensores ubicados en distintos puntos de la red, permitiendo calcular con precisión la distancia al punto de fuga mediante correlación temporal.

► **Materiales de apoyo utilizados en campo**

- **Cinta métrica y flexómetro.** Utilizados para realizar mediciones lineales precisas sobre el terreno o en estructuras.
- **Jalones o balizas.** Elementos de señalización empleados para marcar puntos de referencia durante la toma de datos o trazado de líneas de inspección.
- **Sensores de profundidad de agua.** Empleados para medir niveles en cámaras o cajas de válvulas donde se acumula agua producto de posibles fugas.

- **Gel conductor.** Utilizado en ciertos sensores para garantizar el contacto adecuado con la superficie o con el equipo de medición.
- **Herramientas de plomería.** Conjunto básico de herramientas necesarias para la manipulación de conexiones, válvulas o derivaciones durante el proceso de inspección o intervención.

► Metodología

La realización de un aforo preciso constituye un procedimiento fundamental para la determinación del caudal de agua en un sistema hidráulico, así como para el cálculo de la potencia de bombeo óptima. Es esencial garantizar que el caudal de agua extraído no exceda la capacidad de recarga del depósito o tanque, ya que un desbalance en este parámetro puede provocar la reducción del nivel disponible y comprometer la eficiencia del sistema. A través de un aforo correctamente ejecutado, es posible obtener tanto el caudal efectivo generado por el sistema de bombeo como su curva característica y resistiva, lo que permite estabilizar el nivel de operación y optimizar el consumo energético (McMillan & Westerberg, 2015).

Antes de aplicar técnicas acústicas para la detección de fugas, se debe verificar la existencia de discrepancias entre el caudal de entrada al depósito y el caudal de salida. Esta evaluación preliminar permite identificar si existe una pérdida significativa en algún tramo de la tubería y, por tanto, orientar la localización de la posible fuga.

La metodología empleada en este procedimiento combina dos enfoques complementarios.

- Aforo volumétrico manual, que consiste en medir directamente el volumen desplazado en un intervalo de tiempo determinado, utilizando métodos tradicionales de campo.
- Aforo electrónico mediante caudalímetro, el cual permite registrar mediciones de flujo de forma continua y con alta precisión, facilitando la comparación con datos históricos o teóricos del sistema.



La integración de ambas técnicas permite obtener datos confiables y contrastables, necesarios para el diagnóstico hidráulico y la posterior aplicación de métodos especializados de localización de fugas (Lobos, 2022).

► **Sectorización hidráulica**

Pool y Seibert (2021) proponen la implementación de la sectorización hidráulica, que consiste en dividir la red de suministro de agua en áreas geográficamente definidas con características hidráulicas similares, como el caudal y la presión. Aquellas áreas que están aisladas del resto de la red y que tienen una longitud y área más reducidas deben contar con una entrada de agua única. Esta entrada debe estar equipada con medidores de caudal con el fin de obtener información detallada y precisa sobre el consumo de agua realizado en ese sector.

► **Balance hídrico**

Este concepto se define como un diagnóstico efectuado en la red de distribución de agua, cuyo propósito es medir el volumen consumido durante un período de tiempo y determinar los valores de pérdida. Estos valores se obtienen mediante la diferencia entre el volumen consumido y el volumen suministrado a la red. La International Water Association ha desarrollado y presentado nuevos enfoques que ayudan a las empresas responsables del suministro de agua potable, como UMAPAL, a identificar puntos críticos donde se producen pérdidas en sus sistemas de distribución. Estos métodos mencionados son fundamentales para la innovación en el ámbito de auditorías y la conservación del agua (Álvarez, 2021).

► **Aforo volumétrico**

Este proceso se realizó en las diferentes estaciones de bombeo de la ciudad de Loja, para cuestiones de demostración se expondrán resultados y ejemplos prácticos de cada una de las etapas de este proceso.

Consiste conducir el fluido desde la cámara húmeda hasta el tanque de reserva, cuyo volumen es previamente conocido. Luego, se procede a cronometrar el tiempo que tarda el fluido en llegar al tanque de reserva durante un período determinado (De La Ossa-Oliveros et al., 2018). Posteriormente se divide la capacidad del tanque (metros cúbicos) entre el tiempo empleado (segundos), mediante este proceso se obtiene el caudal (expresado en metros cúbicos por segundo) según se describe en la siguiente ecuación:

$$Q = V/t \text{ (Ecu. 1)}$$

Donde:

- Q= Caudal expresado en m /s
- V= Volumen del tanque de reserva (m)
- t= Tiempo transcurrido (s)

En primera instancia, y con el apoyo de una baliza de aproximadamente 3 metros de longitud, se procede a medir el nivel del agua en el tanque de succión. De forma simultánea, se mide también el nivel del agua en el tanque de reserva (véase Figura 39). Estas mediciones se consideran como el nivel inicial. Una vez registrados estos valores, se activa la primera bomba del sistema y se mantiene en funcionamiento durante un tiempo estimado de cinco minutos. El tiempo se controla mediante un cronómetro, el cual se inicia en el momento exacto en que la bomba es encendida.

Se debe registrar el tiempo transcurrido hasta que el agua comienza a llegar al tanque de reserva. Al alcanzar los cinco minutos de operación, se procede a apagar la bomba. Asimismo, se mide el tiempo parcial que transcurre desde el apagado de la bomba hasta que el flujo de agua cesa completamente en el tanque de reserva.

Es fundamental mantener una comunicación efectiva entre los operarios ubicados en el tanque de succión y en el tanque de reserva, con el fin de coordinar con precisión el momento exacto para detener los cronómetros y apagar la bomba.

Una vez verificado que el suministro impulsado ha dejado de fluir en el tanque de reserva, se procede a realizar una nueva medición de los niveles de agua en ambos tanques. La diferencia entre las alturas iniciales y finales, multiplicada por el área o sección transversal de cada tanque, permite calcular el volumen de agua extraído del tanque de succión y el volumen impulsado al tanque de reserva. Estos valores deben ser comparados, ya que idealmente deberían ser equivalentes. Una discrepancia significativa entre ambos volúmenes podría evidenciar la existencia de fugas en la línea de impulsión.

Este procedimiento debe repetirse para cada una de las bombas que conforman el sistema de bombeo. Para fines de verificación y confiabilidad de los datos obtenidos, se recomienda realizar un mínimo de cinco aforos por cada bomba evaluada.

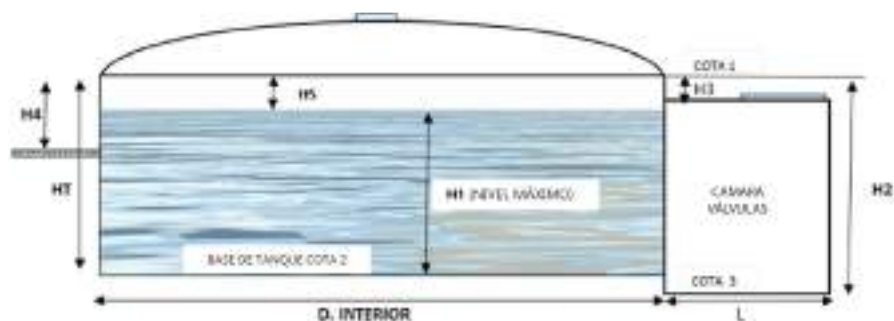


Figura 39. Esquema de tanque de reserva

Nota. Tomado de Plan de Ordenamiento y Desarrollo Sostenible del Casco Urbano Central de la Ciudad de Loja [Fotografía], 2015, Unidad Municipal de Alcantarillado y Agua Potable de Loja.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos tras el análisis realizado en diversas estaciones de bombeo ubicadas en la ciudad de Loja. Como parte del estudio, se seleccionaron datos correspondientes a la zona centro-este de la ciudad, con el objetivo de ejemplificar el trabajo de campo efectuado.

Las estaciones de bombeo Las Peñas, Noroccidental y Clodoveo Alto, localizadas en la mencionada zona (véase Figura 40), fueron objeto de evaluación técnica. En dichas estaciones se efectuó un análisis detallado con el propósito de determinar el rendimiento hidráulico y la capacidad operativa de las bombas instaladas.

