



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

TITULACIÓN DE INGENIERO CIVIL

**Técnicas de detección y localización de fugas de agua en
redes de distribución**

Trabajo de fin de carrera

Autor:

Abarca Vivanco Danny Christian

Director:

Benavides Muñoz Holger Manuel, PhD

LOJA - ECUADOR

2012

Certificación

Doctor.

Holger Manuel Benavides Muñoz

DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE CARRERA

CERTIFICA:

Que el presente trabajo, denominado “Técnicas de detección y localización de fugas de agua en redes de distribución” realizado por el profesional en formación: Abarca Vivanco Danny Christian; cumple con los requisitos establecidos en las normas generales para la Graduación de la Universidad Técnica Particular de Loja, tanto en el aspecto de forma como de contenido, por lo cual me permito autorizar su presentación para los fines pertinentes.

Loja, septiembre 2012

f).....

C.I......

Cesión de derechos

Yo Abarca Vivanco Danny Christian declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: "Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad"

f).....

Autor: Abarca Vivanco Danny Christian

C.I: 110411724-5

AUTORÍA

Las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo de fin de carrera, son de exclusiva responsabilidad del autor.

.....
Abarca Vivanco Danny Christian

DEDICATORIA

*A Dios, por darme la fuerza necesaria para salir adelante,
a mis queridos padres: Flavio y Gladys, por todo su amor,
sacrificio y apoyo incondicional,
a mis hermanos: Andrés y Sophia, por estar siempre conmigo,
a mis amigos, por ayudarme y apoyarme siempre.*

Con estima y aprecio: Danny

AGRADECIMIENTO

Dejo constancia de mi más sincero y especial agradecimiento a:

Mis padres, quienes con esfuerzo, sacrificio y amor permitieron que realice mis estudios académicos

Dr. Holger M. Benavides Muñoz, Director del trabajo de fin de carrera; por sus valiosas sugerencias y orientaciones para la realización del presente proyecto, que han sido valiosas para la culminación del mismo.

A los docentes de la UCG por sus conocimientos impartidos a lo largo de mi formación profesional.

.....

El autor

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Certificación.....	ii
Cesión de derechos	iii
Autoría	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi

CAPÍTULO I

EXORDIO

1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. OBJETIVOS	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. RESULTADOS ESPERADOS.....	4

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1. FUNDAMENTOS SOBRE FUGAS	7
2.1.1. Definición de fuga.....	7
2.1.2. Clasificación y tipo de fuga.....	7
2.1.3. Causas que producen las fugas.....	10
2.2. GESTIÓN DE FUGAS	11
2.2.1. Control activo de fugas.....	13
2.2.1.1. Sectorización	13
2.2.1.1.1. Objetivos de la sectorización	14
2.2.1.1.2. Como sectorizar la red de distribución	15
2.2.1.2. Nodos de control.....	17
2.2.1.2.1. Equipo de medición de caudal.....	17
2.2.1.2.1.1. Principio de funcionamiento del caudalímetro ultrasónico.....	18
2.2.1.2.1.2. Configuración del caudalímetro ultrasónico.....	19
2.2.1.2.1.3. Instalación del caudalímetro ultrasónico.....	20
2.2.1.2.1.4. Método de instalación del caudalímetro	21

2.2.1.2.2.	Equipo de registro de datos de presión.....	22
2.2.1.2.2.1.	Instalación de data logger.....	23
2.2.1.3.	Indicadores y benchmarking.....	25
2.2.1.3.1.	Indicadores de desempeño.....	27
2.2.1.3.2.	Indicadores porcentuales.....	28
2.2.1.3.2.1.	Índice de agua no contabilizada (IANC).....	28
2.2.1.3.2.2.	Índices de consumo.....	29
2.2.1.3.2.3.	Índice lineal de fugas.....	30
2.2.1.3.2.4.	Índice de fugas estructurales (IFE).....	32
2.2.1.4.	Método matemático utilizado en la detección de fugas – Análisis de Flujos Mínimos Nocturnos (AFMN).....	34
2.2.1.4.1.	Generalidades del caudal mínimo nocturno.....	34
2.2.1.4.2.	Variaciones del consumo nocturno.....	38
2.2.1.4.3.	Corrección del caudal mínimo nocturno.....	39
2.2.1.4.4.	Extrapolación de caudales de fuga.....	41
2.2.1.4.5.	Procedimiento para el desarrollo de la metodología AFMN.....	41
2.2.1.5.	Métodos de localización de fugas.....	45
2.2.1.5.1.	Generalidades de la localización de fugas.....	45
2.2.1.5.2.	Factores que afectan la intensidad y frecuencia del sonido de las fugas para su localización.....	46
2.2.1.5.3.	Equipos que se utilizan en la localización de fugas.....	47
2.2.1.5.3.1.	Fonómetro.....	47
2.2.1.5.3.2.	Geófono.....	49
2.2.1.5.3.3.	Correlador acústico.....	49
2.2.1.5.4.	Métodos utilizados en la localización de fugas.....	50
2.2.1.5.4.1.	Método “Tritón”.....	50
2.2.1.5.4.2.	Inyección de gas.....	51
2.2.2.	Gestión de la presión.....	52
2.2.2.1.	Factores considerados en la gestión de la presión.....	53
2.2.2.1.1.	Relación entre caudal de fuga y presión de servicio.....	53
2.2.2.1.2.	Relación entre la frecuencia del origen de nuevas fugas y la presión de servicio.....	55
2.2.2.2.	Dispositivos para el control de la presión.....	57
2.2.3.	Gestión de la infraestructura.....	58
2.2.3.1.	Mantenimiento.....	58
2.2.3.2.	Renovación de la infraestructura.....	59
2.2.3.2.1.	Definición de renovación de tuberías.....	59
2.2.3.2.2.	Definición de rehabilitación de tuberías.....	59
2.2.3.2.3.	Diferencias entre la renovación y la rehabilitación.....	59

2.2.3.2.4.	Factores que son considerados en la renovación y rehabilitación de tuberías en sistemas de distribución de agua potable	60
2.2.3.2.5.	Ventajas que presenta la renovación y rehabilitación de tuberías de distribución sin apertura de zanja	61
2.2.3.2.6.	Tecnologías aplicadas a la renovación y rehabilitación de tuberías en sistemas de agua potable y alcantarillado	62
2.2.3.2.6.1.	Pipe Bursting (Reventamiento)	63
2.2.3.2.6.2.	Slipinning	65
2.2.3.2.6.3.	Sistemas de limpieza	66

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS DE FLUJOS MÍNIMOS NOCTURNOS

3.1.	ANÁLISIS DE FLUJOS MÍNIMOS NOCTURNOS (AFMN) – DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	70
3.2.	REGISTRO DE DATOS – TABULACIÓN	70
3.3.	EXTRAPOLACIÓN DE CAUDALES DE FUGA	72
3.4.	ANÁLISIS DE LOS CONSUMOS GENERADOS EN EL SECTOR	74
3.5.	ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS TÉCNICAS, CÁLCULO DE LOS DIFERENTES ÍNDICES PARA LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	77

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

4.1.	EVALUACIÓN DE DATOS REGISTRADOS	86
4.2.	ANÁLISIS DE DATOS APLICANDO EL AFMN	86
4.3.	EVALUACIÓN Y CÁLCULO DE ÍNDICES DE PÉRDIDAS	90

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	CONCLUSIONES.....	95
5.2.	RECOMENDACIONES	100

ANEXOS

Anexo 1	Formato para registro de datos caudal y presión	102
Anexo 2	Extrapolación de caudales	103
Anexo 3	Cálculo de fugas latentes.....	104

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Índice de cuadros y tablas

Cuadro 2.1. Caudales aproximados de algunos tipos de fugas	9
Cuadro 2.2. Parámetros utilizados en el análisis del CARL.....	26
Cuadro 2.3. Valores de referencia de la existencia de fugas para índices de consumo	29
Cuadro 2.4. Matriz de evaluación de pérdidas físicas	33
Cuadro 2.5. Valores medios de consumo nocturno suministrado a diversos tipos de usuarios no-domésticos.	36
Cuadro 2.6. Valores de F y G para cálculo de fugas latentes	38
Cuadro 2.7. Factor de corrección para estandarizar los QMN a una presión de 50 m c.a.	39
Cuadro 2.8. Factor de corrección para estandarizar los QMN a una presión de 40 m c.a.	40
Cuadro 2.9. Distancias de transmisión de ruidos en tuberías	50
Cuadro 2.10. Valores promedio del exponente N_1	55
Cuadro 2.11. Valores promedio del exponente N_2	56
Cuadro 3.1. Información del sector A-1	70
Cuadro 4.1. Días de menor consumo del sector A-1	86
Cuadro 4.2. Días de mayor consumo del sector A-1	86
Cuadro 4.3. Caudales extrapolados de los días de menor consumo	87
Cuadro 4.4. Caudales extrapolados de los días de mayor consumo	87
Cuadro 4.5. Caudales obtenidos de fugas latentes (días de mayor y menor consumo)	88
Cuadro 4.6. Caudales obtenidos de fugas latentes (días de mayor y menor consumo)	88
Cuadro 4.7. Caudales obtenidos de fugas latentes (días de mayor y menor consumo)	88
Cuadro 4.8. Caudales promedios del sector A-1	89
Cuadro 4.9. Resumen de caudales registrados del sector A-1	89
Cuadro 4.10. Consumos generados en el sector A-1	91
Cuadro 4.11. Índices de consumo obtenidos del sector A-1	91
Cuadro 4.12. Índice lineal de fugas del sector A-1	92
Tabla 3.1. Tabulación de datos de caudal y presión del sector A-1	71

Índice de figuras y esquemas

Esquema 2.1. Clasificación y tipo de fugas	7
Esquema 2.2. Componentes del caudal mínimo nocturno	34
Esquema 2.3. Tecnologías de renovación y rehabilitación.....	62
Figura 2.1. Actividades en la gestión de fugas	12
Figura 2.2. Sectorización de red de distribución	14
Figura 2.3. Sistema típico de tiempo de tránsito	19

Figura 2.4. Disposición de transductores en el “método z”	21
Figura 2.5. Colocación de transductores en tubería	22
Figura 2.6. Relación intensidad – presión de agua.....	46

Índice de gráficos

Gráfico 2.1. Relación entre tipo de fugas y el nivel económico de pérdidas	9
Gráfico 2.2. Operación típica de rotura de tubería.....	63
Gráfico 3.1. Caudal a la salida del tanque del sector A-1	72
Gráfico 3.2. Presiones promedio del sector A-1	72
Gráfico 3.3. Evolución de caudales registrados, entregados y fugados del sector A-1	74
Gráfico 3.1. %ANC DEL SECTOR A-1 PERIODO 0CT 09/DIC 09	80
Gráfico 4.1. Volumen de ANC del sector A-1 período 0CT 09/DIC 09	90

Índice de imágenes

Imagen 2.1. Caudalímetro ultrasónico DCT 7088	18
Imagen 2.2. Data logger	22
Imagen 2.3. Instalación de data logger	24
Imagen 2.4. Esquema general de instalación de data logger.....	24
Imagen 2.5. Utilización del fonómetro en la localización de fugas.....	48
Imagen 2.6. Medidor de flujo del tiempo de transito “tritón tx10”	51
Imagen 2.7. Modelos de piggs más usuales	68

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación se enfoca en el desarrollo y aplicación de la metodología Análisis de flujos mínimos nocturnos, la misma que es propuesta en el informe "Managing leakage"; este método se utiliza para detectar la existencia de fugas de agua en sistemas de distribución, es decir detectar a través de un análisis de caudales, el caudal mínimo nocturno (QMN).

Este se presenta entre las 02h00 y 04h00 horas de la madrugada y se calcula en función de los consumos, del estado de la red de distribución y acometidas (conexiones domiciliarias), a través del incremento de este caudal se puede confirmar que en el sistema de distribución de agua potable existen fugas; atribuyéndose estas por el fisuramiento de alguna tubería o instalaciones defectuosas.

A través de los diferentes indicadores utilizados en la gestión activa de fugas como el índice de fugas estructurales (IFE), índice de agua no contabilizada (IANC), e índice lineal de fugas, se puede catalogar a un sistema de distribución de agua potable en deficiente o eficiente.

CAPÍTULO I

EXORDIO



1.1. INTRODUCCIÓN

Las fugas de agua potable en redes de distribución son eventos prevaletentes y constantes en el tiempo, estas son un problema común entre las empresas operadoras encargadas de la distribución de agua potable, y a través de ellas se puede caracterizar al sistema de distribución en excelente o deficiente, basándose principalmente en los volúmenes de agua que fugan y en el valor de algunos indicadores que más se utilizan en la gestión activa de fugas entre ellos tenemos el índice de fuga estructural (IFE), este permite medir la efectividad de las actividades de reparación y rehabilitación de la red como resultado de la gestión de fugas en relación a la presión de servicio del sistema, influyendo directamente en el estado de la infraestructura del mismo es decir, que para su cálculo se involucra factores como: la longitud de la red, número de acometidas, longitud de acometida, y la presión promedio de la red durante las 24 horas de servicio. Este indicador es propuesto por la International Water Association (IWA) y se lo toma como referencia para comparar con otros sistemas.

Se debe dar prioridad a la precisión en cuantificar las fugas de agua, de tal forma que se pueda conocer su origen, las causas que las provoca y la magnitud de las mismas. Al realizar esto se garantiza el desarrollo de programas eficientes para su control y reducción, es por ello que la presente investigación se enfoca en el desarrollo y la aplicación de la metodología “**análisis de flujos mínimos nocturnos**”, la cual es propuesta en el informe “Managing Leakage” a través de la cual se logra determinar mediante el uso de una hoja electrónica un valor de caudal mínimo nocturno (QMN) es decir, aquel caudal que ocurre entre las 02h00 y 04h00 horas de la madrugada.

Este se calcula en función de los consumos existentes, y del estado en que se encuentra la red, y acometidas (conexiones domiciliarias), sirve como referencia para determinar la existencia de fugas en la red de distribución.

Se debe tener bien claro que esta metodología no es de localización, más bien se considera como un método de detección, ya que si existe un incremento en el QMN este será un indicador de la presencia de alguna eventualidad en la red de distribución, las cuales en su mayoría se atribuyen a roturas o rajaduras en las tuberías o, a instalaciones defectuosas de accesorios.

Con la aplicación del AFMN se indica la ocurrencia de una posible fuga en la red de distribución, pero no se puede saber exactamente el lugar donde se presenta la



misma, para ello se utiliza algún método de localización como por ejemplo, el geófono instrumento que se utiliza comúnmente en algunas empresas operadoras encargadas de la distribución de agua potable.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La aplicación de la metodología investigada se realizará en función de la información perteneciente a un sistema de distribución de agua potable, cuyo nombre no puede ser develado por cláusulas de contrato es por ello que, en adelante para referirnos al sistema de estudio se lo hará con el nombre de Sector A-1.

En el sector A-1 al igual que en otros sistemas de distribución existen fugas de agua potable, que ocasionan pérdidas económicas a la entidad encargada de la distribución y mantenimiento, la mayoría de las veces se espera a que se manifiesten de una manera visible y de gran magnitud para repararlas, o también cuando los consumidores o usuarios comunican de la existencia de alguna eventualidad.

El principal problema radica en que no se desarrolla un programa eficiente de control y reducción de pérdidas, es decir, desconocen las metodologías existentes para detectar y localizar fugas de agua.