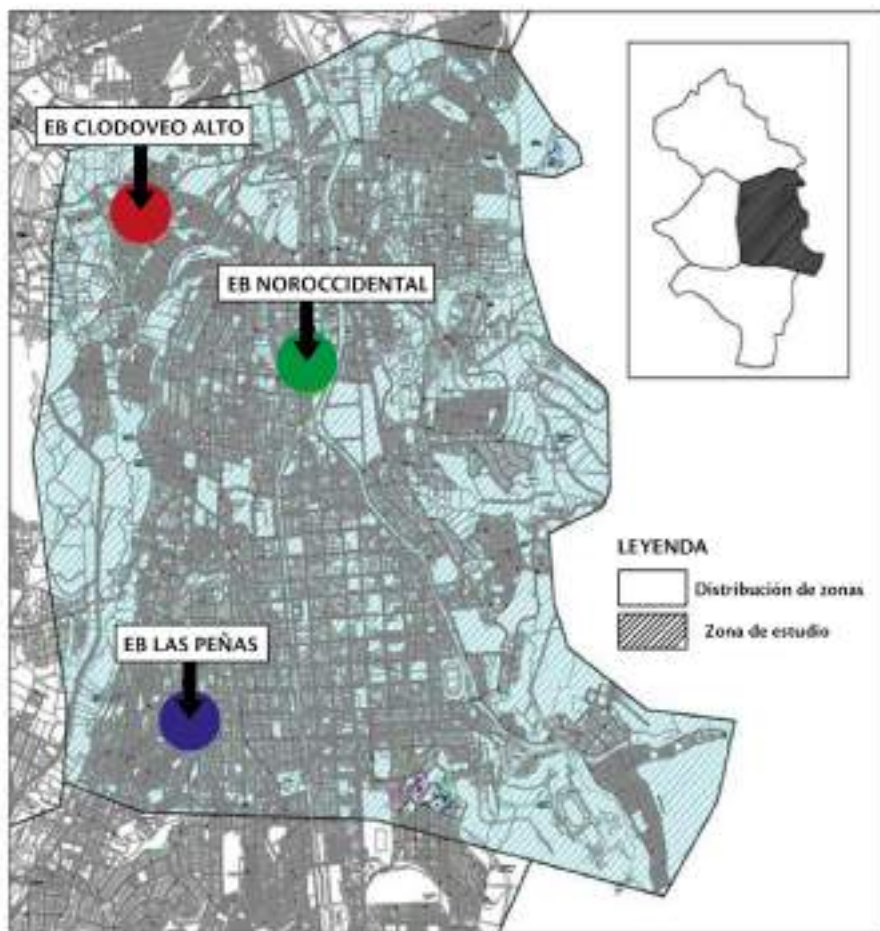


Figura 40. Estaciones de Bombeo Zona: Centro Este de Loja

Nota. Tomado de Sarango, T. H. (2023). Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos. Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

► Aforo en la estación de bombeo Las Peñas

La estación de bombeo Las Peñas cuenta con dos bombas centrífugas de la marca Cornell Pump, cada una con una potencia instalada de 50 hp. Estas unidades operan con caudales individuales de 13,27 L/s y 14,60 L/s, respectivamente. El sistema de impulsión está conformado por un tramo de 554,3 metros de tubería de PVC y 4,5 metros de tubería de hierro fundido.

El proceso de aforo se llevó a cabo en un intervalo de 10 minutos (600 segundos), considerando una diferencia de elevación de 107,95 metros entre el punto de succión (ubicado en el sector Las Peñas) y el punto de descarga (sector Occidental–Capulí–Loma) (Sarango, 2023).

Tabla 1
Datos registrados en la estación de bombeo Las Peñas, bomba 1

Bomba 1							
Ensayo	Tiempo (s)	Medida de referencia		Diferencia (m)	Diámetro (m)	Volumen (m³)	Caudal (L/s)
		Antes (m)	Después (m)				
1	600	2,01	2,07	0,06	13	7,96	13,27
2	600	2,00	2,00	0,065	13	8,63	14,38
3	600	1,99	1,99	0,05	13	6,64	11,06
4	600	2,01	2,01	0,045	13	5,97	9,95
5	600	2	2	0,08	13	10,62	17,70
Promedio		2,002	2,062	0,06	13	7,96	13,27

Nota. Sarango T. Harthman. (2023) Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos.
Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

Tabla 2
Datos registrados en la estación de bombeo Las Peñas, bomba 2

Bomba 2							
Ensayo	Tiempo (s)	Medida de referencia		Diferencia (m)	Diámetro (m)	Volumen (m³)	Caudal (L/s)
		Antes (m)	Después (m)				
1	600	2,07	2,135	0,065	13	8,63	14,38
2	600	2,03	2,095	0,065	13	8,63	14,38
3	600	2,04	2,10	0,06	13	7,96	13,27
4	600	2,04	2,11	0,07	13	9,29	15,49
5	600	2,03	2,1	0,07	13	9,29	15,49
Promedio		2,042	2,108	0,066	13	8,76	14,60

Nota. Sarango T. Harthman. (2023) Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos.
Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

Se llevó a cabo la modelación de este sistema en el software Epanet 2.0 de la impulsión del sistema de bombas funcionando en paralelo, este software utiliza la ecuación de continuidad de caudal, los datos de caudal de ingreso al sistema son semejantes a los valores de consumo

del sector. En la Figura 41 se muestra el resultado de caudal obtenido de la estación de bombeo de Las Peñas, un valor de 13,80 L/s que representa un dato promedio de lo que logra elevar la estación de bombas.



Figura 41. Perfil de impulsión, E.B. Las Peñas, bombas trabajando en paralelo

Nota. Tomado de Sarango T. Harthman. (2023). Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos. Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

Aforo en la estación de bombeo Clodoveo Alto

La estación de bombeo Clodoveo Alto dispone de dos bombas operativas: una de la marca Goulds Pump, con una potencia de 7,5 hp, y otra de la marca Pedrollo, con una potencia de 10 hp. La conducción de impulsión está compuesta por 164,44 metros de tubería de PVC y un tramo final de 4,5 metros de tubería de hierro galvanizado en la zona de descarga.

Durante el mismo intervalo de medición previamente establecido, se observó que la bomba Pedrollo presentó un caudal superior en comparación con la bomba Goulds. Los resultados detallados del aforo realizado se presentan en las Tablas 3 y 4 (Sarango, 2023).

Tabla 3

Datos registrados en la estación de bombeo Clodoveo Alto, bomba 1

Bomba 1-Goulds Pump							
Ensayo	Tiempo (s)	Medida de referencia		Diferencia (m)	Diámetro (m)	Volumen (m ³)	Caudal (L/s)
		Antes (m)	Después (m)				
1	600	2,025	2,086	0,061	6,4	1,96	3,27
2	600	2,03	2,1	0,07	6,4	2,25	3,75
3	600	2,02	2,083	0,063	6,4	2,03	3,38
4	600	2,04	2,11	0,07	6,4	2,25	3,75
5	600	2,03	2,10	0,07	6,4	2,25	3,75
Promedio		2,029	2,1	0,07	6,4	2,15	3,58

Nota. Sarango T. Harthman. (2023) Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos.
Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

De la misma manera, se presentan los datos para la bomba Pedrollo, a este sistema también se lo modeló mediante el software Epanet 2.0 con la finalidad de analizar los resultados obtenidos cuando el sistema de bombeo trabaja con las dos bombas encendidas o en paralelo.

Tabla 4

Datos registrado en la estación de bombeo Clodoveo Alto, bomba 2

Bomba 2-Pedrollo							
Ensayo	Tiempo (s)	Medida de referencia		Diferencia (m)	Diámetro (m)	Volumen (m ³)	Caudal (L/s)
		Antes (m)	Después (m)				
1	600	2,076	2,146	0,07	6,4	2,25	3,75
2	600	2,090	2,150	0,06	6,4	1,93	3,22
3	600	2,050	2,100	0,05	6,4	1,61	2,68
4	600	2,000	2,080	0,08	6,4	2,57	4,29
5	600	1,990	2,070	0,08	6,4	2,57	4,29
Promedio		2,04	2,11	0,068	6,4	2,19	3,65

Nota. Sarango T. Harthman. (2023) Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos.
Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

La estación Clodoveo Alto, aunque de dimensiones reducidas y equipada con bombas de menor potencia, es capaz de impulsar un caudal medio de 3,45 litros por segundo, como se muestra en la Figura 42. Cabe destacar que dicha estación opera elevando el fluido a una altura de 50,5 metros, lo cual constituye una característica relevante de su desempeño hidráulico.



Figura 42. Perfil de impulsión de la E.B. Clodoveo Alto, bombas trabajando en paralelo

Nota. Tomado de Sarango T. Harthman (2023), Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos. Zona: Centro Este de Loja (Loja – Ecuador).

► Aforo en la estación de bombeo Noroccidental

La estación de bombeo Noroccidental dispone de tres bombas, de las cuales dos se encuentran actualmente operativas, mientras que la tercera permanece fuera de servicio debido a fallas mecánicas. La línea de impulsión tiene una longitud total de 1.408,35 metros, conformada principalmente por tubería de fundición dúctil, complementada con un tramo final de 4,5 metros de tubería de hierro fundido en la zona de descarga.

El sistema opera de manera simultánea con el propósito de abastecer al sector San Vicente. Para ello, las bombas impulsan el caudal hacia una elevación de 124,05 metros, desde el punto de succión hasta el área de entrega (Sarango, 2023).

Tabla 5

Datos registrados en la estación de bombeo Noroccidental, bomba 1

Bomba 1 – Goulds Pumps ITT							
Ensayo	Tiempo (s)	Medida de referencia		Diferencia (m)	Diámetro (m)	Volumen (m ³)	Caudal (L/s)
		Antes (m)	Después (m)				
1	600	1,92	1,96	0,04	13	5,31	5,21
2	600	1,90	1,95	0,05	13	6,64	6,51
3	600	1,91	1,955	0,045	13	5,97	5,86
4	600	1,93	1,97	0,04	13	5,31	5,21
5	600	1,925	1,97	0,041	13	5,44	5,34
Promedio		1,917	1,9602	0,0432	13	5,73	5,62

Nota. Sarango T. Harthman. (2023) Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos.
Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

Tabla 6

Datos registrados en la estación de bombeo Noroccidental, bomba 2

Bomba 2 – Sihi Halberg							
Ensayo	Tiempo (s)	Medida de referencia		Diferencia (m)	Diámetro (m)	Volumen (m ³)	Caudal (L/s)
		Antes (m)	Después (m)				
1	600	1,963	1,995	0,032	13	4,25	5,12
2	600	1,94	1,975	0,035	13	4,65	5,53
3	600	1,93	1,961	0,0305	13	4,05	5,06
4	600	1,945	1,976	0,031	13	4,11	5,02
5	600	1,935	1,965	0,03	13	3,98	4,89
Promedio		1,9426	1,9743	0,0317	13	4,21	5,12

Nota. Sarango T. Harthman. (2023) Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos.
Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

La estación de bombeo Noroccidental se caracterizó por elevar el fluido a una altura considerable de 124,05 m, con un recorrido en la línea de 1 km aproximadamente, por lo que impulsa un caudal promedio de 6,34 L/s, a continuación se presenta el modelo en el software Epanet 2.0 (véase Figura 43).



Figura 43. Perfil de impulsión, E.B. Noroccidental, bombas trabajando en paralelo

Nota. Tomado de Sarango T. Harthman. (2023) Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos. Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

Registro de datos realizando el aforo mediante caudalímetro. Este método se llevó a cabo con la finalidad de verificar la precisión de los datos obtenidos con los aforos realizados mediante el método volumétrico. El equipo fue instalado en la tubería de impulsión, por lo que es esencial ingresar las características clave de la tubería en el menú del equipo como se detalla a continuación en la Tabla 7.

El procedimiento de instalación del equipo se detalla de manera práctica en el capítulo 3.

Tabla 7

Datos de principales características ingresados en la calibración del caudalímetro

Características de la tubería de impulsión (mm)	Estaciones de bombeo		
	Las peñas	Clodoveo alto	Noroccidental
Diámetro externo	160	110	174,4
Espesor	6,2	4,2	4
Diámetro interno	153,8	4,2	4
Material	153,8	105,8	153,4
Material	Hierro fundido	Hierro fundido	Fundición dúctil

Nota. Sarango T. Harthman. (2023) Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos. Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

Se programó la activación de las bombas durante un período de 10 minutos, con el propósito de recopilar información cuantitativa sobre el caudal generado por cada uno de los sistemas de bombeo evaluados. Los resultados obtenidos en este proceso se presentan en la Tabla 8 (Sarango, 2023).

Tabla 8
Datos obtenidos del aforo del caudalímetro

Estaciones de bombeo	Tiempo (min)	Caudal aforado (L/s)
Las peñas	10	12,96
Clodoveo alto	10	3,62
Noroccidental	10	6,23

Nota. Sarango T. Harthman. (2023) Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos. Zona: Centro Este de Loja. Loja – Ecuador.

Localización de fuga de agua usando correladores. Para llevar a cabo la localización de fugas mediante el uso de correladores, es necesario seleccionar un tramo específico de tubería en el cual se sospeche la existencia de una fuga. Como se explicó anteriormente, con el fin de facilitar la identificación en campo mediante equipos acústicos, se diseñó una simulación controlada de fuga real, considerando todas las variables físicas relevantes.

Dicha simulación se realizó en la tubería que conecta la estación de bombeo con el tanque de impulsión en la Estación Curitroje. Para ello, se excavaron tres pozos con el objetivo de exponer la línea de conducción. Es importante señalar que estos pozos fueron ubicados a una distancia prudente de los tanques de succión y de reserva, con el fin de evitar interferencias en los datos registrados por los correladores.

Dado que la tubería es de material PVC, se instalaron tres collarines, tal como se ilustra en las Figuras 44, 45 y 46. Las conexiones donde se colocan los correladores se dispusieron en los extremos del tramo, cada una equipada con tomas y tapones metálicos, necesarios para la instalación de los micrófonos del correlador. En el punto medio del tramo se instaló una llave de paso, destinada a simular la fuga de agua bajo condiciones controladas.



Figura 44. Pozo 1 excavado para la instalación del transmisor 1 del correlador
Nota. Fotografía tomada en campo, Estación de Bombeo Curitroje.



Figura 45. Pozo 2 excavado para la instalación de llave de paso con fines de simulación de fuga
Nota. Fotografía tomada en campo, Estación de Bombeo Curitroje.



Figura 46. Pozo 3 excavado para la instalación del transmisor 2 del correlador
Nota. Fotografía tomada en campo, Estación de Bombeo Curitroje.

Se procedió a medir la distancia del tramo en análisis, es decir, la longitud total comprendida entre el sensor 1 y el sensor 2. En este caso, la distancia fue de 69 metros (véase Figura 47). Para que el correlador comience a recopilar información, se ingresaron previamente los datos correspondientes a la longitud total entre los transmisores, el tipo de material de la tubería y su diámetro. La instalación del equipo se describe de manera práctica en el apartado 3.2.2.1

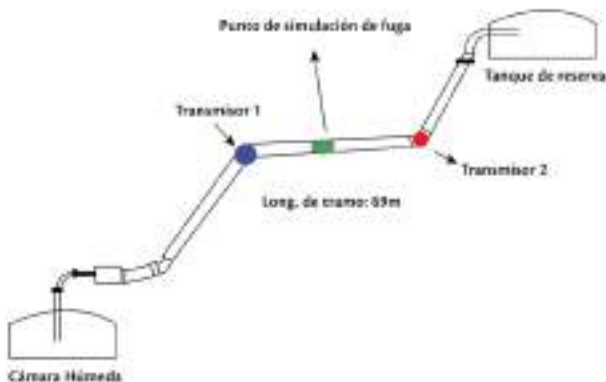


Figura 47. Esquema de instalación de correladores y punto de simulación de fuga

Una vez puesto en marcha, los transmisores enviaron los datos de ruidos de fuga que están recopilando hacia el correlacionador, el cual nos dará la posición exacta de la fuga.



Figura 48. Simulación de fuga de agua

Nota. Fotografía tomada en campo, Estación de Bombeo Curitroje.



Figura 49. Correlador recibiendo la señal de ruido de fuga desde los transmisores

Nota. Fotografía tomada en campo, Estación de Bombeo Curitroje.

3.3.7.6. Localización de fuga de agua usando geófono. Con el objetivo de optimizar el tiempo en la detección de fugas, resulta necesario realizar un análisis matemático que permita controlar tanto el caudal impulsado como el caudal que llega al tanque de reserva. Este análisis se efectúa mediante un aforo volumétrico o a través del uso de un caudalímetro, con el fin de determinar las variaciones de caudal tanto en la salida como en la llegada del flujo. Asimismo, se ha llevado a cabo una sesión de escucha utilizando un geófono, durante la cual se prestó especial atención a las condiciones climáticas y a las medidas de seguridad, tanto del equipo como del personal técnico involucrado.



Figura 50. Correlador recibiendo la señal de ruido de fuga desde los transmisores

Nota. Fotografía tomada en campo, Estación de Bombeo Curitroje.



Figura 51. Sesión de escucha con geófono

Nota. Fotografía tomada en campo, Estación de Bombeo Curitroje.