Adicionalmente a esto no tienen una idea clara de cómo determinar los índices técnicos que más se utilizan en la gestión activa de fugas ya que a través de ellos se obtiene valores de referencia y se puede comparar con otros sistemas de distribución para finalmente evaluar al mismo y determinar cuál es el estado en el que se encuentra la red y por ende la eficiencia del sistema.

Además de ello, se tiene que considerar que luego de detectar y localizar la fuga de agua existente en la red de distribución, el siguiente paso será el de repararla, para lo cual si el problema es en tuberías secundarias (acometidas) la reparación es menor, la contrariedad sucede cuando se presenta en tuberías principales, ya que para realizarlo se tiene que excavar a la profundidad a la que se encuentra y a lo largo de toda la longitud (apertura de zanja), esto genera una serie de contrariedades como el cierre de calles (rotura del pavimento), molestias a los peatones (ruido), además se afecta la salud de la ciudadanía (polvo).

Es por ello que en la actualidad existen metodologías las cuales no se necesita romper a lo largo de toda la longitud de la tubería para repararla o renovarla.



Se habla de renovar cuando el daño es considerable (roturas o reventamiento) o de rehabilitar cuando el daño es menor (rajaduras o fisuras) y solo se recupera las propiedades hidráulicas de la tubería. La decisión de renovar o rehabilitar con o sin apertura de zanja se basa principalmente en el aspecto económico.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo del presente proyecto servirá como información para realizar la detección de fugas en sistemas de distribución de agua potable mediante la aplicación del análisis de flujos mínimos nocturnos, ya que por ser un método estadístico se puede determinar de una manera rápida y eficiente la existencia de fugas de agua, su aplicación es muy práctica y de fácil comprensión, de la misma forma que la interpretación de los resultados que se obtienen.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. *Objetivo general*

Aplicar la metodología de análisis de flujos mínimos nocturnos para la detección de fugas, proponer alguna de las nuevas tecnologías orientadas a la renovación y rehabilitación de tuberías de sistemas de distribución sin apertura de zanja.

1.4.2. *Objetivos específicos*

Aplicar el análisis de flujos mínimos nocturnos en la detección de fugas de agua en redes de abastecimiento público.

Analizar, comparar y recomendar el uso de los índices técnicos más utilizados en la gestión activa de fugas.

1.5. RESULTADOS ESPERADOS

Al final del presente proyecto, se debe estar en la capacidad de poder desarrollar el AFMN mediante el uso de la hoja electrónica en Excel la cual contiene en detalle el procedimiento de esta metodología.

Principalmente se basa en un análisis estadístico de caudales y presiones que al ser examinados se determina el caudal mínimo nocturno, que es aquel que se presenta cuando los consumos dentro del sector disminuyen por lo general esto sucede en horas de la madrugada.



Variaciones de este caudal indican la presencia de fugas de agua en la red de distribución, debido a que es solamente un análisis estadístico de caudales y presiones los resultados que se obtienen solo indican la existencia de fugas en el sistema de distribución y se debe complementar con acciones de detección y localización.

A través de la información que se proporciona en el presente proyecto se debe estar apto para analizar y comparar los diferentes índices técnicos existentes dentro de la gestión activa de fugas, para luego establecer la eficiencia de la red de distribución y determinar qué acciones se deben tomar para mejorar la gestión del sistema.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE



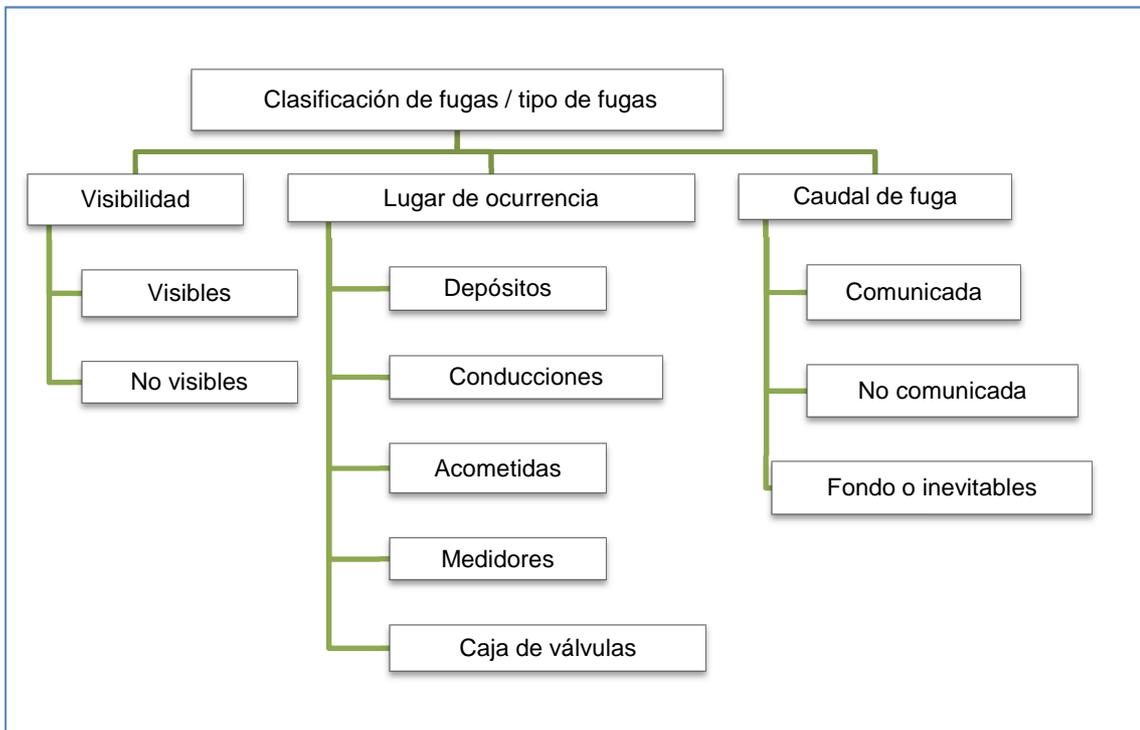
2.1. FUNDAMENTOS SOBRE FUGAS

2.1.1. Definición de fuga

“Es un escape físico de agua en cualquier punto del sistema de agua potable o alcantarillado; esta puede ocurrir en conducciones, tanques de almacenamiento, redes de distribución, conexiones domiciliarias y dentro de las casas de los usuarios”. [2]

2.1.2. Clasificación y tipo de fuga

Se consideran varios aspectos al momento de clasificar las fugas, ya sea por su magnitud, el lugar donde ocurre, o por su visibilidad en el siguiente esquema se puede observar la clasificación:



Esquema 2.1. Clasificación y tipo de fugas

Fuente: Farrer Crespo Herbert. (1979) “Control de fugas en redes de distribución de agua”

Al hablar de la visibilidad se refiere a aquéllos manifiestos que se pueden presentar o no en la red de distribución, la característica de las fugas visibles es que no siempre se presentan en el mismo lugar donde se origina la fuga ya que éstas pueden emerger hacia la superficie a una distancia considerable, se conoce como fugas no-visibles a aquellas que se infiltran en el suelo o drenan hacia tuberías de alcantarillado, dependerá de la permeabilidad del suelo para que sean visibles o no-visibles.



Teniendo en cuenta el lugar de ocurrencia de una fuga de agua éstas se pueden manifestar:

En depósitos: son de gran magnitud, de duración corta, ocasionales, ocurren principalmente por agrietamiento en la estructura o por rebosamiento de los niveles de agua. ^[9]

En conducciones o tuberías principales: su ocurrencia se debe a factores como el tipo de material, edad de las tuberías, corrosión, exceso de carga, golpe de ariete (cambios bruscos en la operación del sistema) o al conjunto de todas estas, su magnitud se incrementa a lo largo del tiempo.

En acometidas: principalmente se presentan cuando los materiales son de mala calidad o la instalación no se realizó correctamente, estas se presentan como rajaduras, piezas flojas, o perforaciones, su caudal oscila entre 0.02 y 0.25 l/s. ^[2]

En medidor: generalmente este tipo de fuga se presenta en forma de goteo, su principal causa se le atribuye a piezas flojas y falta de hermeticidad en el micromedidor. ^[2]

En válvulas: su ocurrencia se atribuye a roturas de empaques o volantes de las mismas. ^[2]

Lambert, Mayers y Trow (1998), clasifican a las fugas en función del caudal que tienen, se dan tres tipos:

Las fugas comunicadas: son de elevado caudal con períodos de duración cortos, son visibles ya que emergen a la superficie y son fáciles de detectar.

Las fugas no-comunicadas: no son visibles, el caudal es moderado y su duración depende principalmente del método de control activo de fugas que se aplica.

Las fugas de fondo: se caracterizan por su bajo caudal, se necesita la aplicación de métodos acústicos para su detección y localización, ocurren en juntas, accesorios y agujeros pequeños que se producen por la corrosión. ^[4]

[2] Bourguet Ortiz Víctor. (2004). A.C. AF1-3 "Estrategia y Organización para la Detección de Fugas". Centro mexicano de capacitación en agua y saneamiento, México.

[9] Farrer Crespo Herbert. (1979). "Control de fugas en redes de distribución de agua". Proyecto de Desarrollo Tecnológico de Instituciones de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado. (DTIAPA).

[4] Tomado de Cabrera Marcet Enrique. (2006). "Alternativas y Estrategias disponibles en la Reducción de Pérdidas"



En el siguiente cuadro se muestran algunos valores típicos aproximados de caudales de fuga:

Cuadro 2.1. Caudales aproximados de algunos tipos de fugas

Tipo de Fuga	Q (l/h)	Q (l/s)
Fuga de fondo (inevitable)	10 - 300	0.003 – 0.08
Fuga no comunicada (no fácilmente detectable)	<500	<0.14
Fuga no comunicada (fácilmente detectable)	>500	>0.14
Fuga comunicada	500 – 50000	0.14 - 14

Fuente: Cabrera Marcet Enrique. (2006) “Alternativas y estrategias disponibles en la Reducción de Pérdidas”

Hirner W. H. (1998) propone una clasificación adicional que no sólo depende de la relación entre el número de fugas, caudales medios y la duración media de cada tipo de fuga, sino que considera que tipo de fugas se pueden reparar para ser económicamente rentables, por lo que plantea tres grandes tipos de fugas: ^[4]

Pérdidas inevitables: no resulta económico repararlas, ya que son de bajo caudal y no se las puede detectar. Se las considera a las fugas de fondo como pérdidas inevitables.

Pérdidas tolerables: este tipo de fuga es detectable, y se encuentra en un rango entre las inevitables y las recuperables.

Pérdidas recuperables: se las considera cómo grandes pérdidas, y es económico repararlas.

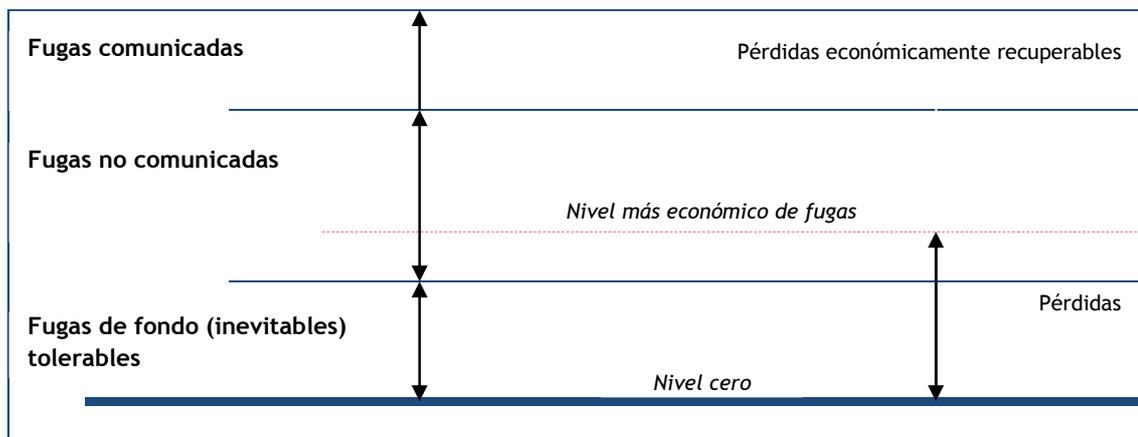


Gráfico 2.1. Relación entre tipo de fugas y el nivel económico de pérdidas

Fuente: Cabrera Marcet Enrique. (2006) “Alternativas y Estrategias disponibles en la Reducción de Pérdidas”



2.1.3. Causas que producen las fugas

Las principales causas que ocasionan el origen de las fugas en la red de distribución son:

Presión alta: se tiene claro que un aumento de la presión ocasiona un caudal de fuga mayor, esto cuando en la tubería existen orificios o rajaduras, como resultado de ello se presenta reventamiento de las tuberías o daños en los accesorios de la red, lo cual a la final significa cuantiosas pérdidas.

La presión en un sistema de distribución tiene considera tres efectos:

- ✓ Una fuga existente aumentará su magnitud con la presión.
- ✓ La incidencia de fugas aumenta con la presión.
- ✓ El consumo doméstico aumenta con la presión, es decir cuando el uso del agua depende de una válvula que es maniobrada por el usuario (abrir un grifo), este aspecto no se lo considera como desperdicio pero si es de gran interés reducirlo.

[15]

El efecto de la presión es único en un sector y depende del régimen y clase de fugas existentes en el período de tiempo que se considera, las presiones altas contribuyen a la ocurrencia de las fugas. [15]

Corrosión: se relaciona directamente con la agresividad del agua que circula por los conductos, mediante el índice de Langelier se determina si las aguas son corrosivas o no. Se debe seleccionar tuberías adecuadas para minimizar este efecto.

Efectos del tráfico: las tuberías que se encuentran bajo superficies que no están diseñadas para soportar carga vehicular, es decir, que la profundidad a la que se encuentra la tubería no es la adecuada y el suelo que esta sobre ella no está bien compactado, están más expuestas a fracturarse en especial cuando sus uniones son rígidas. [15]

Movimiento del suelo: es una de las causas más frecuentes, especialmente en suelos arcillosos los cuales son inestables, los temblores dependiendo de su intensidad afectan las tuberías produciendo fugas. [15]

[15] Resumido de Hueb José Augusto. (1986). "Proyecto de control de fugas". Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. (CEPIS).



Mala calidad de accesorios y materiales: depende de la mala calidad de los materiales y accesorios el que disminuya su vida útil, además de tener reparaciones defectuosas y frecuentes.

La mayor incidencia de las fallas en los sistemas de distribución se dan en las acometidas, como solución a esto se debería dar importancia al control de calidad de estos. ^[15]

Mala calidad de mano de obra: este factor implica trabajos defectuosos y de mayor duración en la ejecución, básicamente esto se da por dos razones: conocimientos deficientes del operario y el uso de herramientas no adecuadas.

Es por ello que como medida preventiva se debe capacitar al personal, asimismo se deberá facilitar el equipo y la herramienta necesaria y adecuada. ^[15]

Golpe de ariete: es un fenómeno transitorio, que se produce en las tuberías al cerrar o abrir una válvula, al poner en marcha o parar una máquina hidráulica o al disminuir bruscamente el caudal que circula, estos cambios repentinos forman ondas de presión las cuales transitan en los ductos, por ejemplo, rebota en el embalse la onda y regresa a la válvula, luego regresa nuevamente al embalse y así sucesivamente.