Figura 52. Niveles de ruido captados

Nota. Fotografía obtenida en campo, Estación de bombeo Curitroje.

3.4. Modelación hidráulica para detección preventiva de fugas

La detección de fugas de agua no debe limitarse únicamente al uso de dispositivos acústicos o pruebas de presión; en contextos operativos más complejos, como redes de gran extensión, sistemas urbanos densamente ramificados o infraestructuras con baja instrumentación, es indispensable recurrir a herramientas de modelación hidráulica como apoyo para el diagnóstico preventivo y la localización indirecta de fugas.

La modelación hidráulica consiste en la representación matemática y computacional del comportamiento de una red de distribución de agua (Wu et al., 2024). A través de esta técnica, se simulan parámetros operativos como caudales, presiones, velocidades, pérdidas de carga y consumos en condiciones normales, y luego se comparan con los valores reales medidos en campo. Las discrepancias entre ambos conjuntos de datos pueden ser indicativas de pérdidas no visibles, errores de operación o deterioro estructural en la red (Puust et al., 2010).

► Relación con la detección tradicional

Los métodos descritos previamente en este capítulo (como el uso de geófonos, correladores y data loggers) son técnicas de detección directa que requieren el acceso físico a la red o la instalación de sensores en puntos específicos. Sin embargo, estas tecnologías tienen limitaciones cuando:

- La red carece de cobertura completa de sensores.
- El acceso físico es restringido.
- No hay datos disponibles de presión o caudal en tiempo real.
- Se trata de sistemas rurales, dispersos o mal instrumentado.

En tales casos, la modelación hidráulica ofrece un enfoque preventivo y no invasivo que complementa el monitoreo físico. Por ejemplo, en una red sectorizada (DMA), el modelo puede prever el caudal mínimo nocturno esperado; si el valor medido en campo excede sustancialmente al proyectado, esto puede sugerir la presencia de una fuga no detectada por métodos acústicos.

Funcionamiento de la modelación hidráulica. La construcción de un modelo hidráulico implica los siguientes pasos:

1. **Levantamiento de datos de la red.** Se recolecta información detallada sobre la topología, diámetros de tuberías, materiales, longitudes, altimetría, válvulas, bombas, y patrones de consumo.
2. **Digitalización de la red.** Se introduce la red en un software de simulación como EPANET, WaterGEMS, InfoWater Pro o MIKE URBAN.
3. **Asignación de condiciones de contorno.** Se definen los caudales de entrada, presiones mínimas requeridas, demandas por nodo y horarios de operación.
4. **Simulación hidráulica.** El sistema resuelve ecuaciones de conservación de masa (continuidad) y energía (ecuación de Bernoulli adaptada), generando un comportamiento teórico de la red.



5. **Validación/calibración.** Se comparan los resultados simulados con datos reales obtenidos mediante sensores o registros históricos. Si las diferencias son significativas, se ajustan los parámetros del modelo.
6. **Análisis de discrepancias.** Cuando existen diferencias entre los resultados esperados y los reales (especialmente presiones bajas o caudales elevados), pueden deberse a fugas ocultas, válvulas defectuosas, errores en la sectorización o consumos no autorizados.

► Aplicaciones prácticas

La modelación hidráulica no solo permite predecir fugas en zonas sin cobertura sensorica, sino que también es útil para:

- Priorizar campañas de detección directa, focalizando zonas con alta probabilidad de pérdida.
- Analizar el impacto de fugas simuladas, para evaluar la sensibilidad del sistema ante variaciones de presión.
- Optimizar la ubicación de sensores o válvulas de cierre.
- Validar datos de campo, cuando los valores medidos parecen inconsistentes.
- Diseñar estrategias de operación más eficientes, minimizando el número de sectores con alta incertidumbre.

► Integración con tecnologías emergentes

Como se describe en la sección 2.4 del presente libro, tecnologías como la inteligencia artificial y la telemetría ofrecen un marco avanzado para el análisis de datos hidráulicos. La modelación puede integrarse con sistemas SCADA o plataformas IoT para alimentar los modelos con datos en tiempo real, lo cual permite la detección automática de eventos anómalos, como fugas, cierres imprevistos o comportamientos irregulares en el sistema.

La modelación hidráulica representa una herramienta estratégica dentro de un enfoque integral de detección de fugas. Su utilidad radica en que no depende exclusivamente de la presencia de instrumentación física, y su capacidad de análisis predictivo la convierte en un elemento clave en redes urbanas grandes, sistemas antiguos, o áreas con limitaciones operativas. Por tanto, su incorporación dentro de los programas de detección, junto con los métodos tradicionales, fortalece significativamente la gestión técnica y preventiva de las pérdidas de agua en las redes de distribución.

CAPÍTULO

4

RECURSOS HUMANOS EMPLEADOS EN LA DETECCIÓN, LOCALIZACIÓN Y REPARACIÓN DE FUGAS DE AGUA



4.1. Recursos humanos

La eficaz detección, localización y reparación de fugas en una red de agua potable requiere la participación coordinada de diversos recursos humanos, cada uno con funciones y competencias específicas (Zhou et al., 2021). A continuación, se describe el personal requerido en este proceso:

Jefe de departamento. Generalmente es un ingeniero civil con conocimientos técnicos y competencias interpersonales para liderar de manera eficaz a su equipo. Tiene la responsabilidad de coordinar y supervisar todo el proceso de detección, localización y reparación de fugas, en estrecha colaboración con los usuarios del sistema (Hu et al., 2021; Javed et al., 2025).

Jefe de cuadrilla. Es la persona encargada de dirigir las actividades asignadas por el jefe de departamento. Sus funciones incluyen la asignación de tareas al equipo operativo, la supervisión directa de los trabajos en campo y la elaboración de informes diarios de avance (Hu et al., 2021).

Personal de detección y localización de fugas. Este equipo técnico es responsable de identificar, diagnosticar y reparar las fugas reportadas en la red de distribución de agua potable. Las tareas se desarrollan conforme a las notificaciones del sistema y bajo la supervisión del jefe de cuadrilla. El personal requerido incluye (AWWA, 2019):

- 1 operario de maquinaria para la excavación de zanjas
- 1 a 2 peones de apoyo
- 1 operario en la casa de máquinas (responsable de la apertura y cierre de válvulas)
- 1 chofer asignado a la movilidad del equipo y materiales
- 1 operario experto en el uso de geófonos y correladores acústicos

Usuarios del sistema. Los usuarios tienen la responsabilidad de reportar de manera oportuna los eventos de fuga identificados en su entorno. Deben proporcionar la mayor cantidad de información posible para facilitar la planificación de la intervención técnica.

Secretario/a. Es el personal encargado de recibir los reportes de fuga realizados por los usuarios. Además, es responsable de procesar, organizar y archivar la documentación generada por las cuadrillas técnicas durante las actividades de reparación (Medina, 2009; Javed et al., 2025).

4.2. Equipos, herramientas y materiales utilizados en la detección, localización y reparación de una fuga de agua

Los equipos utilizados deben encontrarse en condiciones óptimas de funcionamiento y disponibilidad operativa. Su correcto estado garantiza la eficacia y continuidad de las labores de detección, localización y reparación de fugas en la red de distribución. La confiabilidad del proceso depende, en gran medida, del buen estado de los elementos utilizados durante la intervención técnica. A continuación, se detalla el equipamiento necesario:

- **Equipos.** Dispositivos acústicos (geófono, correladores), data loggers, retroexcavadora y máquina para corte de concreto.
- **Herramientas.** Llaves especializadas para fontanería, sierra para corte de tubería, llave perica para cierre de válvulas.
- **Materiales.** Accesorios hidráulicos, tubería de reposición, pegamento para tubería y cinta teflón.

Figura 53. Herramientas utilizadas para la detección y localización de fugas

Nota. Tomado de Herramientas especializadas para plomería [Fotografía], Freepik, 2015.



4.3. Trabajos realizados por el personal

Es importante destacar que el manual proporciona una exposición exhaustiva de las tareas específicas que realizará cada miembro del equipo. Cada fase del proceso se detalla minuciosamente, brindando una comprensión eficaz de las responsabilidades individuales de cada participante involucrado en el abordaje integral de la fuga.

► Jefe de departamento

- Tener conocimiento en normas y reglamentos de seguridad para resguardar la integridad de su cuadrilla de trabajo.
- Notificar a los usuarios de la red acerca del corte del servicio para llevar a cabo los trabajos necesarios.
- Llevar a cabo la supervisión y realizar informes acerca de los trabajos que se han realizado.
- Llevar a cabo la supervisión y realizar informes acerca de los trabajos que se han realizado.

► Jefe de cuadrilla

- Socializar con la cuadrilla acerca de los trabajos que se vayan a realizar.
- Elaborar informes de los trabajos realizados.

► Personal de detección de fugas

- El operario encargado llevar a cabo la inspección de las conducciones a fin de detectar posibles fugas.
- El operario del geófono será el encargado de realizar un recorrido a fin de detectar la posible fuga, este empleará el equipo adecuado para realizar dicho trabajo.
- El operario será el encargado de llenar el informe del reporte de la fuga, y será entregado posteriormente al Ingeniero encargado para su análisis y registro de información.

► Cuadrilla de reparación de fuga

- **Operario de la casa de máquinas.** Realizará el cierre de válvulas necesario para garantizar condiciones seguras durante la intervención.
- **Operario de maquinaria.** Ejecutará la excavación de zanjas para exponer la tubería afectada. Esta labor podrá realizarse mediante maquinaria (retroexcavadora) o de forma manual con apoyo de peones. Una vez finalizada la reparación, se procederá al relleno de la zanja.
- **Peón.** Colaborará en tareas de excavación y será responsable de llenar el informe de reparación de fugas, el cual será entregado al jefe de cuadrilla para su validación.



CAPÍTULO

5

SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (SST)



La seguridad y la salud en el trabajo son aspectos fundamentales que deben ser prioritarios en cualquier ambiente laboral. En este capítulo, abordaremos las políticas, prácticas y procedimientos necesarios para promover un entorno laboral seguro y saludable para todos los obreros.

5.1. Importancia de la SST

La seguridad y salud en el trabajo no solo protegen a los empleados de lesiones y enfermedades laborales, sino que también juegan un papel crucial en la mejora de la productividad, la moral y la reputación de la empresa. Un entorno laboral seguro y saludable es esencial tanto para el bienestar físico y mental de los trabajadores como para el éxito sostenible de la organización (Organización Internacional del Trabajo [OIT], 2023).

5.2. Políticas de la SST

Es imperativo que todas las organizaciones establezcan políticas claras y transparentes en materia de seguridad y salud en el trabajo (Morales & Cedeño, 2020). Estas políticas deben incluir la asignación de responsabilidades, la identificación de riesgos laborales, la capacitación del personal y los procedimientos para reportar incidentes y emergencias.

5.3. Equipos de Protección Personal (EPP)

Los equipos de protección personal (EPP) son dispositivos diseñados para resguardar a los trabajadores de riesgos laborales que no pueden ser eliminados o controlados por otros medios (Lyman et al., 2020; Leite et al., 2024). Es responsabilidad de la empresa proporcionar y mantener en buen estado los EPP necesarios para cada puesto de trabajo, además de capacitar a los empleados en su uso adecuado.

► Importancia de los EPP

Los EPP son esenciales cuando las medidas de control de ingeniería o administrativas no son suficientes para eliminar o reducir los riesgos laborales a niveles aceptables. Estos dispositivos actúan como barreras físicas entre el trabajador y los peligros potenciales, resguardando su integridad física y minimizando el riesgo de lesiones (Sanz & Rodríguez, 2011).

► Selección de EPP

La selección adecuada de los EPP depende de la naturaleza de los riesgos presentes en el lugar de trabajo. Es fundamental realizar evaluaciones de riesgos para identificar los peligros específicos a los que están expuestos los trabajadores y, con base en estos, elegir los EPP apropiados para mitigar dichos riesgos.

Entre los EPP más comunes se incluyen cascos, protectores auditivos, gafas de seguridad, guantes, calzado de protección y equipos de protección respiratoria, entre otros (Lyman et al., 2020).

► Uso adecuado de EPP

El uso adecuado de los EPP es fundamental para garantizar su eficacia y protección. Los trabajadores deben ser entrenados adecuadamente sobre cómo usar cada tipo de equipo, incluyendo las técnicas correctas para colocarlo, ajustarlo y retirarlo. Además, es crucial que los empleados comprendan la importancia de usar el EPP en todo momento cuando estén expuestos a riesgos laborales (Sanz & Rodríguez, 2011).

5.3.1. Clasificación de los EPP

Se dividen en dos categorías principales: EPP individuales y EPP colectivos. Ambos tipos desempeñan un papel fundamental en la protección de los trabajadores, aunque se aplican en diferentes contextos y situaciones laborales.

- **Protección para los oídos.** Tapones para los oídos y orejeras, diseñados para proteger contra el ruido excesivo y prevenir la pérdida auditiva.
- **Protección respiratoria.** Mascarillas y respiradores que filtran contaminantes atmosféricos y protegen las vías respiratorias.
- **Protección para las manos y los brazos.** Guantes de seguridad, utilizados para proteger contra cortes, abrasiones, exposición a productos químicos y temperaturas extremas.

- **Protección para los pies y las piernas.** Calzado de seguridad con punteras reforzadas y suelas antideslizantes, diseñado para proteger contra impactos, perforaciones y riesgos eléctricos.

► Equipos de protección personal colectivos (EPC)

Los Equipos de Protección Personal Colectivos son dispositivos o barreras diseñadas para proteger a un grupo de trabajadores o a una zona específica del lugar de trabajo. Algunos ejemplos de EPC incluyen:

- **Barandillas y pasamanos.** Proporcionan protección contra caídas desde alturas elevadas, como plataformas y escaleras.

- **Señalización de seguridad.** Son advertencias visuales y audibles que alertan a los trabajadores sobre peligros potenciales en el lugar de trabajo.

- **Ventilación localizada.** Son sistemas de ventilación que eliminan los contaminantes del aire en áreas específicas de trabajo.

- **Delimitación de áreas.** Consiste en el marcado y delimitación de zonas de trabajo peligrosas para evitar la entrada no autorizada y proteger a los trabajadores.

- **Líneas de vida.** Son sistemas de anclaje y sujeción que permiten a los trabajadores realizar trabajos en alturas de manera segura.

- **Duchas de emergencia y lavaojos.** Son instalaciones diseñadas para proporcionar tratamiento inmediato en caso de exposición a productos químicos peligrosos.



Figura 54. Equipos de protección personal

Nota. Tomado de Seguridad y salud de los trabajadores [Fotografía] Freepik, 2021.



Figura 55. Equipos de protección colectiva
 Nota. Tomado de Equipo de protección de los
 trabajadores [Fotografía], Freepik, 2021.

► Formación y capacitación

Es imperativo que todas las organizaciones establezcan políticas claras y transparentes en materia de seguridad y salud en el trabajo. Estas políticas deben incluir la asignación de responsabilidades, la identificación de riesgos laborales, la capacitación del personal y los procedimientos para reportar incidentes y emergencias (Ramos & Rivera, 2021)

5.4. Promoción de la salud en el trabajo

Además de la prevención de lesiones y enfermedades laborales, es importante promover la salud física y mental de los empleados en el lugar de trabajo (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022). Esto puede incluir programas de bienestar, actividades de ejercicio físico, promoción de hábitos saludables y acceso a servicios de atención médica preventiva (Bambra et al., 2015).

5.5. Gestión de emergencias y planes de contingencia

Todas las organizaciones deben contar con planes de contingencia y procedimientos de emergencia bien definidos para responder eficazmente a situaciones de crisis, como incendios, accidentes graves o desastres naturales (Méndez, 2019). Es fundamental que todos los empleados estén familiarizados con estos planes y sepan cómo actuar en caso de emergencia (OSHA, 2022).



► **Glosario de términos:**

- **Agua no contabilizada (ANC).** Agua perdida o no registrada dentro de un sistema de distribución de agua, que incluye fugas y otros factores.
- **Agua potable.** Agua apta para el consumo humano que cumple con los estándares físicos, químicos y bacteriológicos de acuerdo con la normatividad vigente.
- **Correlador acústico.** Dispositivo que compara las señales de sonido detectadas en diferentes puntos de una tubería para determinar la ubicación de una fuga.
- **Diámetro nominal.** Diámetro interior o efectivo de una tubería.
- **Equipos acústicos.** Dispositivos utilizados para detectar fugas de agua mediante el análisis de los sonidos producidos por el flujo de agua.
- **Estaciones de bombeo.** Instalaciones utilizadas para impulsar el agua a través de las tuberías de distribución.
- **Línea de conducción de agua.** Conjunto de tuberías de impulsión, conducción, redes de distribución, incluyendo las conexiones domiciliarias con sus accesorios, válvulas, cámaras de ingreso a sectores, medidores de caudal, grifos contra incendio, entre otros.
- **Operario.** Persona que realiza actividades relacionadas con la operación y mantenimiento de las redes de saneamiento.
- **Presión de servicio.** Es la presión expresada en metros columna de agua (mca) y medida en las redes de distribución con la que se suministra el agua a la población.
- **Red de distribución.** Conjunto de tuberías, con sus accesorios, válvulas y estructuras que abastecen de agua potable a la población mediante conexiones domiciliarias.