Como resultado de esto se originan sobrepresiones y depresiones haciendo que la tubería se contraiga o se dilate, esto produce roturas, reventamiento, o fisura; es por ello que se debe capacitar al personal para la apertura y el cierre de válvulas con un tiempo suficiente para impedir la formación de este fenómeno. ^[19]

Edad de las tuberías: con el paso del tiempo se incrementa la corrosión interna y externa lo cual ocasiona el deterioro de la tubería y como resultado mayor ocurrencia de fugas, es decir mientras la tubería es más antigua su vida de servicio disminuye quedando obsoleta, adicionalmente a lo expuesto también se le atribuye a otros aspectos que influyen al acortamiento de su vida útil tales como: el tipo de material y las condiciones del terreno. ^[15]

2.2. GESTIÓN DE FUGAS

Se entiende por gestión al conjunto armónico de actividades que se realizan en una empresa de abastecimiento de agua, con el objetivo de alcanzar y mantener un nivel en el que los componentes de pérdidas debidas a fugas, rebosamientos, usos clandestinos de agua, desperdicios, consumos operacionales, consumos especiales,



errores de medición y errores de estimación, sean lo mínimo posible en condiciones de viabilidad técnica, económica, financiera, institucional, política y social. [3]

Las fugas en un sistema de distribución de agua potable representan la diferencia que existe entre la medición de la cantidad de agua suministrada (volumen producido) y el volumen de agua tomada en cuenta para la facturación y cobro del servicio (volumen facturado), la International Water Association (IWA) define a estos términos como “pérdidas reales” y “pérdidas aparentes” esto con el objetivo de estandarizar la terminología que se utiliza para determinar el balance hídrico el cual está basado en la medición o estimación del agua producida, consumida o pérdida. [10]

Generalmente en sistemas de distribución no medidos el principal componente de las pérdidas de agua se atribuyen a fugas o pérdidas reales, por lo contrario en sistemas que constan con medición, este es un factor significativo ya que representa cuantiosas pérdidas económicas para la empresa operadora.

Es por ello que el Water Loss Group de la International Water Association (IWA) propone cuatro actividades para disminuir el nivel de pérdidas de agua en la red, en la siguiente figura se detallan éstas.

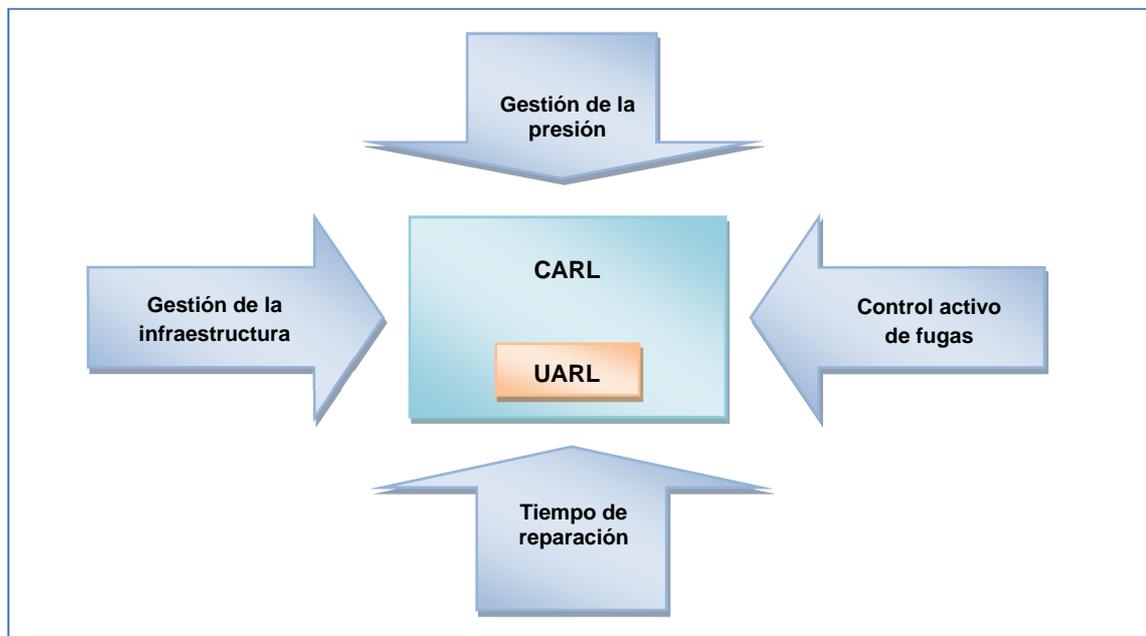


Figura 2.1. Actividades en la gestión de fugas

Fuente: Farley M. Y Trow S. (2003) “Losses in water distribution networks”

[3] Tomado de Benavides Muñoz Holger. “Gestión y Políticas para fugas en la Red”. Apuntes de Clase. UTP.

[10] Tomado de Farley M. Y Trow S. (2003). “Losses in water distribution networks”. Publicación de la IWA. 273 páginas.



La figura pequeña del centro representa las pérdidas inevitables reales anuales (unavoidable annual real losses - UARL) las cuales caracterizan al sistema de agua potable por su bajo caudal, la figura grande representa el volumen anual de pérdidas reales de una red (current annual real losses - CARL). ^[10]

Estas actividades están diseñadas para ser aplicadas en redes sectorizadas, las cuales permitan medir los caudales suministrados durante las 24 horas.

2.2.1. Control activo de fugas

El control activo de fugas empieza cuando el personal encargado de la empresa operadora realiza trabajos de detección y localización de fugas de agua las cuales no son reportadas por los consumidores o usuarios, por lo que es obligatorio realizar la medición y sectorización de la red, esto con el objetivo de controlar, registrar y finalmente conocer que acciones se deben tomar para lograr un bajo nivel de fugas, y mantenerlo a lo largo del tiempo.

Los métodos que pueden utilizarse para realizar un control activo de fugas pueden ser indirectos o volumétricos, de detección y localización directa.

El método indirecto o volumétrico se basa en mediciones de caudal de una manera continua con el propósito de identificar que caudal se asigna a las fugas, esta medición se la realiza mediante el uso de caudalímetros o medidores de caudal, el objetivo de esta medición es el de determinar las variables que intervienen en el estudio de los parámetros de comparación y desempeño de pérdidas físicas.

Lo que se refiere a la detección y localización directa, involucra a los diferentes equipos existentes que por medio de la captación del ruido que genera la fuga o alteraciones que sufren las propiedades del terreno, se puede detectar la presencia de estas. Los equipos de detección tienen la misión de limitar la zona de búsqueda; mientras que los equipos de localización permiten identificar el lugar exacto de la fuga.

[15]

2.2.1.1. Sectorización

La sectorización es una estrategia de reducción y control de fugas de agua en un sistema de distribución, los distritos o sectores de medición se pueden independizar desde el punto de vista hidráulico, por medio de maniobras en válvulas o aislando tuberías con tapones, esto con la finalidad de realizar estudios de distribución de



consumos y de reducción de pérdidas.

El aislamiento en la red se debe hacer de tal forma que el sector sea suministrado tan solo por una entrada, pero por lo general es habitual tener sectores con más de una entrada y casualmente con más de una salida, las entradas deben tener como mínimo un contador de caudal (medición y registro de consumos), adicionalmente a ellos medidores de presión, cloro o cualquier otra característica de la red que se desee estudiar y controlar.

Al hablar de sector se refiere a la delimitación de la red dentro del cual se incluyen distritos hidrométricos y/o subsectores en la figura 2.2., se muestra en detalle estos, se tiene que tener en cuenta de que los distritos hidrométricos son aislados hidráulicamente mediante el cierre de válvulas, y los subsectores son redes malladas independientes del resto de la red. [27]

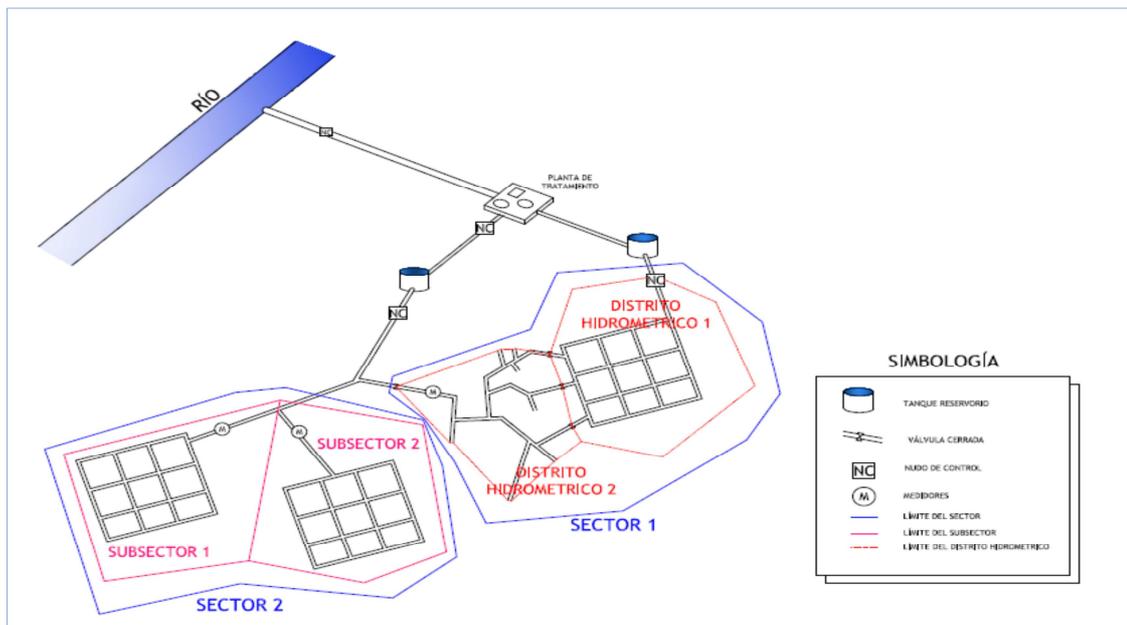


Figura 2.2. Sectorización de red de distribución

Fuente: El Autor

2.2.1.1.1. **Objetivos de la sectorización**

La principal ventaja de sectorizar es el de obtener información de la red tanto de su funcionamiento como de su estado, además mediante esto se puede caracterizar la curva de caudal de cada sector dándole especial importancia al caudal mínimo nocturno, ya que cualquier variación de este puede indicar presencia de fugas o consumos exagerados, pero el sectorizar no solo se enfoca a esto sino que tiene como objetivos: [27]



- ✓ Detección de fugas de bajo caudal, mediante el análisis del caudal mínimo nocturno se puede detectar la existencia de fugas, que por simple inspección no se logra, para luego mediante la parcelación del sector se aislara de tal forma que se pueda utilizar métodos de detección acústicos tales como geófonos o correladores.
- ✓ Detección de conexiones clandestinas.
- ✓ Caracterización de consumos, en función de las curvas de caudal se puede identificar eventualidades como días festivos, días laborales, diferenciar zonas residenciales, industriales, así como también identificar a los grandes consumidores.
- ✓ Regulación de presión en determinados sectores.
- ✓ Cierres programados, teniendo pocas entradas se pueden aislar fácilmente sin afectar al resto de la red. ^[27]

2.2.1.1.2. Como sectorizar la red de distribución

El sectorizar una red de distribución de agua potable consta de dos actividades bien definidas, la primera se enfoca en el diseño e implantación, es decir, recopilar y analizar información, planear acciones las cuales permitan definir y proponer el trazo de la sectorización en la red, para luego mediante el cierre de válvulas de frontera configurar el sector, y especificar la cantidad y el lugar de instalación de puntos de control (estaciones de medición), como segunda actividad se tiene la aplicación en campo, o sea la materialización de la sectorización propuesta.

Diseño e implementación: el diseño se lo realiza en base a la información técnica que se obtiene de planos de la red, se debe definir las características básicas tales como el número de usuarios, configuración y longitud de red, número de acometidas, localización de zonas industriales, residenciales y comerciales.

En el diseño de la sectorización se considera los siguientes aspectos: ^[16]

[16] Resumido de Jiménez Aldana Mauricio. (2003). "La sectorización hidráulica como estrategia de control de pérdidas en sistemas de acueducto"

[27] Tomado de Antonio Peralta Triviño. Publicación "Reducción de pérdidas en redes. Sectorización de la red de distribución en Barcelona". VII CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE.



- a) Conocer el sistema de distribución donde se aplicará la sectorización, identificando fuentes de suministro, zonas de presión, zonas aferentes a plantas de tratamiento o tanques de almacenamiento, los cuales conforman los sectores naturales del sistema, adicionalmente se establece los sectores hidráulicos dentro de una sola zona de presión.

Evitando problemas de insuficiencia en la red, y garantizando buenas condiciones en horas de mayor consumo, para luego analizar la configuración del sistema, y finalmente identificar válvulas de control de la red matriz

- b) Definir el número de sectores y cantidad de usuarios dentro del sector en base a las características de la red, procurando relacionar la macromedición con la micromedición a nivel de sectores, analizando variables de costos de instrumentación de la red, rendimientos y la regularidad con la que se leen los micromedidores (contadores). Lambert (1998) señala que en el caso de utilizar la medición de caudales nocturnos para determinar la existencia de fugas en la red se debe considerar de 500 a 1000 acometidas. ^[27]
- c) Definir la longitud de red que comprende cada sector en base a costos de implantación y mantenimiento del mismo, se debe tener en cuenta que el tamaño de la red del sector no tiene que ser muy grande ya que se tiene que considerar posibles cambios en las características de consumo y condiciones de la red a lo largo del tiempo. ^[16]
- d) Delimitar la red evitando, dividir manzanas para facilitar la identificación de los usuarios, fraccionar la menor cantidad de tuberías de la red, considerando zonas de estratos socio-económicos y las características físicas existentes que impliquen el empleo del menor número de válvulas entre sectores. ^[16]
- e) Limitar el número de tuberías que abastecen a cada sector, esto con el propósito de tener en lo posible el menor número de entradas y salidas, además de ello considerar que el diámetro de la tubería de abastecimiento sea suficiente para entregar el caudal requerido para cada sector, y se mantenga las condiciones de caudal y presión en el momento que se suspende el servicio. ^[16]

Materialización o ejecución de la sectorización: mediante la ejecución de acciones operativas orientadas a la verificación en campo de las condiciones necesarias para definir la sectorización propuesta se consigue la materialización de la misma, para lo



cual las actividades a realizar son:

- a) Verificar la topología de la red con el propósito de identificar la existencia de accesorios, uniones entre tuberías, diámetro y material de los conductos, lo cual sirve de referencia para localizar en detalle toda la red de distribución y determinar si tiene relación con los límites propuestos en el diseño.
- b) Verificar la existencia de válvulas in situ, localizando e inspeccionando su operatividad y condiciones.
- c) Ejecución de obras complementarias, ya sea la instalación o cambio de válvulas, colocación de tapones o empates sobre tuberías para conseguir las condiciones definidas en el diseño, o la planificación de cambio de tuberías antiguas.

2.2.1.2. Nodos de control

Son puntos que se ubican en la red de distribución, los mismos que constan de medidores de caudal y presión, es importante saber la cantidad de caudal que ingresa al sistema y la cantidad de agua que se entrega a los consumidores o usuarios; al igual que se debe conocer la presión con la cual el caudal circula a través de los conductos.