- **Sectorización.** División de una red de distribución en sectores más pequeños para facilitar la detección y reparación de fugas.
- **Sistema de distribución de agua potable.** Conjunto de elementos, como tuberías, accesorios, reservorios, entre otros, que permiten transportar el agua desde la fuente de abastecimiento hasta los puntos de consumo en condiciones adecuadas de calidad, cantidad, presión y continuidad.
- **Pérdidas de agua.** Volumen de agua perdido entre el punto de suministro y el medidor del cliente debido a diversas razones.



BIBLIOGRAFÍA



- Al-Washali, T., Sharma, S., & Kennedy, M. (2016). Investigating water distribution network losses using water balance and performance indicators. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 65(6), 459–468.
- American Water Works Association (AWWA). (2019). Water audits and loss control programs (3rd ed., p. 87). AWWA Manual M36.
- Bambra, C., Gibson, M., Sowden, A., Wright, K., Whitehead, M., & Petticrew, M. (2015). Tackling the wider social determinants of health and health inequalities: Evidence from systematic reviews. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 64(4), 284–291.
- Broséus, R., Talbot, A., & Garneau, C. (2021). Thermography for water leak detection in urban infrastructure. *Journal of Building Engineering*, 42, 197–201.
- Bruno, F., De Marchis, M., Milici, B., Saccone, D., & Traina, F. (2021). A pressure monitoring system for water distribution networks based on Arduino microcontroller. *Water*, 13(17), 2321. <https://doi.org/10.3390/w13172321>
- Bustamante, F., Villacrés, M., & Delgado, A. (2022). Gestión integral de la seguridad y salud ocupacional (p. 152). Editorial UTPL.
- Casillas, M., et al. (2013). Métodos de detección y localización de fugas en redes de abastecimiento de agua potable. *Ingeniería del Agua*, 17(3), 211–222.
- Cembrano, G., et al. (2014). Método para la localización de fugas de agua en redes de distribución. *Ingeniería del Agua*, 17(1), 25–35.
- Chaudhry, R. M. (2014). Behavior-based safety on construction sites: A case study. *Accident Analysis & Prevention*, 70, 378–390.
- Cheng, J., Jiang, Z., Wu, H., & Zhang, X. (2025). Water pipeline leak detection method based on transfer learning. *Water*, 17(3), 368. <https://doi.org/10.3390/w17030368>



Detectores Industriales. (n.d.). Detector de fugas de agua XMic. Retrieved January 8, 2023, from <https://bityl.co/GaF7>

Fan, H., Tariq, S., & Zayed, T. (2022). Acoustic leak detection approaches for water pipelines. *Automation in Construction*, 138, 104226.

Fanner, P., & Thornton, J. (2005). Management of non-revenue water (pp. 35–39). IWA Publishing.

Farah, E., & Shahrou, I. (2024). Water leak detection: A comprehensive review of methods, challenges, and future directions. *Water*, 16(20), 2975. <https://doi.org/10.3390/w16202975>

Farley, M., & Trow, S. (2003). Losses in water distribution networks: A practitioner's guide to assessment, monitoring and control (pp. 56–67). IWA Publishing.

Fox, R. W., Pritchard, P. J., & McDonald, A. T. (2021). Introduction to fluid mechanics (10th ed., pp. 88–97). Wiley.

Freepik. (2010). Tubería rota con palanca [Fotografía]. Freepik. <https://www.freepik.es>

Freepik. (2015). Herramientas especializadas para fontanería [Fotografía]. Freepik. <https://www.freepik.es>

Freepik. (2021). Equipo de protección de los trabajadores [Fotografía]. Freepik. <https://www.freepik.es>

Freepik. (2021). Seguridad y salud de los trabajadores [Fotografía]. Freepik. <https://www.freepik.es>

FugaTec. (2013, septiembre 25). Cómo localizar una fuga de agua con geófono. <https://bityl.co/GaFD>

Hu, B. Z., Chen, W., Chen, D., Tan, D., & Shen, D. (2021). Review of model-based and data-driven approaches for leak detection and location in water distribution systems. *Water Supply*, 21(7), 3282–3306. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.101>

- Hydraleak. (n.d.). Correladores para detectar fugas. Retrieved January 8, 2023, from <https://bityl.co/GaFI>
- HYDREKA. (n.d.). ChronoFLO 2 caudalímetro de tiempo de tránsito. <https://www.hwm-latinoamerica.com>
- Iqbal, U., & Riaz, M. Z. B. (2024). Blockage at cross-drainage hydraulic structures – Advances, challenges and opportunities. *Heliyon*, 10(16), e35786. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35786>
- Jaramillo, R. (2023). Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos. Zona: Centro Norte de Loja [Fotografía].
- Javed, A., Wu, W., Sun, Q., & Dai, Z. (2025). Leak management in water distribution networks through deep reinforcement learning: A review. *Water*, 17(13), 1928. <https://doi.org/10.3390/w17131928>
- Joseph, K., Shetty, J., Patnaik, R., Matthew, N. S., Van Staden, R., Liyanage, W. P., Powell, G., Bennett, N., & Sharma, A. K. (2025). Early leak and burst detection in water pipeline networks using machine learning approaches. *Water*, 17(14), 2164. <https://doi.org/10.3390/w17142164>
- Karpf, A., Xu, L., & Baran, D. (2021). Leak detection technologies for water distribution systems: A review. *Water*, 13(1), 109–120.
- Ladera, J., Barros, D., Carpitella, S., Abolghasem, S., Izquierdo, J., & Brentan, B. (2025). Risk analysis of contamination spread in water distribution systems: An intelligent approach based on complex network theory. En *Intelligent and Fuzzy Systems (INFUS 2025). Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 1529, pp. 808–815). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-XXXXX-X_XX
- Lamaddalena, N., & Pereira, L. S. (2007). Pressure-driven modeling for performance analysis of irrigation systems operating on demand. *Agricultural Water Management*, 90(1–2), 36–44.

- Leite, P. A. M., Di Prima, S., Schmidt, L. M., & Wilcox, B. P. (2024). A simple infiltrometer automated with a user-friendly pressure datalogger. *Vadose Zone Journal*, 23, e20366. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20366>
- Liu, R., Zayed, T., & Xiao, R. (2024). Advanced acoustic leak detection in water distribution networks using integrated generative model. *Water Research*, 254, 121434. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121434>
- Lobos, J. (2022). Metodología para la detección de fugas en redes de distribución de agua potable [Tesis de pregrado, Universidad de Loja].
- Lyman, T. P., Elsmore, K., Gaylord, B., Byrnes, J. E. K., & Miller, L. P. (2020). Open Wave Height Logger: An open source pressure sensor data logger for wave measurement. *Limnology and Oceanography: Methods*, 18(7), 335–345. <https://doi.org/10.1002/lom3.10370>
- Martínez, J. A. (2018). Mecánica de fluidos en ingeniería civil (pp. 66–76). Alfaomega.
- Medina, L. (2009). Gestión operativa de redes de agua potable (pp. 51–52). Editorial Universidad Autónoma Metropolitana.
- Medina, G. M. (2009). Políticas para el control activo de fugas (p. 89).
- Méndez, M. (2019). Seguridad industrial y salud ocupacional (pp. 86–90). Alfaomega.
- Montoya, J., & Montoya, L. (2012). Optimización de un sistema de abastecimiento de agua potable mediante el uso de modelos de simulación [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia].
- Morales, E., & Cedeño, R. (2020). Manual de gestión de seguridad ocupacional (p. 119). Editorial Universitaria.