2.2.1.2.1. Equipo de medición de caudal

Se utiliza en la macromedición, es decir, se registra el caudal que ingresa al sistema de distribución ya sea a la salida del tanque de distribución, o en la impulsión de una bomba, mediante estos registros de caudal se puede interpretar las variaciones que se presentan en el sistema durante un período de tiempo e identificar eventualidades como consumos elevados, usos nocturnos, o cortes del servicio.

El equipo con el cual se puede registrar caudales es el Caudalímetro ultrasónico DCT7088 (Imagen 2.1.).



Imagen 2.1. Caudalímetro ultrasónico DCT 7088
Fuente: El Autor

2.2.1.2.1.1. Principio de funcionamiento del caudalímetro ultrasónico

“Las ondas sonoras viajan en los fluidos a una velocidad específica según el tipo de fluido, si el fluido está en movimiento, la onda de sonido viaja a una velocidad igual a la suma de la velocidad del sonido en el fluido y la velocidad del propio fluido en relación con el transductor.

Una onda de sonido viaja en la misma dirección que el flujo de líquidos (aguas abajo) llegará antes de lo que una onda de sonido viaja en contra de la corriente (aguas arriba)”. [28]

El caudalímetro ultrasónico funciona midiendo el tiempo que demora en viajar la onda sonora desde el transductor que se instala aguas arriba hacia el segundo transductor puesto aguas abajo (figura 2.3.), en función del tiempo que transcurre el equipo calcula la velocidad media del fluido.

[28] Tomado de User Manual - PORTABLE DIGITAL CORRELATION TRANSIT TIME ULTRASONIC FLOWMETER – Thermo Polysonics

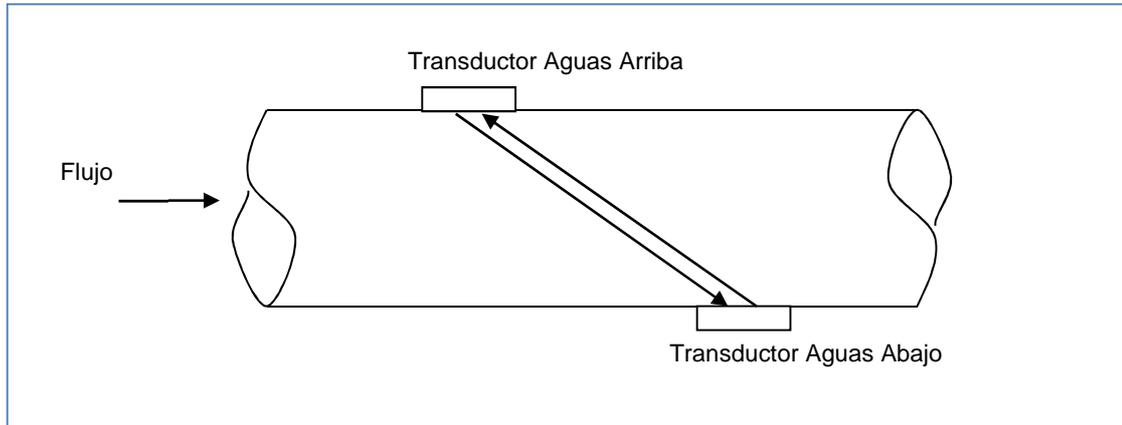


Figura 2.3. Sistema típico de tiempo de tránsito

Fuente: User Manual - Portable digital correlation transit time ultrasonic flowmeter – Thermo Polysonics

Adicionalmente a ello se debe considerar la velocidad global del fluido la cual se descompone a su vez en varias velocidades locales e individuales; estas varían en función de la distancia de la pared de la tubería, en el centro de la tubería las velocidades son mayores con respecto a la velocidad de las paredes. ^[28]

2.2.1.2.1.2. Configuración del caudalímetro ultrasónico

Al configurar correctamente el caudalímetro (ingresar parámetros de la tubería, tipo de fluido, la unidad de medida en que el equipo registra los datos, entre otros) los efectos del perfil de flujo se toman en cuenta al momento de calcular la velocidad media del fluido, el equipo para obtener el flujo volumétrico (caudal) multiplica la velocidad del fluido por el área transversal de la tubería.

La configuración del caudalímetro ultrasónico consiste en:

- ✓ Determinar el sitio adecuado para la instalación de los transductores, considerando que los tramos de tubería donde se vaya a instalarlos tengan un tramo recto equivalente de por lo menos 10 diámetros aguas arriba y 5 diámetros aguas abajo de cualquier codo, tee, válvula, orificios, secciones reducidas, u otras perturbaciones de flujo. ^[28]
- ✓ Acceder al submenú **tubería**, en el cual se asigna algunos parámetros de la tubería como el diámetro interno y externo, y material de la tubería.
- ✓ Acceder al menú **tipo de fluido**, y escoger el tipo de fluido que circula por la tubería.
- ✓ Acceder al menú **tipo de transductor**, en el cual se selecciona el tipo de



transductor por lo general se selecciona por defecto “estándar”.

- ✓ Acceder al menú **montaje de transductores**, en donde se selecciona el método de montaje de los transductores (V, Z, W, WV, WW).
- ✓ Luego de seleccionar el método de montaje seleccionar **ver espaciamiento de transductores** y el equipo automáticamente presentara el espaciamiento entre transductores que debe existir.
- ✓ Acceder al menú **unidades de flujo** y escoger en que unidades volumétricas el equipo registra los datos (litros o metros cúbicos), luego bajar en el menú y seleccionar la unidad de tiempo (segundos, minutos, horas).
- ✓ Finalmente instalar los transductores en el sitio que se escoge, colocándolos de acuerdo al método de montaje seleccionado y el espaciamiento entre ellos que el equipo calcula.

2.2.1.2.1.3. Instalación del caudalímetro ultrasónico

Para la instalación del caudalímetro se debe considerar lo siguiente:

- ✓ El sitio de medición debe ser de fácil acceso, ya sea para la instalación o inspección.
- ✓ El lugar donde se va a instalar los transductores debe estar lo más alejado posible de válvulas y accesorios, para evitar turbulencias las cuales interfieren con las señales que envían estos hacia el equipo. Como se indicó anteriormente el lugar donde van a instalarse tiene que tener un tramo recto equivalente de por lo menos 10 diámetros de tubería aguas arriba y 5 diámetros de tubería aguas abajo.
- ✓ Medir con precisión la distancia entre los sensores para su instalación.
- ✓ El punto seleccionado para la instalación, debe trabajar a tubo lleno.
- ✓ En lugares donde no se brinde la seguridad para el equipo, se realiza una calicata de dimensiones 1.10 m x 1.10 m, y de profundidad necesaria hasta donde se encuentre la tubería dejando libre unos 20.00 cm en la parte inferior de la misma, esto para dar facilidad en el momento de la instalación de los sensores del equipo (transductores), no se tendrá profundidades mayores a 2.50 m. ^[28]



2.2.1.2.1.4. Método de instalación del caudalímetro

Existen varios métodos para el montaje del caudalímetro ya sea V, W, Z, WV o WW, la diferencia entre ellos es el tipo de montaje de los transductores y la exactitud de la medida.

En este caso se ha optó por utilizar el denominado método Z el cual utiliza una transmisión directa, o sea que la trayectoria de medida es más larga y por ende la lectura es más exacta, es muy fiable en tuberías de diámetros mayores.

La principal ventaja que tiene este método es que tiene menos interferencias, ya que la señal es enviada de transductor a transductor atravesando el fluido una sola vez dando como resultado una medición más precisa. ^[28]

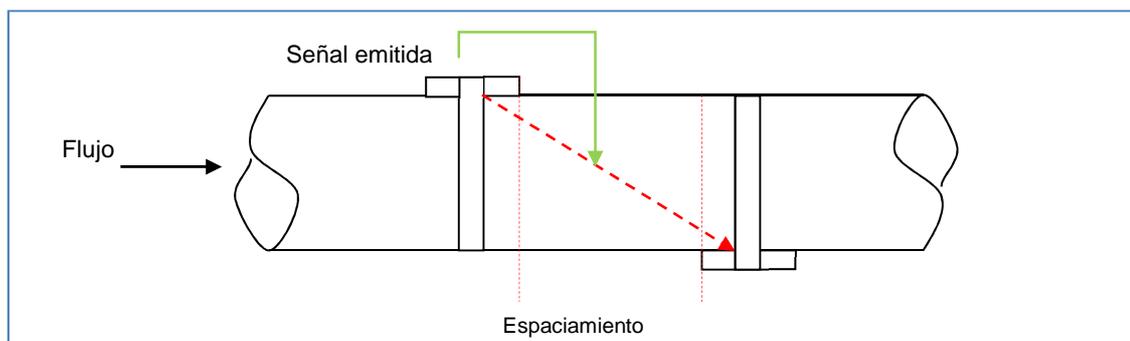


Figura 2.4. Disposición de transductores en el “método z”

Fuente: User Manual - Portable digital correlation transit time ultrasonic flowmeter – Thermo Polysonics

Para instalar el caudalímetro se debe proceder como sigue:

1. Limpiar la superficie donde se van a colocar los transductores, removiendo polvo, pintura floja, etc.
2. Aplicar el gel, sobre las caras de los transductores y en la tubería.
3. Como para este método no se puede utilizar la riel calibrada, se debe establecer una referencia en posiciones equivalentes a las manecillas del reloj en las 3 y en las 9 (figura 2.5.), para lo cual se envuelve en un papel medido (papel milimetrado) alrededor del tubo, marcando el punto de referencia en ambos lados del tubo.
4. Determinar la longitud de separación (S) de los transductores, esta longitud nos la da el caudalímetro, ingresando datos como: diámetro de tubería, tipo de fluido, espesor del material y el método que se va a utilizar.

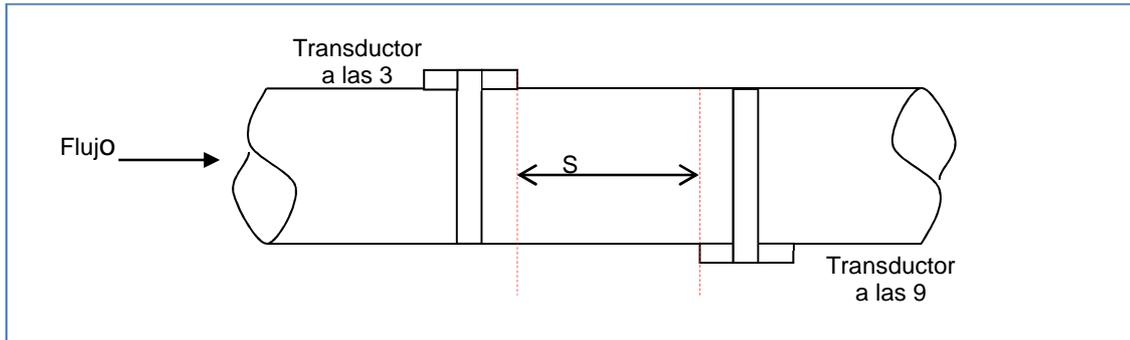


Figura 2.5. Colocación de transductores en tubería

Fuente: User Manual - Portable digital correlation transit time ultrasonic flowmeter – Thermo Polysonics

5. Con la medida de separación de los transductores dado por el equipo y las marcas donde van a ir se los coloca y se los asegura ya sea con las correas de acero u otra forma como se le facilite a la persona que está instalando.
6. Una vez que se instalan los transductores en la tubería, en el equipo fijamos la frecuencia de registro de datos ya sea cada 15 min, 30 min, o 60 min.

2.2.1.2.2. Equipo de registro de datos de presión

El data logger (imagen 2.2.) es un equipo que permite medir y registrar datos de presión que se presenten en la red de distribución durante períodos de estudio o constantemente, pueden ser colocados en redes directoras (macromedición) o en las acometidas domiciliarias (micromedición).



Imagen 2.2. Data logger

Fuente: El Autor



2.2.1.2.2.1. Instalación de data logger

Cuando se dispone de varios data loggers se recomienda colocar uno en la parte alta de la red, dos en la parte media y uno en la parte baja, de la red de distribución. Se debe tener siempre presente que mientras se disponga de más loggers mayor registro de datos se obtendrá lo cual es lo aconsejable para saber con exactitud cómo se encuentran las presiones de servicio y cuáles son los puntos desfavorables de la red.

[27]

Al momento de la instalación de estos dispositivos se debe considerar que:

1. La cámara donde se va instalar sea segura, y presente las condiciones óptimas para conservar el equipo.
2. La tubería debe tener una salida de presión la cual es un acople tipo hembra, consta de un pequeño tramo de tubo con un llave de bola con esto se consigue tener un mecanismo tipo fuga el cual solo cuando se lo necesite se lo destapa.
3. Realizar maniobras de válvulas, ya sea abriendo o cerrando según se disponga para la instalación.
4. Colocar el logger en un lugar alto y asegurarlo dentro de la cámara, con el propósito de evitar que sufra algún daño, y se pierda la información.
5. Chequear el equipo y confirmar que se encuentre registrando datos.

Una vez considerado los aspectos anteriores se procede a la instalación del equipo en el sitio escogido, de la siguiente manera:

1. Ubicarse en el sitio donde se va a instalar los dispositivos, chequear si la cámara no se encuentra inundada o si tiene algo extraño.
2. Cerrar la o las válvulas que sean necesarias y permita instalar el equipo.
3. Retirar el tapón del acople hembra y colocar el acople macho del data logger.
4. Purgar si es necesario antes de instalar el equipo.
5. Instalar el logger con cuidado (Imagen 2.3.).



Imagen 2.3. Instalación de data logger

Fuente: El Autor

6. Asegurar y colocar el logger en un lugar alto para evitar inconvenientes.
7. Chequear que el equipo registre correctamente los datos.
8. Asegurar la cámara.

Finalmente a continuación en la imagen 2.4. se muestra como debería quedar instalado el logger en la cámara.

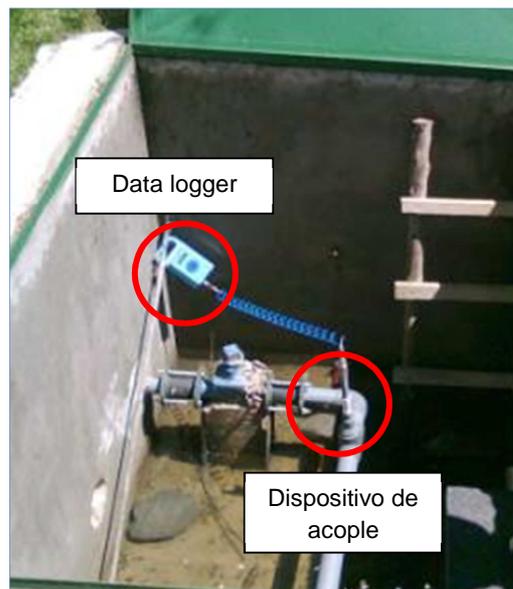


Imagen 2.4. Esquema general de instalación de data logger

Fuente: El Autor



2.2.1.3. **Indicadores y benchmarking**

Para poder establecer el nivel de pérdidas que se presenta en la red de distribución de agua es necesario determinar los diferentes indicadores que se utilizan en la gestión activa de fugas (IFE, IANC, índice de consumos, entre otros), mediante los cuales se puede conocer el estado de la red y permiten comparar con otros sistemas de distribución (benchmarking).

Lambert en 1997 presentó un método el cual permite modelar y estimar volúmenes correspondientes a los diferentes componentes de pérdidas técnicas por medio de los conceptos denominados BABE (Burst and Background Estimates) las cuales en su análisis consideran las fugas de fondo, fugas comunicadas y fugas no – comunicadas.

En el manual “Managing Leakage” el término “Burst” se refiere a roturas los cuales tienen caudales mayores a 500 l/h a una presión de 50 m c.a. y el término “Background” a fugas latentes, las cuales tienen un caudal menor a 500 l/h a una presión de 50 m c.a. ^[10]

Los conceptos BABE consideran que las roturas se derivan de las fugas comunicadas y no – comunicadas, las cuales son generadas por fugas indetectables individuales que pueden ser consideradas como grupos de sucesos con frecuencias, caudales y duraciones típicas diferentes, las cuales son obtenidas a partir del análisis del volumen anual de pérdidas técnicas o CARL (Current Annual Real Losses).

El cálculo de este componente se lo realiza mediante el análisis de los tres tipos de fugas en cada infraestructura del sistema, ya sea en tuberías (principales y secundarias), acometidas, y depósitos de almacenamiento, considerando algunos parámetros que ejercen influencia en los volúmenes de las pérdidas técnicas derivadas de las fugas detectables.

Para determinar el CARL, cada uno de los componentes de las pérdidas técnicas se encuentra modelado a partir de información la cual permite cuantificar las pérdidas técnicas anuales dicha información se encuentra compuesta principalmente por:

- ✓ Número de fugas comunicadas y no – comunicadas de diferentes tamaños y material de tuberías.
- ✓ Caudales típicos para las fugas detectables, basados en estudios internacionales.



- ✓ Datos estadísticos sobre la infraestructura, frecuencia de fugas comunicadas y no – comunicadas, presión de servicio de la red del sistema.
- ✓ Duración promedio de las fugas, modeladas de acuerdo a los tiempos promedios de reportes o detección, localización y reparación.
- ✓ Relaciones presión/fuga derivadas de estudios internacionales y verificados localmente.
- ✓ Caudales típicos de fugas de fondo y factores del estado de la infraestructura, que se basan en el análisis de datos de caudales nocturnos.

En el siguiente cuadro se presenta algunos parámetros los cuales se utilizan en el cálculo del CARL.

Cuadro 2.2. Parámetros utilizados en el análisis del CARL

Tipo de Infraestructura	Fugas de fondo (no detectables)	Roturas y reboses reportados	Roturas y reboses no reportados
Acueductos	Longitud Presión Menor índice de pérdida/Km	Número/año Presión Índice promedio de caudal Duración promedio	Número/año Presión Índice promedio de caudal Duración promedio
Tanques de almacenamiento	Fugas a través de la estructura, porcentaje de capacidad/día	Nº de reboses no reportados/año Índice promedio de caudal Duración promedio	Nº de reboses no reportados/año Índice promedio de caudal Duración promedio
Acometidas	Nº de acometidas Presión Menor índice de pérdida/acometida	Nº /año Presión Índice promedio de caudal	Nº /año Presión Índice promedio de caudal
Instalaciones internas (después del medidor)	Longitud Presión Menor índice de pérdida/Km	Nº /año Presión Índice promedio de caudal	Nº /año Presión Índice promedio de caudal

Fuente: Farley M. y Trow S. Losses in Water Distribution Network

Según Farley M. y Trow S. las fugas de fondo conforman el nivel medio de fugas inevitables o UARL (Unavoidable Average Real Losses), en función de condiciones particulares ya sea longitud de la red, longitud promedio de acometida, número de acometidas y presiones de servicio se puede determinar las pérdidas técnicas en el sistema.

La ecuación básica para determinar el UARL expresada en l/día es:*

* Los valores de 18, 0.80 y 25 fueron obtenidos a partir de análisis estadísticos procedentes de más de 27 abastecimientos de agua de 20 países.



$$U_{ARL} = (18 \times L_m + 0.80 \times N_a + 25 \times L_p) \times P \quad [\text{Ec. 1}]$$

Dónde:

L_m : Longitud total de tubería de distribución de la red. (km)

N_a : Número total de acometidas existentes.

L_p : Longitud promedio de tubería hasta la acometida. (km)

P : Presión promedio del sistema. (m c.a.)

Si se desea expresar en unidades de l/acometida/día, basta con dividir para el número de acometidas existentes:

$$U_{ARL} = \frac{(18 \times L_m + 0.80 \times N_a + 25 \times L_p) \times P}{N_a} \quad [\text{Ec. 2}]$$

2.2.1.3.1. Indicadores de desempeño

Para la representación del nivel de pérdidas físicas existentes en una red de distribución de agua potable, la Internacional Water Supply Association (IWA) recomienda la utilización de indicadores de desempeño (PIs o Performance Indicators) del sistema de distribución, que relacionen el volumen perdido a través de fugas con factores como la longitud y presión de la red, tiempo de servicio, número de acometidas y número de usuarios; todos ellos fácilmente determinables. ^[26]

Los indicadores de pérdidas técnicas que se utilizan son aquellos que están en función del:

- ✓ Porcentaje del caudal promedio diario, o indicadores porcentuales.
- ✓ Volumen por usuario por unidad de tiempo, expresado en litros/usuario/hora.
- ✓ Volumen por conexión de servicio por unidad de tiempo, expresado en litros/acometida/hora.
- ✓ Volumen por longitud de tuberías del sistema por unidad de tiempo, expresado en m³/Km de redes del sistema/hora.



2.2.1.3.2. Indicadores porcentuales

Estos indicadores se calculan a través del estudio proveniente de la medición y monitoreo (en intervalos de 24 horas) de caudales mínimos nocturnos generados en un sector hidráulico. Entre los indicadores de mayor uso se consideran el índice de agua no contabilizada (IANC), índice de consumo no – doméstico, el índice lineal de fugas y los coeficientes de consumo.

La interpretación de algunos de estos indicadores es fácil, ya que para cada uno de ellos existen valores de referencia y si al momento de compararlos con los valores que se obtienen del cálculo para cada sector son superiores, indicarán la existencia de fugas en la red de distribución. ^[14]

2.2.1.3.2.1. Índice de agua no contabilizada (IANC)

Es un indicador del porcentaje de pérdidas en un sistema de distribución de agua potable, que sirve para diagnosticar la eficiencia general de la entidad encargada de la distribución, la disminución del IANC es el principal objetivo en una empresa de agua potable, lo cual es difícil de conseguir, se puede definir un nivel aceptable de 25% (valor indicado por el Banco Mundial), aunque este valor es propio de cada sistema de distribución y la entidad o empresa lo designara.

La norma real para decidir si existe un nivel aceptable de ANC es una regla económica: el ahorro económico en la producción de agua, al menos debe compensar el costo de reducción de agua no contabilizada (ANC). ^[29]

El cálculo de este indicador se lo realiza con la siguiente expresión:

$$IANC(\%) = \left(1 - \frac{W_f}{W_i}\right) \times 100 \quad [\text{Ec. 3}]$$

Dónde:

Wf: Volumen facturado en un período.

Wi: Volumen inyectado al sistema en un período.

[14] Resumido de HAMILTON S., McKENSIE R., SEAGO S. (2006), "A review of performance indicators for real losses from water supply system"

[29] Tomado de Vindas Villalobos Juan C. (2005). "Modelo para la cuantificación y desagregación de las pérdidas en sistemas de agua potable como herramienta para el establecimiento de un programa eficiente de reducción de pérdidas"



Se define como volumen inyectado, aquel volumen que se mide y registra a la salida de los tanques de almacenamiento sin considerar los usos de agua destinados a mantenimientos, como resultado se tiene el volumen que se entrega al sistema de distribución durante un período de tiempo.

Al referirse al volumen facturado se entiende como aquel volumen que se registra a través de medidores domiciliarios (micromedidores), durante un período de tiempo, la determinación de la cifra correcta del IANC en cualquier sistema puede no ser tan fácil, ya que frecuentemente, incluso en sistemas denominados excelentes (completamente medidos) se utiliza mucha agua sin medir y dichas cantidades tienen que ser estimadas.

2.2.1.3.2.2. Índices de consumo

Permiten un conocimiento “a priori” del estado de la red de distribución mediante valores orientadores de la existencia de fugas (cuadro 2.3.), su cálculo se hace a partir de los consumos horarios que se obtienen a través del análisis gráfico y estadísticos de los datos que se registran durante la medición del caudal suministrado a la red de distribución, se realiza de manera continua durante un tiempo mínimo de 24 horas.

Los coeficientes de consumo que más se utilizan son el índice de consumo máximo horario (ICMH) y el índice de consumo mínimo nocturno (ICMN) en áreas residenciales. ^[25]

Cuadro 2.3. Valores de referencia de la existencia de fugas para índices de consumo

Indicador	Expresión de cálculo	Valores de referencia
Índice de consumo horario	CMH/CMN	CMH/CMN > 3 a 7, indica bajo nivel de fugas. CMH/CMN < 3, nivel de fugas considerable
Índice de consumo máximo horario (ICMH)	ICMH = CMH/CHP	Valores de diseño recomendado en cada país (México 1.55)
Índice de consumo mínimo nocturno (ICMN)	ICMN = CMN/CHP	ICMN > 0.4 indica sospecha de fuga AWWA recomienda 0.35

Fuente: Hueb José Augusto. (1985). “Control de fugas en los sistemas de distribución de agua potable”

Si existen grandes consumidores en el sector hidráulico, es necesario calcular el Índice de Consumo Nocturno no – Doméstico (ICONOD): ^[14]



$$ICONOD = \frac{CMN - cmn}{CHP - chp} \quad [Ec. 4]$$

Dónde:

CMN: Consumo mínimo nocturno.

cmn: Consumo mínimo nocturno de grandes consumidores.

CHP: Consumo horario promedio.

chp: Consumo horario promedio de grandes consumidores.

Valores de $ICONOD > 0.4$ indican la sospecha de existencia de fugas en el sector, sin embargo la AWWA recomienda utilizar valores de 0.35 para los análisis comparativos.

[10]

Un análisis costo – beneficio junto con estudios de correlación entre pérdidas técnicas de agua potable y valores de $ICONOD$, pueden definir los valores máximos de índices a partir de los cuales es económicamente viable proseguir con la investigación de fugas no visibles para el sector. [10]

Cuando un sector hidráulico no tiene grandes consumidores, el $ICONOD$ coincide con el $ICMN$, ya que el $ICONOD$ elimina la influencia del consumo de los grandes consumidores cuando se analiza la relación entre el caudal mínimo nocturno (QMN) y el caudal horario promedio (QHP).

2.2.1.3.2.3. Índice lineal de fugas

También conocido como consumo específico nocturno (CEN), expresado en (l/s/Km), se lo calcula como el cociente entre el CMN determinado en el registro de datos con el caudalímetro ultrasónico y la longitud de la red de distribución.

$$CEN = \frac{CMN}{L} \quad [Ec. 5]$$

Para realizar el análisis es necesario definir un parámetro de comparación, el cual se conoce como Consumo Específico Límite Nocturno ($CELN$). Para determinar el $CELN$ [Ec. 6] se supone que una parte del agua suministrada a la red durante horarios de consumo mínimo nocturno se pierde a través de fugas y otra parte es aquella que se entrega a los consumidores.



$$CELN = \frac{E \times CMN}{100 \times L} \quad [Ec. 6]$$

Dónde:

CELN: Consumo específico límite nocturno, (l/s/km)

CMN: Consumo mínimo nocturno, resultado del análisis de consumos (l/s)

L: Longitud total de la red de distribución (km)

E: Porcentaje esperado de entrega a los usuarios [Ec. 7] (%)

$$E = \frac{(CMN - P) \times 100}{CMN} \quad [Ec. 7]$$

Cuando no se dispone de suficiente información para determinar el valor de E, se adopta un valor del 70% para redes de distribución donde exista almacenamiento domiciliario. Este valor puede ajustarse para obtener mayor información del sistema.

De lo expuesto anteriormente se establece un criterio el cual si se tiene un valor de consumo específico nocturno mayor al consumo específico límite nocturno se debe realizar inspecciones en el sector con el objetivo de establecer la razón por la cual existen consumos elevados.

La utilización de los indicadores de desempeño hasta ahora revisados es limitada, pues resulta adecuada cuando se utilizan para analizar la evolución del estado de un mismo sector, pero no necesariamente son los más adecuados para realizar comparaciones entre sectores con diferentes presiones de servicio.

Ya que, para una eficiente gestión de fugas es necesario el uso de indicadores que posibiliten el análisis del desempeño de un sistema de distribución cualquiera y que permita su comparación con otros sistemas. ^[4]

Lambert (1998) da una solución a este inconveniente proponiendo el cálculo de un valor de referencia de pérdidas técnicas a través de ecuaciones que utilizan variables tales como longitud de red, número de acometidas, presión promedio de la red durante las 24 horas de servicio.

[4] Tomado de Cabrera Marcet Enrique. (2006). "Alternativas y Estrategias disponibles en la Reducción de Pérdidas".



En función de la propuesta hecha por Lambert la IWA (International Water Association), recomienda la utilización de un indicador el cual se lo conoce como Índice de Fugas Estructurales (IFE) el cual permite medir la efectividad de las actividades de reparación y rehabilitación de redes como resultado de la gestión de fugas, en relación a la presión de servicio de cada sistema el cual influye sobre el estado de la infraestructura del sistema. [7]

2.2.1.3.2.4. Índice de fugas estructurales (IFE)

El IFE es un valor adimensional, y su cálculo se basa en la relación entre el CARL y UARL [Ec. 7], que se calculan en función de las presiones existentes para cada sistema y su continuidad de servicio; por lo que puede utilizarse efectivamente como factor de comparación entre diferentes sistemas de abastecimientos. [7]

$$IFE = \frac{CARL}{UARL} \quad [Ec. 7]$$

El uso del IFE no se acepta aún en su totalidad dentro de las entidades encargadas del agua debido a que:

1. La exactitud de la base de datos en la que la ecuación general de cálculo del UARL es cuestionable.
2. Los datos que se necesitan para determinar el UARL, por lo general no se encuentran disponibles.
3. El IFE es un indicador elemental y carece de una explicación física.

Un valor de IFE igual o incluso menor que 1 indica que el sistema se encuentra en las mejores condiciones posibles de operación y gestión; y a medida que un sistema envejece y/o su gestión empeora, el IFE tenderá a aumentar sensiblemente, situándose entre lo aceptable en el entorno de 5. [7]

A continuación se muestra una matriz en la cual se encuentran valores a considerar en el momento de comparar los resultados y determinar en qué estado se encuentra el sistema y que acciones se deben considerar.

[7] Delgado David Michael. Publicación "Infrastructure Leakage Index (ILI) as a Regulatory and Provider Tool". Department of Civil Engineering & Engineering Mechanics College of Engineering. University of Arizona.