- Municipio de Loja. (2018). Fascículo Provincial Loja: resultados del Censo de Población y Vivienda 2010. Loja, Ecuador: Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC).
- Nimri, W., Wang, Y., Zhang, Z., Deng, C., & Sellstrom, K. (2023). Data-driven approaches and model-based methods for detecting and locating leaks in water distribution systems: A literature review. *Neural Computing and Applications*, 35, 11611–11623. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08497-x>
- Nishikawa, Y., & Udo, A. (1982). Uniform pressure control in water distribution networks including location of control points (pp. 656–669). Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFB0044420>
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2022). Emergency preparedness and response guide (p. 18). U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/emergency-preparedness>
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2022). Personal protective equipment. U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/personal-protective-equipment>
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2023). Seguridad y salud en el trabajo: Principios y estrategias (p. 7). Ginebra: OIT.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022). Entornos laborales saludables: Marco para la acción. Ginebra: OMS.
- Pan, N., Jiang, S., Du, Y., & Hu, Z. (2020). Infrared thermal imaging for intelligent leakage detection in underground integrated pipe corridors. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(6), 4503–4515. <https://doi.org/10.1520/JTE20180420>
- Pixabay. (2018). Volante y válvula de cierre [Fotografía]. Pixabay. <https://www.pixabay.com>



- Pixabay. (2019). Válvula [Fotografía]. Pixabay. <https://www.pixabay.com>
- Pixabay. (2020). Medidor de temperatura y termografía [Fotografía]. Pixabay. <https://www.pixabay.com>
- Pixabay. (2021). Fuga en tubería [Fotografía]. Pixabay. <https://www.pixabay.com>
- Pool, S., & Seibert, J. (2021). Gauging ungauged catchments – Active learning for the timing of point discharge observations in combination with continuous water level measurements. *Journal of Hydrology*, 598, 126448.
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25–45.
- Quiñones-Grueiro, L., et al. (2021). Implementation of a methodology for leakage detection and localization in water distribution systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 70(3), 290–304.
- Ramos, J., & Rivera, F. (2021). Salud ocupacional y gestión de riesgos laborales (p. 133). Universidad Nacional de Colombia.
- Rathore, S. S., Misra, R., Kallesøe, C. S., & Wisniewski, R. (2023). Leakage diagnosis with a contamination mitigation control framework using a graph theory based model. *Annual Reviews in Control*, 55, 498–519. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.03.010>
- Reyes, L. (2019). Principios de hidráulica para sistemas de agua potable (pp. 29–34). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rodríguez, M. A., & Sanz, J. (2011). Técnicas de control de pérdidas en redes de distribución de agua (pp. 160–175). Fundación Canal.



- Romagnoli, J., Repetto, M., & Carlevaro, C. (2020). Early leak detection and location in pipeline systems: A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 65, 223–235.
- Sarango, H. (2023). Localización de fugas de agua en la red pública mediante equipos acústicos. Zona: Centro Este de Loja.
- Serafeim, A. V., Fourniotis, N. Th., Deidda, R., Kokosalakis, G., & Langousis, A. (2024). Leakages in water distribution networks: Estimation methods, influential factors, and mitigation strategies — A comprehensive review. *Water*, 16(11), 1534. <https://doi.org/10.3390/w16111534>
- Silva, A., Evangelista, L., Ferreira, C., Valença, J., & Mendes, M. P. (2024). Towards resilient pipeline infrastructure: Lessons learned from failure analysis. *Discover Applied Sciences*, 6(11), Article 585. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06273-7>
- Silva, C., Almeida, M., & Torres, J. (2019). Técnicas avanzadas en termografía infrarroja (pp. 51–53). Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- Steele, M., & Cohn, A. (2008). Thermographic imaging in utility inspections. *InfraMation Proceedings*, FLIR Systems.
- Supmea. (n.d.). Caudalímetro electromagnético SUP-LDG. Retrieved January 8, 2023, from <https://bityl.co/GaGx>
- Teii Ingeniería Mexicana. (n.d.). Data logger presión. Retrieved January 8, 2023, from <https://bityl.co/G6Gt>
- Thornton, J., Sturm, R., & Kunkel, G. (2008). *Water loss control* (2nd ed., pp. 40–90). McGraw-Hill.
- Vecteezy. (2020). Power plant project activity for water treatment plant and checking equipment [Fotografía]. Vecteezy. <https://www.vecteezy.com>



- Wu, Y., Liu, S., & Kapelan, Z. (2024). Addressing data limitations in leakage detection of water distribution systems: Data creation, data requirement reduction, and knowledge transfer. *Water Research*, 267, 122471. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122471>
- Zhou, Y., Wu, Z., & Xu, H. (2021). Human resource optimization in leak detection tasks in urban water systems. *Water Research*, 205, 117663.



ANEXOS

Anexo 1
Informe de detección y localización de fuga de agua. Reporte de daño.

INFORME DE DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGA DE AGUA
REPORTE DE DAÑO

Fecha: _____

Hoja Nro: _____

Ubicación/Sector: _____

Hora inicio/fin: _____

Tiempo empleado: _____

Croquis de ubicación de la fuga, especificar coordenadas y referencia

Lugar en el que se detectó el daño:

• Línea de impulsión

• Línea de conducción

• Red de distribución

• Paso elevado

• Válvula

• Conexión domiciliaria

• Conexión clandestina

• Hidratante

Longitud del tramo analizado (m): _____

Especificar equipos empleados: _____

Nombre: _____

Firma: _____

INFORME DE DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGA DE AGUA REPORTE DE DAÑO

Fecha: _____ Hoja Nro: _____

Ubicación/Sector: _____

Hora inicio/fin: _____ Tiempo empleado: _____

Croquis de ubicación de la fuga, especificar coordenadas y referencia

A blank sheet of graph paper with a grid pattern. The grid consists of small squares formed by thin black lines. There are approximately 20 columns and 15 rows of squares. A thicker vertical line runs down the left side, creating a margin. A thicker horizontal line runs across the top, below the header area.

Lugar en el que se detectó el daño:

- | | | | |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| • Línea de impulsión | <input type="text"/> | • Válvula | <input type="text"/> |
| • Línea de conducción | <input type="text"/> | • Conexión domiciliaria | <input type="text"/> |
| • Red de distribución | <input type="text"/> | • Conexión clandestina | <input type="text"/> |
| • Paso elevado | <input type="text"/> | • Hidratante | <input type="text"/> |

Material de la tubería

- | | | | |
|------------------|----------------------|---------|----------------------|
| • PVC | <input type="text"/> | • Cobre | <input type="text"/> |
| • Asbesto | <input type="text"/> | • Otro | <input type="text"/> |
| • Hierro fundido | <input type="text"/> | | |

Lugar en el que se detectó el daño:

- | | | | |
|-----------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| • Corrosión | <input type="text"/> | • Mala instalación | <input type="text"/> |
| • Paso vehicular | <input type="text"/> | • Falla geotécnica | <input type="text"/> |
| • Golpe de aire | <input type="text"/> | • Otras causas | <input type="text"/> |
| • Cumplimiento de vida útil | <input type="text"/> | | <input type="text"/> |

Profundidad de excavación en la zanja (m): _____

Tiempo especulado de fuga: _____

Equipos empleados en la reparación: : _____

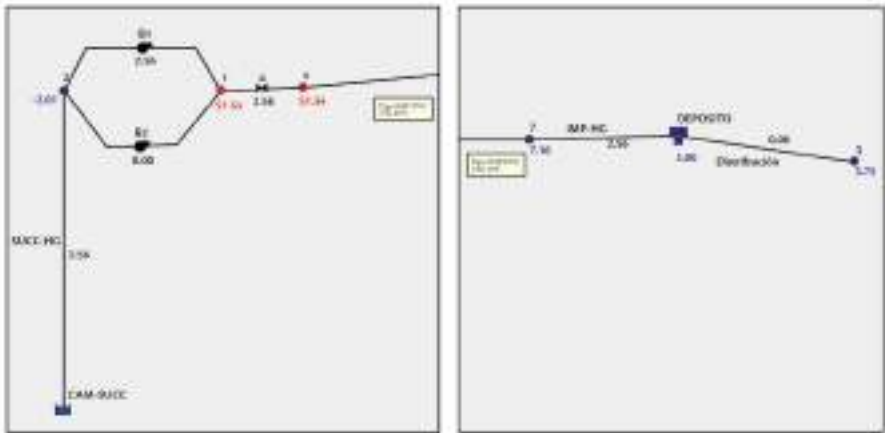
Nombre: _____

Firma: _____

Anexo 3
Línea de impulsión de la Estación de Bombeo Clodoveo

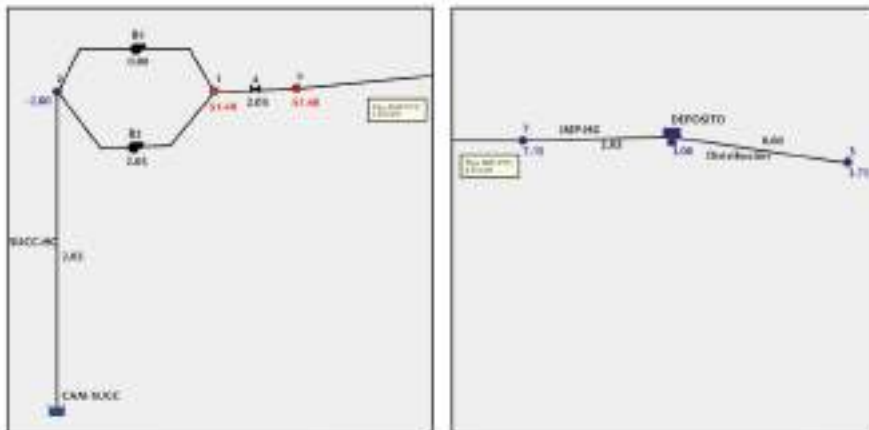


Anexo 4
Simulación en el software Epanet la línea de impulsión en la Estación de Bombeo Clodoveo. Bomba 1 encendida.