Cuadro 2.4. Matriz de evaluación de pérdidas físicas

Categoría técnica de desempeño		IFE	l/conexión/día (cuando el sistema esta presurizado) a presión promedio de:				
			10m	20m	30m	40m	50m
País desarrollado	A	1 - 2		<50	<75	<100	<125
	B	2 - 4		50 - 100	75 - 150	100 - 200	125 – 250
	C	4 - 8		100 - 200	150 - 300	200 - 400	250 – 500
	D	>8		>200	>300	>400	>500
País en vías de desarrollo	A	1 – 4	<50	<100	<150	<200	<250
	B	4 – 8	50 – 100	100 – 200	150 – 300	200 – 400	250 – 500
	C	8 – 16	100 – 200	200 – 400	300 – 600	400 – 800	500 – 1000
	D	>16	>200	>400	>600	>800	>1000

Fuente: Benavides Muñoz Holger. Apuntes de clases “Cálculo del Índice de Fugas Estructural”

Las diferentes categorías A, B, C, D indican las diferentes acciones a tomar y dan una idea clara del estado del sistema de distribución es así que:

- A: La reducción adicional de las pérdidas puede ser antieconómica, aunque se presenten racionamientos. Se requiere de un análisis cuidadoso para identificar las medidas de mejoramiento costo efectivas.
- B: Potencial de mejoramiento interesante. Considere la gestión de presiones, unas mejores prácticas para el control activo de pérdidas y un mejor mantenimiento del sistema.
- C: El nivel de pérdidas es importante. Esta situación es tolerable solo si el agua es barata y en exceso. Aun así, analice el nivel y naturaleza de las perdidas e intensifique los esfuerzos por su reducción.
- D: El uso de los recursos es terriblemente ineficiente. Los programas de reducción de pérdidas son imperativos y de alta prioridad.^[3]

Al comparar el resultado obtenido con los valores del cuadro anterior se puede dar una solución al problema existente en el sistema, finalmente es necesario reiterar que la importancia de este indicador no radica en su valor numérico, sino que se lo considera como un instrumento de comparación entre distintos sistemas de abastecimientos.



2.2.1.4. Método matemático utilizado en la detección de fugas – Análisis de Flujos Mínimos Nocturnos (AFMN)

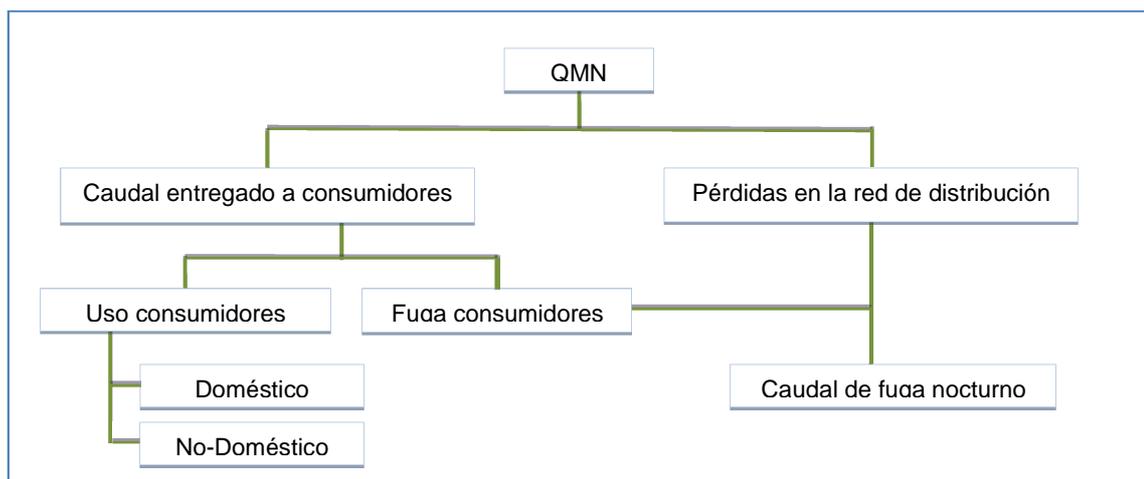
Es un método matemático y se utiliza para la de detección de fugas en redes de distribución de agua potable, se aplica en redes sectorizadas debido a que en estas se puede caracterizar la curva de caudal de cada sector, y por lo tanto se logra determinar el caudal mínimo nocturno (QMN).

Una variación de este caudal indica presencia de fugas en la red de distribución, se presenta cuando los consumos de un determinado sector ya sean industriales, domésticos o no-domésticos disminuyen, por lo general esto ocurre entre las 02h00 y 04h00 horas de la madrugada.

Con el desarrollo de este análisis se puede cuantificar que parte del caudal mínimo nocturno es el que realmente fuga en la red de distribución. ^[1]

2.2.1.4.1. Generalidades del caudal mínimo nocturno

El caudal mínimo nocturno se conforma por dos principales elementos, un caudal de fuga que se pierde en la red de distribución y un caudal que se entrega a los consumidores, ya sean domésticos o no-domésticos, dentro de los cuales se encuentran las fugas en instalaciones domiciliarias y los consumos intencionados nocturnos en el esquema 2.2. se presenta en detalle.



Esquema 2.2. Componentes del caudal mínimo nocturno

Fuente: Francisco Arregui de la Cruz. “Evaluación de las fugas mediante el análisis de los caudales inyectados”. ITA. Universidad Politécnica de Valencia

[1] Resumen de Arregui de la Cruz Francisco. “Evaluación de las fugas mediante el Análisis de los Caudales Inyectados” ITA.



Caudal entregado a consumidores: es aquel caudal que se entrega a los usuarios sin dar importancia al tipo de consumo que se presente sea este doméstico, comercial o industrial, hay que tener en cuenta que no todo el caudal que se entrega al usuario se utiliza, sino que, una parte es consumido intencionalmente es decir, cuando un grifo es abierto o cuando se descarga el agua del tanque del inodoro se originan consumos de menor duración y de caudales variables, dentro de este uso intencionado se presentan los consumos domésticos y los no-domésticos. Otra parte del caudal entregado se le atribuye a las fugas que existen en las instalaciones domiciliarias, se caracterizan por tener duraciones temporales elevadas y mantienen su caudal constante. ^[1]

“Los consumos domésticos son de corta duración pero constantes y de caudal variable” ^[10], en el informe “Managing leakage” a partir de estudios realizados en el Reino Unido a 6207 viviendas se determinó que el caudal medio suministrado durante horas de menor consumo es de 2.5 l/viv/h, de los cuales 1.7 l/viv/h se le atribuye al entregado a las viviendas, dentro de este valor se considera los consumos intencionados y las fugas en instalaciones domiciliarias, este valor corresponde a un 17.00 % de acometidas domésticas activas que utilizarían en promedio 10 litros, y 0.8 l/viv/h corresponde a las pérdidas que existen en la tubería que conecta desde la red principal hasta el medidor. ^[1]

Al hablar de consumos no-domésticos se debe considerar que estos son elevados en comparación con los domésticos, el “Managing leakage” propone un método para estimar el caudal de los consumidores no-domésticos menores a 500 l/viv/h, y consiste en seleccionar a los usuarios que tengan caudales menores al de referencia para luego clasificarlos en función del tipo de usuario (Cuadro 2.5.).

Una vez clasificados se contabiliza el número de usuarios de cada categoría y se lo multiplica por el valor de los consumos medios de cada categoría finalmente se suma todo los resultados y se obtiene un valor estimado del caudal de usuarios no-domésticos.

Como por ejemplo, si en el sector existe una estación de policía, un hospital, y un hotel se tiene los consumos de 0.9, 20.5 y 12.6 respectivamente; la suma de estos da como resultado 34 l/h.

**Cuadro 2.5.** Valores medios de consumo nocturno suministrado a diversos tipos de usuarios no-domésticos.

Grupo	Tamaño de muestra	Usuarios "activos"	% usuarios activos	Consumo medio por usuario "activo"	Consumo medio en la categoría
A: Estaciones de policía/bomberos sin hombres bancos, iglesias, jardines.	123	16	13	7	0.9
B: Tiendas, oficinas, talleres, lavanderías, propiedades domésticas grandes, pensiones, garajes, campings, granjas, comederos de ganado.	2013	606	30	20.5	6.2
C: Hoteles, escuelas, universidades, residencias, cafés, restaurantes, establos.	505	244	48	26	12.6
D: *Hospitales, fábricas (comida y manufacturas), urinarios públicos, sitios de trabajo.	205	79	39	53	20.5
B: *Residencias de ancianos, minas y canteras.	33	25	76	80	60.6

**Una alternativa para grandes residencias y hospitales es de 2.5 l/residente/día*

Fuente: Francisco Arregui de la Cruz. Evaluación de las fugas mediante el análisis de los caudales inyectados. ITA. Universidad Politécnica de Valencia

La principal desventaja de utilizar este método es que se excluye a los consumidores con caudales superiores a los 500 l/viv/h, y en consecuencia se debe contabilizarlos individualmente en el caso de que existan, es por ello que una simplificación del método anterior (utilización de cuadro 2.5.), propone utilizar un consumo de 8 l/viv/h por cada acometida independientemente del grupo al que pertenezca. ^[1]

El caudal de fuga de consumidores es aquel, que sucede en instalaciones domiciliarias, los cuales generan consumos de elevada duración temporal, se debe considerar que la existencia de fugas durante largos períodos de tiempo en instalaciones domiciliarias ocasiona pérdidas económicas a largo plazo, pero como la entidad no refleja mediante la facturación la existencia de dichas fugas, los consumidores no encuentran motivo suficiente para repararlas.

Pérdidas en la red de distribución: son aquellas que ocurren en la red de distribución y en función del lugar donde se producen se distinguen las roturas en



tuberías de distribución y en acometidas y por otro lado las pérdidas generadas por fugas latentes. ^[1]

Las pérdidas que se presentan por roturas en tuberías de distribución y acometidas, se las puede calcular a partir de información acerca de la frecuencia de aparición, el caudal característico y el tiempo que transcurre desde su aparición hasta el momento que es reparada.

Para obtener información acerca de estos aspectos, es necesario llevar un registro de las fugas reparadas identificando el origen de la misma, causas que la provocaron, estimar el caudal de fuga, el tipo de material y diámetro de la tubería, la forma de la rotura, entre otras, a través de estos parámetros se organiza una base de datos la cual permita calcular el volumen que se pierde debido a roturas.

Mientras más completa y detallada sea la base de datos resultara más fiable y sencillo correlacionar las variables que se presentan, como por ejemplo se puede relacionar el caudal de fuga con el diámetro de la tubería, el cual está relacionado directamente, es decir mientras el diámetro de la tubería sea mayor el caudal de fuga aumentará, en el “Managing leakage” se presenta un estudio realizado en el Reino Unido, el cual es aplicado a 500 fugas de 8 compañías diferentes y determinaron que “la relación entre el diámetro y el caudal de fuga evoluciona de forma diferente según se comuniquen o no las roturas, además de esto la probabilidad de que la fuga sea visible aumenta con el incremento del caudal.” (Arregui de la Cruz Francisco)

Las fugas latentes, por tener un caudal bajo son difíciles de detectar y localizar, el cálculo de estas fugas se lo puede realizar a través de la ecuación 1 propuesta por Lambert y Hirner, por medio de esta se determina el nivel medio de fugas inevitables (Unavoidable Average Real Losses - UARL), las cuales involucran la longitud de tuberías, número de acometidas, longitud total de las acometidas desde la tubería principal hasta el medidor del usuario, y la presión media del sistema. ^[1]

$$Q_{fugaslatentes} = \left(\frac{A \times L_m}{N_c} + B + \frac{C \times L_p}{N_c} \right) \times P \quad [Ec. 8]$$

Dónde:

Lm: longitud de tuberías. (km)



Lp: longitud total de acometida desde la tubería principal hasta el medidor. (km)

Nc: Numero de acometidas.

P: presión media del sistema. (m c.a.)

Los coeficientes A, B y C, fueron obtenidos a partir de un análisis estadístico elaborado en 20 países a 27 abastecimientos de agua potable (Wallace 1987), estos coeficientes son de 18 - 0.80 y 25 respectivamente.

En el “Managing leakage”, proponen un método similar mediante la ecuación 9 que a diferencia de la anterior simplemente considera la longitud de tuberías y el número de acometidas.^[10]

$$Q_{fugaslatentes} = F \times N_c + G \times L_m \quad [Ec. 9]$$

Los valores de F y G pueden variar en función del estado de la red de distribución y de las acometidas catalogándolas en tres niveles, bueno, medio y malo en el siguiente cuadro se muestra estos valores.

Cuadro 2.6. Valores de F y G para cálculo de fugas latentes

Condiciones	Tuberías (l/km/h) (G)	Acometidas (l/viv/h) (F)
Bueno	20	2
Medio	40	4
Malo	60	6

Fuente: Francisco Arregui de la Cruz. Evaluación de las fugas mediante el análisis de los caudales inyectados. ITA. Universidad Politécnica de Valencia

2.2.1.4.2. Variaciones del consumo nocturno

Principalmente la variabilidad de los consumos nocturnos radica en que no todos los componentes del QMN se comportan a lo largo del tiempo de la misma manera debido a la variación sistemática de los mismos, la cual es provocada por diversos factores:

- ✓ Consumos aleatorios
- ✓ Número de usuarios
- ✓ Efectos de la presión la cual se involucra dentro de la aparición de nuevas fugas



La aleatoriedad del consumo de los usuarios se puede demostrar a partir de que tanto los caudales de fuga que ocurren en instalaciones internas, como los que ocurren en la red de distribución son prácticamente estables durante el período en el que ocurre el caudal mínimo nocturno, pero los consumos intencionados ya sean domésticos o no-domésticos se vinculan a consumos de intensidad y duración aleatoria.

Durante las horas nocturnas se reduce el consumo, por lo que dicho consumo se asigna a un caudal de fuga, entonces si se tiene conocimiento del caudal mínimo nocturno en una vivienda se puede tener un estimador de fugas en la misma, pero la realidad es otra ya que al momento de medir los caudales se lo realiza para todo un grupo de viviendas (sector, distrito), lo cual dificulta estimar un caudal base de fuga.

En conclusión si se aumentan los consumidores, se incrementa la dificultad e inseguridad para determinar un caudal base de fuga.

2.2.1.4.3. Corrección del caudal mínimo nocturno

El caudal mínimo nocturno se encuentra afectado por la magnitud de algunas variables como: la presión de servicio, aleatoriedad de los consumos, y el período de muestreo en el cual se registra el caudal mínimo nocturno, por estas razones se debe corregir el valor del caudal de fuga que se obtiene en función de las variables tanto de presión como del período de muestreo. ^[1]

Factor corrector de la presión: la presión influye directamente al caudal mínimo nocturno debido a que un incremento o disminución de este, genera que la magnitud del caudal aumente o disminuya según sea el caso, debido a esto es que se debe reducir los efectos de la presión mediante un factor corrector de presión (FCP), en el cuadro 2.7., se muestran algunos valores estándar a una presión de 50 m c.a. ^[1]

Cuadro 2.7. Factor de corrección para estandarizar los QMN a una presión de 50 m c.a.

Presión Nocturna (m c.a.)	15	20	30	40	50	60	70	80
Factor corrector de la presión (FCP)	0.238	0.329	0.529	0.753	1.000	1.271	1.566	1.884

Fuente: Francisco Arregui de la Cruz. Evaluación de las fugas mediante el análisis de los caudales inyectados. ITA. Universidad Politécnica de Valencia

El empleo del factor corrector de la presión se resume a una simple división entre el caudal mínimo nocturno y el valor del factor que corresponde a la presión media del sector, para mayor comprensión se presenta un ejemplo sencillo.



Si en el sector se registró un QMN = 5 m³/h y la presión media a la que se encuentra es de 40 m c.a., el valor que corresponde para esta presión es de 0.753, ahora bien para determinar el nuevo valor corregido de caudal de fuga se tiene que dividir los 5 m³/h para 0.753 y se tiene como resultado 6.6 m³/h.

De acuerdo a la presión media a la cual se encuentra trabajando el sistema se puede estandarizar los coeficientes, para ello se realiza un procedimiento sencillo el cual consiste en determinar el índice del caudal de fuga a la presión que se pretenda estandarizar y luego dividir este índice para cada uno de los diferentes coeficientes correspondientes a cada presión, como ejemplo se determina coeficientes correctores para una presión media de 40 m c.a. el índice del caudal de fuga para esta presión es de 0.753, el nuevo coeficiente a una presión de 15 m c.a. para la presión estándar requerida es de 0.316 en el cuadro 2.8. que se muestra a continuación se exponen los coeficientes para una presión estándar de 40 m c.a.

Cuadro 2.8. Factor de corrección para estandarizar los QMN a una presión de 40 m c.a.

Presión Nocturna (m c.a.)	15	20	30	40	50	60	70	80
Factor corrector de la presión (FCP)	0.316	0.437	0.703	1.000	1.328	1.688	2.080	2.502

Fuente: El Autor

Factor Corrector del intervalo de muestreo: el comportamiento de los consumos a lo largo del tiempo varían y por lo tanto no son constantes, es por ello que se considera la duración del intervalo de tiempo durante el cual se determina el caudal medio.

Dentro de los componentes del caudal mínimo nocturno se distinguen los consumos de caudales constantes y de larga duración, entre los cuales constan las fugas en la red de distribución las cuales son dependientes de la presión, las fugas en conexiones domiciliarias y los usos intencionados de los usuarios, y por otra parte los consumos de caudales variables con menor duración, dentro de los cuales constan los consumos en viviendas, industrias o comercios, y las fugas menores existentes en instalaciones internas como un grifo mal cerrado o cisterna defectuosa.

Al utilizar un intervalo de tiempo de 15 min para determinar el caudal medio de un sector puede ocurrir que durante este período se presenten consumos por parte de los usuarios, y en consecuencia estos incrementan el caudal mínimo nocturno es decir, si se aumenta el intervalo de tiempo de muestreo se estará aportando al incremento del



caudal mínimo nocturno.

Para evitar esta eventualidad el “Managing leakage” expone un factor de corrección del período de muestreo el cual estandariza todas las medidas y disminuye el efecto que introducen los diferentes periodos de muestreo, el valor que asume es de 60 min. [1]

2.2.1.4.4. Extrapolación de caudales de fuga

El caudal de fuga se ve afectado por la presión de una forma directa, es decir, cualquier variación de la presión en el sector afectará a la magnitud de este, a través de la ecuación 3 se puede conocer los caudales de fuga que ocurren en cualquier instante, esto servirá de ayuda para poder conocer el comportamiento del caudal fugado a lo largo del tiempo.

$$Q_{fugas(t)} = Q_f[t_{QMN}] \times \left(\frac{P_t}{P[t_{QMN}]} \right)^{N_1} \quad [Ec. 10]$$

Donde se identifica que:

- $Q_{fugas}(t)$: Caudal de fuga extrapolado.
 $Q_f[t_{QMN}]$: Caudal de fuga en la hora del mínimo caudal nocturno.
 P_t : Presión promedio en el instante t.
 $P[t_{QMN}]$: Presión promedio en el instante que ocurre el QMN.
 N_1 : Exponente que varía entre 1.00 – 1.15

El exponente N_1 es un factor de variación del caudal de fuga con respecto de la presión del sistema, los valores de este factor son el resultado de varias pruebas realizadas alrededor de todo el mundo las cuales determinaron que para sistemas de distribución se utiliza un valor promedio de 1.15 y con el propósito de un modelo de gestión de la presión se adopta un valor conservador de 1.00. [20]

2.2.1.4.5. Procedimiento para el desarrollo de la metodología AFMN

Para realizar la metodología AFMN, se seguirá un proceso que consiste en:



Sectorizar hidráulicamente: en el caso de que la red de distribución no se encuentre sectorizada, habrá que efectuar todo el proceso de sectorización.

Medición de caudales y presiones: mediante la instalación del caudalímetro ubicado en la salida del tanque de almacenamiento y los data logger en diversos puntos de la red.

Tabulación de datos de caudal y presión: luego de un determinado período de muestreo en el sector analizado se descargan los datos de caudal y presión, cada equipo tiene su propio software para la descarga de la información.

Estos son tabulados (ordenados) de tal forma que sea de fácil manipulación, visualización e interpretación, una forma de ordenarlos es de acuerdo a la fecha y hora en que se registró el dato, para lo cual se utiliza el formato del Anexo 1, por facilidad de manejo de datos se recomienda agrupar, máximo registros de dos días y siempre empezar el día a las 24h00, seguidamente se representa gráficamente el caudal y la presión en función del tiempo.

El propósito de esto es de poder identificar las variaciones del caudal en ciertas horas de la madrugada (02h00 – 04h00 am), éstas indicarán existencia de fugas en la red de distribución, o simplemente eventualidades que se presenten en cualquier momento durante el período de muestreo (cortes de agua).

De la misma manera mediante la variación de la presión durante el estudio se logra identificar la presión máxima o picos de presión que se generan cuando el caudal disminuye, o en su defecto determinar las presiones mínimas o bajas de presión que se presenten en la red de distribución cuando el caudal aumenta.

Adicionalmente a lo expuesto anteriormente, es de gran importancia combinar en una sola gráfica el caudal y la presión, con la intención de establecer algunos parámetros importantes tales como caudales mínimos, elevación de presiones, presencia de caudales máximos, o alguna disminución excesiva de presión, al analizar todos éstos se logra identificar la existencia de posibles fugas, consumos exagerados, fallas en la infraestructura de la red, etc.

Análisis de datos obtenidos en el período de registro: basándose en el principal objetivo del análisis de flujos mínimos nocturnos, que es el de detectar aquel caudal de fuga que se origina entre las 02h00 y 04h00 de la madrugada (horas de menor



consumo), se pretende establecer un caudal mínimo de entre los datos que se registran, a este caudal se lo conoce como caudal mínimo nocturno (QMN) y se manifiesta cuando la presión en la red de distribución es la máxima registrada, es decir cuando los consumos disminuyen en el sector.

Con el fin de tener una idea clara de cómo se encuentra funcionando el sistema de distribución se debe establecer rangos tanto en caudales como en presiones, e identificar máximos, mínimos y medios.

No solamente se debe tomar como único valor de QMN el registrado durante el período de estudio, sino que se debe conocer el comportamiento de este caudal de fuga a lo largo del tiempo, para determinar con mayor exactitud aquel caudal mínimo que se presenta en la red.

Para ello es necesario extrapolar los caudales de fuga relacionando el QMN que se registra con la presión máxima que se presenta cuando este ocurre, para ello se utiliza el Anexo 2.

Procedimiento para extrapolación de caudales de fuga:

1. Descargar información de los equipos (caudal y presión).
2. Tabular datos y ordenar.
3. Identificar el QMN registrado en las lecturas, y reconocer la presión máxima que se registra cuando se presenta este caudal.
4. Identificar valores máximos, medios y mínimos de caudal y presión.
5. Graficar la variación de caudal y presión.
6. Extrapolar los caudales de fuga utilizando la [Ec. 10].
7. Como los valores del exponente N_1 varían desde 1 a 1.15 ^[11], se determina un caudal de fuga para cada valor de este exponente incrementándolo proporcionalmente. De todos los valores que se obtiene se calcula un caudal de fuga promedio.
8. Determinar el caudal que se entrega a los consumidores, para conseguirlo se realiza una resta entre el caudal registrado y el caudal fugado calculado.



9. Graficar el caudal registrado, caudal entregado y caudal fugado.

Luego que se cuantifica el caudal de fuga que existe en el sistema, se debe determinar un mínimo inevitable (fugas latentes), el cálculo de las mismas se la realiza siguiendo el procedimiento a continuación expuesto:

1. Identificar los usuarios domésticos y no-domésticos con consumo mayor a 500 l/h en horas nocturnas.
2. Estimar el consumo doméstico nocturno menor a 500 l/h, ya sea en función de las viviendas o de los habitantes.
3. Estimar el consumo no-doméstico nocturno menor a 500 l/h.
4. El caudal que se entrega a los usuarios, será la suma de todos los consumos tanto domésticos como no-domésticos, ya sean consumos mayores o menores a 500 l/h.
5. En función de la longitud de la red y la longitud total promedio de acometida, se calcula las fugas latentes (Ec. 9).
6. Corregir el valor de fuga latente en función de la presión es decir, con la presión media a la que opera el sistema y considerando los valores del cuadro 2.7., en el caso de que la presión del sistema no sea de 50 m c.a. se debe hacer una nueva tabla con la presión que se tenga.
7. Calcular el caudal de fuga mínimo inevitable, sumando las fugas latentes a los consumos.
8. Determinar la desviación típica muestral.
9. Calcular el caudal de fuga, mediante una suma (máximo) y resta (mínimo) del valor mínimo inevitable, así se establece un rango de caudales el cual queda como base para comparar con los caudales de fuga calculados y establecer si existe o no un problema de fugas en la red.

Evaluación y comparación de índices de pérdidas: mediante el uso de los índices que se utilizan en la gestión activa de fugas, se debe establecer el estado en el que se encuentra la red en estudio y determinar qué medidas correctivas se tienen que ejecutar para mejorar el estado de la misma.



2.2.1.5. Métodos de localización de fugas

2.2.1.5.1. Generalidades de la localización de fugas

Una vez que se tiene conocimiento de la existencia de fugas de agua en la red de distribución, el siguiente paso del control activo de fugas es localizarlas, la detección “considera a las fugas, desde el momento en el que se originan hasta que la entidad o empresa sepa de su existencia pero aún no son localizadas” [6]

Mediante la detección se logra limitar la zona de búsqueda en un determinado sector, para luego de ello localizar el lugar exacto donde se origina la fuga a través de la utilización de instrumentos acústicos, tales como geófonos, varillas acústicas, fonómetros, correladores acústicos entre otros.

Las tuberías de distribución de agua se encuentran bajo la superficie del terreno en ellas se pueden presentar fugas las cuales producen ruidos, generados por el escape de agua a presión y generan vibraciones.

“Los sonidos originados están en un rango de frecuencia comprendido entre 350 y 2000 ciclos por segundo, aunque el sonido se puede mezclar con los sonidos ambientales que se encuentran dentro de un rango de 350 ciclos por segundo” [30]

Se presentan tres tipos de ruidos: [24]

- ✓ Fuerte, debido a la resonancia y vibración que se produce por la salida del agua por un orificio existente en la tubería.
- ✓ Débil, provocado por la circulación del agua o por el impacto del agua en el suelo, solamente se lo puede identificar cuando se está muy cerca de la fuga.
- ✓ Igual al sonido que genera un arroyo esto se da cuando el agua circula por el suelo.

[6] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2009) “Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable”. Editor Secretaría de medio ambiente y recursos naturales – México D.F.

[30] Recomendaciones para la detección y aforo de fugas en tomas domiciliarias. CEPIS. <http://www.cepis.org.pe/bvsair/e/repindex/rep48/recomen.html>. Pagina activa.

[24] Tomado de SUBSURFACE LEAK DETECTION.Inc. “How to find leaks”. www.subsurfaceleak.com/findleaks.html.



2.2.1.5.2. Factores que afectan la intensidad y frecuencia del sonido de las fugas para su localización

Los métodos de detección y localización se basan en la intensidad y frecuencia de los ruidos originados por las fugas de agua en tuberías de distribución, existen algunos factores que afectan el reconocimiento acústico de estos escapes de agua los cuales son: ^[24]

- ✓ **Presión:** la intensidad del ruido originado por las fugas es directamente proporcional a la presión del agua en el interior de la tubería, esto hasta un cierto límite (figura 2.6.). ^[9]

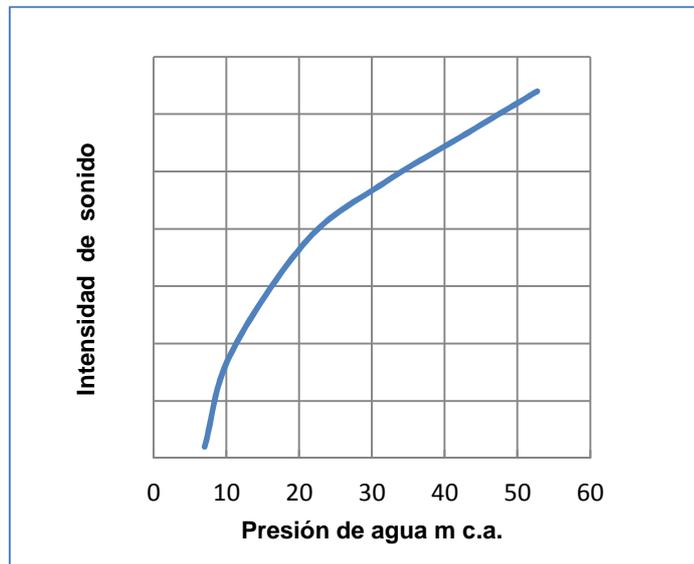


Figura 2.6. Relación intensidad – presión de agua
Fuente: SUBSURFACE LEAK DETECTION Inc. “How to find leaks”

- ✓ **Material y diámetro de tuberías:** el material de las tuberías de distribución influye en la frecuencia del ruido que se origina por las fugas así por ejemplo, en tuberías con materiales metálicos (hierro, cobre o acero) se puede identificar fácilmente la presencia de escapes de agua debido a que la frecuencia del ruido que se genera puede llegar hasta los 2000 ciclos por segundo, en tuberías de PVC o asbesto la frecuencia que se genera es menor a este valor. Independientemente del material de las tuberías su diámetro afecta la transmisión del ruido, por lo que en tuberías con diámetros grandes se originan ruidos con frecuencia baja. ^[9]
- ✓ **Tipo de suelo y grado de compactación:** en suelos donde la compactación no se realiza de una buena manera el ruido que producen las fugas no se transmite



hacia la superficie, mucho menos en suelos saturados de agua. ^[9]

- ✓ **Profundidad de la capa de suelo sobre la tubería:** el suelo absorbe rápidamente los ruidos producidos por las fugas, y son muy difíciles de detectar cuando se producen en profundidades de 2.00 m a 2.50 m, sólo en el caso de que la presión fuese elevada se conseguiría ubicarlas, por lo general es más fácil detectar una fuga de agua cuando las tuberías se encuentran en profundidades de 1.00 m a 1.50 m. ^[9]
- ✓ **Cubierta del suelo:** el tipo de superficie que esta sobre el material que cubre las tuberías sea asfalto, vegetación, o suelo sin compactar influye en la detección y localización de las fugas. En cubiertas vegetales o suelos sin compactar la repercusión del ruido de las fugas tiene una frecuencia menor, por lo contrario en cubiertas de asfalto el ruido de las fugas repercute hacia la superficie con mayor frecuencia las cuales pueden ser identificadas en un rango de 1.50 m a 3.00 m de distancia. ^[9]

2.2.1.5.3. Equipos que se utilizan en la localización de fugas

En la actualidad existen varios equipos que sirven para la detección y localización directa de fugas, los cuales se basan principalmente en la captación del ruido que estas emiten al momento de salir el agua a presión por un orificio o rajadura existente en la tubería, o a su vez la alteración que sufren las propiedades del terreno por la presencia de estas. Los equipos de localización o registradores acústicos de ruido tienen como tarea principal identificar el lugar exacto de ocurrencia de la fuga.