Anexo 5

Simulación en el software Epanet la línea de impulsión en la Estación de Bombeo Clodoveo. Bomba 2 encendida.



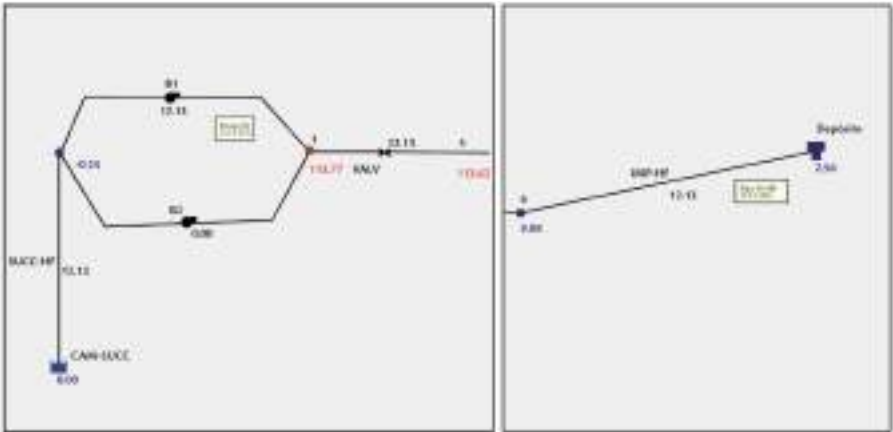
Anexo 6

Línea de impulsión de la Estación de Bombeo Las Peñas.



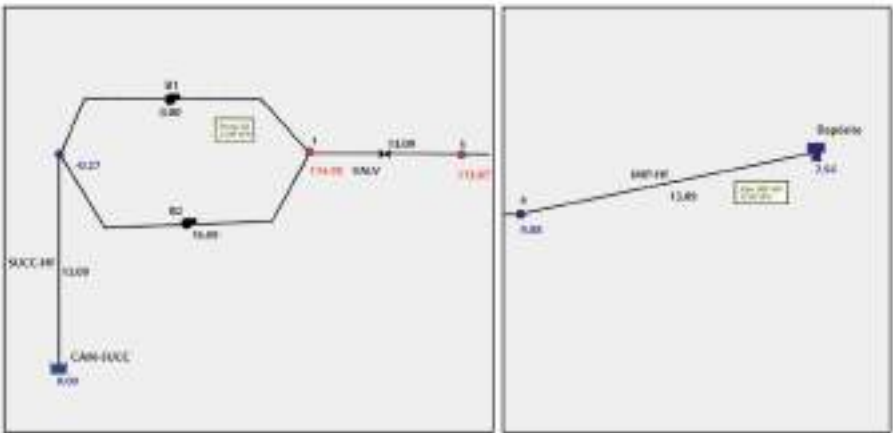
Anexo 7

Simulación en el software Epanet la línea de impulsión en la Estación de Las Peñas. Bomba 1 encendida.



Anexo 8

Simulación en el software Epanet la línea de impulsión en la Estación de Las Peñas. Bomba 2 encendida.



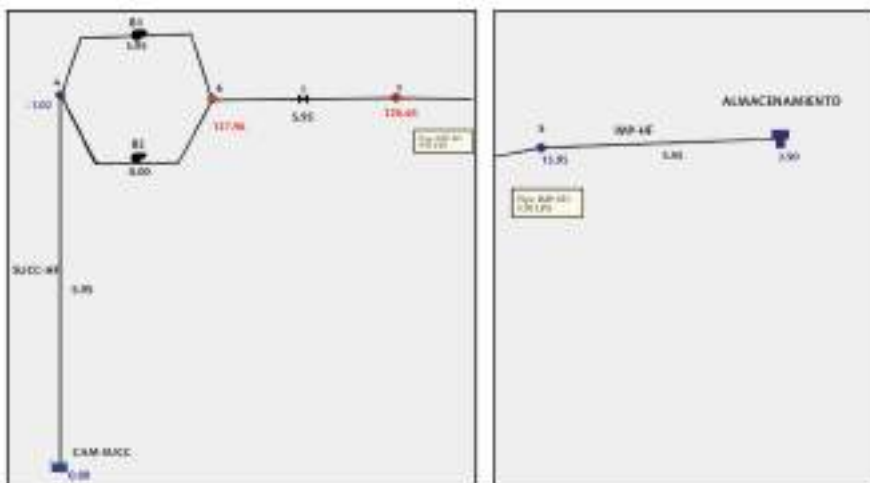
Anexo 9

Línea de impulsión de la Estación de Bombeo Noroccidental.



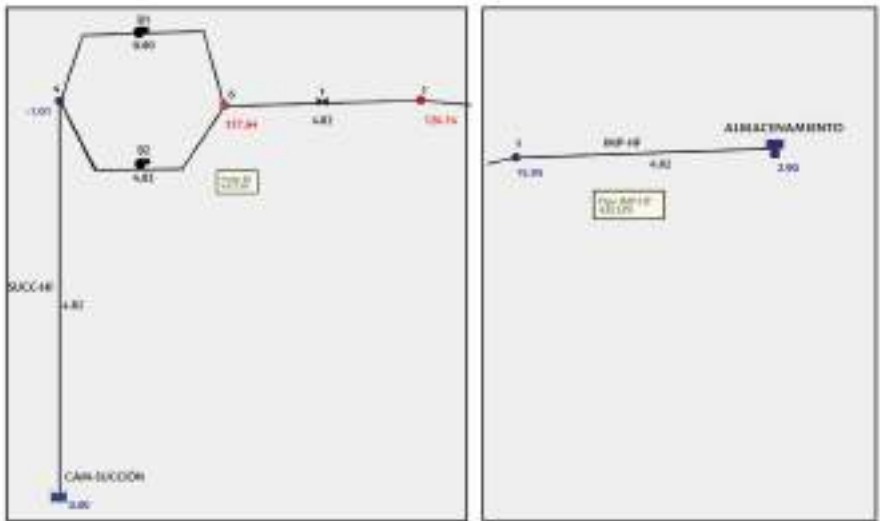
Anexo 10

Simulación en el software Epanet la línea de impulsión en la Estación Noroccidental. Bomba 1 encendida.



Anexo 11

Simulación en el software Epanet la línea de impulsión en la Estación Noroccidental. Bomba 2 encendida.



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
San Cayetano Alto – Loja
Telf.: 1800 88 75 88
Año: 2025





ISBN: 978-9942-7409-1-5



9 789942 740915

Práctica Integral para la Detección y Localización de Fugas de Agua en Redes Presurizadas es una guía esencial para ingenieros, técnicos y profesionales encargados de la gestión del agua potable. Este libro aborda en profundidad los principios hidráulicos fundamentales, las causas comunes de las fugas en redes de distribución, y las tecnologías más avanzadas para su detección, incluyendo caudalímetros, correladores acústicos y geófonos.

Con un enfoque práctico, el manual ofrece procedimientos detallados para la identificación y localización precisa de fugas, lo que contribuye a la reducción de pérdidas de agua, mejora la eficiencia operativa y favorece la sostenibilidad económica y ambiental. A través de estudios de caso y ejemplos reales, los lectores aprenderán a aplicar estas técnicas en el mantenimiento y la reparación de redes presurizadas.

Diseñado tanto para profesionales como para estudiantes en ingeniería civil y disciplinas relacionadas, *Práctica Integral para la Detección y Localización de Fugas de Agua en Redes Presurizadas* se convierte en una herramienta clave para garantizar un suministro eficiente y seguro de agua.

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

San Cayetano Alto - Loja

Telf.: 1800-88 75 88

Año: 2025

**UTPL***La Universidad Católica de Loja*