2.2.1.5.3.1. Fonómetro

Los fonómetros son equipos destinados para el control de redes de agua, el uso de ellos evita que el personal de la empresa operadora realice mediciones nocturnas, pueden ser instalados en cualquier momento en la red de distribución como en los vástagos de las válvulas de retención o en las tapas de los hidrantes.

En tuberías metálicas (acero, hierro o cobre) el radio de alcance de la señal del fonómetro es de aproximadamente 100.00 m, por otro lado en tuberías plásticas (PVC) los intervalos entre los puntos de instalación de los fonómetros deben ser cortos.

[9] Resumido de Farrer, Crespo Herbert. (1979). "Control de fugas en redes de distribución de agua". Proyecto de Desarrollo Tecnológico de Instituciones de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado. (DTIAPA). www.cepis.org.pe/bvsacd/scan/011632-05.pdf



Los fonómetros efectúan la medición del ruido por segundo en ciclos de 20 minutos (ciclo de medición) y se pueden programar para que funcionen entre dos a cinco horas como máximo, cuando al final de un ciclo de medición no se obtiene ningún registro de existencia de fugas, automáticamente el equipo realiza un nuevo escaneo a la zona en estudio.

El equipo se instala por lo menos 48 horas en el mismo punto de medición con el propósito de descartar los ruidos parásitos (circulación vehicular, variaciones de clima, conexiones de agua).^[22]



Imagen 2.5. Utilización del fonómetro en la localización de fugas
Fuente: ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. (1999). Fascículo “Fugas y Medidores”

Una vez que se realiza el estudio con el fonómetro, los datos se registran automáticamente y son transferidos a través de un cable de interface, el tratamiento de las mediciones se lo realiza mediante la ayuda de un programa del fabricante, el cual permite conocer la naturaleza de los ruidos e identificar correctamente los ruidos que pertenecen a los de una fuga.^[22]

[22] Resumido de ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. Fascículo “Fugas y Medidores”
<http://www.paho.org/Spanish/HEP/HES/LksnMtrS.pdf>.



2.2.1.5.3.2. Geófono

El geófono es utilizado en la detección de ruidos subterráneos los cuales se propagan a través del suelo, este equipo amplifica el ruido que se origina por fugas hacia los auriculares por medio de un micrófono que recepta y transmite a manera de señales acústicas estos sonidos.

El micrófono está montado sobre dos tipos de sonda: de campana (micrófono de suelo) y de bastón (micrófono de contacto), los micrófonos se colocan en puntos de contacto remotos de la red, tales como llaves cortadoras, válvulas, hidrantes, medidores domiciliarios, etc., para lograr escuchar mejor el ruido que se origina por fugas, es aconsejable bloquear temporalmente el flujo vehicular y procurar que la presión en el lugar no sea menor a 10 m c.a. (1.00 Kg/cm²).

Cuando no se puede conseguir trabajar bajo estas condiciones resulta más conveniente realizar la inspección entre las 24h00 a 06h00, lapso de tiempo en el cual disminuyen los consumos, la presión aumenta y los ruidos ambientales son de menor frecuencia.

Si al momento de realizar la inspección se presentan ruidos con frecuencias elevadas, o simplemente no se localiza la fuga sobre el punto de la red en estudio, se debe comparar con el ruido que producen las conexiones de la red cuando circula agua por estas.

Posiblemente la fuga se encuentre en otro lugar incluso en las tuberías de distribución, razón por la cual mediante el uso del micrófono de contacto se puede realizar una pre-localización, es decir limitar la zona de búsqueda en áreas de inspección más pequeñas, para posteriormente con el micrófono de suelo localizar el lugar exacto donde se origina la fuga, se puede complementar la localización verificando el sitio de ocurrencia del escape de agua mediante el uso de algún equipo electrónico por ejemplo correlador acústico. ^[22]

2.2.1.5.3.3. Correlador acústico

Una fuga en una tubería produce un ruido constante el cual se propaga mediante las paredes de la tubería (Cuadro 2.9.) y a través del fluido que transportan en este caso agua, los dos sensores que se encuentran en contacto con la tubería, captan este ruido lo amplifican y lo envían hacia la unidad central.



“La correlación acústica es un proceso que por medio de dos señales que provienen de sensores se procesan en sus componentes de frecuencia, para desechar la información que no es común a ambos, es decir todos los ruidos como por ejemplo tráfico vehicular, valiéndose solo de la información de la señal que “escuchan” ambos sensores en este caso la fuga y conociendo el diámetro y material de la tubería el equipo determina la distancia existente desde los sensores hasta la fuga con mayor precisión.”^[8]

Cuadro 2.9. Distancias de transmisión de ruidos en tuberías

Material de tubería	Diámetro	Distancia máxima de transmisión
Hierro fundido	160 mm (6 pulg)	185 m – 305 m
	310 mm (12 pulg)	125 m – 245 m
	610 mm (24 pulg)	65 m – 125 m
Asbesto-cemento	160 mm (6 pulg)	125 m – 245 m
	310 mm (12 pulg)	95 m – 155 m
	610 mm (24 pulg)	35 m – 95 m
PVC	160 mm (6 pulg)	65 m – 95 m
	310 mm (12 pulg)	35 m – 65 m
	610 mm (24 pulg)	15 m – 35 m

Fuente: SUBSURFACE LEAK DETECTION Inc. “How to find leaks”

Por su precisión y su notable insensibilidad a los ruidos ambientales es el más usado, sin embargo previo a la utilización del equipo se debe considerar algunos parámetros tales como: tuberías bajo presión, tuberías libres de aire, conocimiento del trazado exacto de la red de distribución, conocimiento de la ubicación, diámetro y tipo de material de las tuberías, esto con el propósito de evitar investigaciones inadecuadas. Con la utilización de un solo equipo se logra inspeccionar 1 km por día, por lo que es aconsejable realizar una investigación previa utilizando equipos de escucha directa como geófonos o fonómetros, para evitar mediciones erróneas.^[22]

2.2.1.5.4. Métodos utilizados en la localización de fugas

2.2.1.5.4.1. Método “Tritón”

El método tritón consiste en medir y transmitir hacia un medidor de flujo las variaciones de presión que se presentan en tuberías de conducción de agua debido a la existencia de fugas, este método se lo implementó ya que en tuberías de plástico (PVC) la transmisión del ruido que generan las fugas a través de las paredes es leve.^[22]

[8] Tomado de EATHISA. Ficha técnica “Correlador acústico controlado por PC, Multicorrelación”. www.eathisa.com/data/archivos/MAQ6000.pdf



Imagen 2.6. Medidor de flujo del tiempo de tránsito “tritón tx10”

Fuente: THERMO ELECTRON CORPORATION.

Catálogo de producto

Las variaciones de presión se registran mediante la instalación de transductores de inserción en la tubería, estos tienen un pistón en el cual hay sensores y por medio de ellos se detectan caídas de presión las que se generan en el momento que el agua sale por una rotura, orificio o rajadura.

La aplicabilidad de este método requiere de una previa inspección de la red mediante el uso de equipos de localización acústicos ya que se necesita saber exactamente donde se encuentra la fuga.

Con el método tritón se puede controlar tramos de hasta 100.00 m de longitud como máximo, si la red es de mayor longitud se debe fraccionar en tantos tramos como se disponga, su utilización es adecuada en tuberías de PVC con diámetro interno de 60 mm o menores y por lo general se utiliza en conexiones domiciliarias. ^[22]

2.2.1.5.4.2. Inyección de gas

Esta técnica es usada con menor frecuencia en la localización de fugas, principalmente porque cuando las fugas son de caudal considerable se puede utilizar los métodos acústicos y por lo general se consigue resultados fiables, pero cuando existen fugas de bajo caudal ya sea por presiones bajas, o el material de la tubería no tiene una buena transmisión del ruido el uso de la inyección de gas es el más efectivo en la localización de este tipo de fugas.



Según Farley M. y Trow S. los gases más comunes que se utiliza en la localización de fugas mediante inyección de gas son:

- ✓ Hidrogeno industrial (95.00 % nitrógeno – 5.00 % hidrogeno).
- ✓ Helio.
- ✓ Hexafloruro de azufre (SF_6).

El gas que se inyecta en el interior de la tubería, realiza un trazado hasta que en el sector donde el agua fuga con un menor caudal, escapa en gran cantidad; la desventaja del uso del Hexafloruro de azufre es que se tiene que hacer excavaciones en tramos de 1.00 m a lo largo de toda la tubería esto con el propósito de permitir que el gas trace. ^[10]

Para empezar la localización se debe en primera instancia aislar la sección que se va a investigar, luego de esto se procede a introducir el gas el cual se encuentra en un recipiente bajo una presión de 150 bares. ^[10]

La cantidad de gas debe ser cuatro a seis veces superior que el volumen interno de las tuberías, una vez que se realiza el procedimiento se detecta la fuga de gas con la ayuda de aparatos específicos.

Si las tuberías se encuentran enterradas se necesita perforar orificios de sondeo a lo largo del trazado, por lo tanto la fuga se localiza a través del análisis de concentraciones de gas en los orificios. ^[10]

2.2.2. Gestión de la presión

La gestión de la presión en sistemas de distribución de agua potable es una de las estrategias fundamentales del control activo de fugas, cuyo propósito es el de reducir en gran medida las pérdidas de agua en la red de distribución, y como resultado de ello lograr reducir la frecuencia de aparición de nuevas roturas o rajaduras.

Presiones de servicio elevadas y una infraestructura hidráulica en mal estado suscitan nuevas pérdidas de agua, pero al reducir la presión en el sistema de distribución se afecta el caudal de fuga, y el nivel de consumo de la población es decir, cuando se tiene presiones elevadas en la red se incrementa en gran medida los consumos, al igual que el caudal de fuga.

[10] Tomado de Farley M. y Trow S. "Losses in water distribution networks". Publicación de la IWA.



La presión estática no deberá exceder los 70 m c.a., y la presión dinámica los 50 m c.a. se establece un mínimo de 10 m c.a. para los puntos con condiciones más desfavorables. (Norma Ex-IEOS. Título VII)

Si la gestión de la presión se planifica adecuadamente, además de reducir las fugas ya sean roturas o fugas de fondo, se obtendrán presiones de servicio más estables que evitaban que la red de distribución soporte esfuerzos los cuales ocasionen debilidad en la infraestructura del sistema.

El costo de una eficiente gestión de la presión se puede analizar considerando los diversos factores que influyen en las condiciones de la infraestructura y su potencialidad a presentar roturas y fugas, esta condición está en función de la edad del sistema de distribución, el tipo de material de las tuberías, el tipo de uniones entre tuberías, condiciones del terreno y la carga superficial.

2.2.2.1. Factores considerados en la gestión de la presión

2.2.2.1.1. Relación entre caudal de fuga y presión de servicio

El caudal de fuga es proporcional al área del orificio de la fuga y a la velocidad real de salida del fluido el cual es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión estática. ^[10]

$$Q_f = C_D \times A_f \times \sqrt{2gh} \quad [\text{Ec. 11}]$$

Dónde:

Q_f : caudal de salida a través del orificio de la fuga. (m^3/s)

C_D : coeficiente de descarga a través del orificio está en función del régimen del flujo.

A_f : área del orificio de la fuga. (m^2)

May (1994) mediante la teoría FAVAD (Fixed and Variable Area Discharge Paths) sobre los trayectos de descarga de área fija y variable, demostró que la sección transversal de algunos tipos de fugas (orificios, roturas en tuberías, y fugas en juntas y accesorios) varían con la presión, mientras que la velocidad del flujo seguía variando con la raíz cuadrada de la presión, es por ello que se generan diferentes tipos de fugas en las que su caudal varía con la presión. ^[17]



$$Q_f = K_f \times P^x \quad [Ec. 12]$$

Dónde:

K_f : coeficiente de fuga.

P : presión estática (m c.a.)

x : exponente de fuga.

El exponente x depende principalmente del material de la tubería y el tipo de falla, por lo que:

- ✓ En tuberías metálicas donde la sección del orificio de salida es constante y no aumenta con la presión, el exponente (x) toma el valor de 0.5.
- ✓ En secciones que varían a lo largo de un eje, por lo general en juntas y uniones, el exponente (x) toma el valor de 1.5.
- ✓ La sección del orificio de salida varía a lo largo de los dos ejes se presenta en tuberías de plástico y el exponente (x) toma el valor de 2.5 ^[17]

Ya que no existe una convención internacional para el exponente (x) el grupo de trabajo de pérdidas de la IWA implementó para su identificación los caracteres alfanuméricos (N_f), además de ello en conjunto con la UKWIR recomiendan el uso de una expresión exponencial la cual relaciona el caudal de fuga con la presión de servicio. ^[5]

$$\frac{Q_f}{Q_0} = \left(\frac{P_f}{P_0}\right)^{N_f} \quad [Ec. 13]$$

Dónde:

Q_f : caudal de salida a través del orificio de la fuga.

Q_0 : caudal de fuga antes de la reducción de presión.

[5] Contreras Garzón Fabio Y Thornton J. (2006). "Influencia de la presión en las pérdidas de agua en sistemas de distribución". Asociación Interamericana de Ingeniería sanitaria y ambiental-ADIS. XXX CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL. URUGUAY. www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruquay30/CO02045_Garzon_Contreras.pdf.

[17] Lambert A.O. y Fantozzi Marco. Publicación "Recent developments in pressure management". http://www.miva-water.com/user_files/Data_and_Research/mivas_experts_articles/15jun2010/Recent%20Developments%20in%20Pressure%20Management.pdf



P_i : presión después de implementar su reducción.

P_0 : presión antes de implementar su reducción.

N_1 : exponente de fuga.

Los valores del exponente N_1 pueden ser obtenidos en pruebas de campo en sectores del sistema de distribución, mediante la reducción de la presión en horas de consumo nocturno. A través del análisis de más de 150 pruebas de campo realizadas en distintos países han confirmado que el rango de variación del exponente oscila entre 0.5 y 1.5, ocasionalmente puede alcanzar valores de 2.5. ^[11].

En el cuadro 2.10 se muestran algunos valores promedio del exponente N_1 resultado de diversos sectores analizados en algunos países.

Cuadro 2.10. Valores promedio del exponente N_1

País	Nº sectores analizados	Rango de valores de N_1	Valor promedio de N_1
Reino Unido (1970's)	17	0.70 – 1.68	1.13
Japón (1979)	20	0.63 – 2.12	1.15
Brasil (1998)	13	0.52 – 2.79	1.15
Reino Unido (2003)	75	0.36 – 2.95	1.01
Chipre (2005)	15	0.64 – 2.83	1.47
Brasil (2006)	17	0.73 – 2.42	1.40
TOTAL	157	0.36 – 2.95	1.14

Fuente: Puust R., Kapelan Z., Savic D. A., Koppel T. (2010). "A review of methods management in pipe networks".

2.2.2.1.2. Relación entre la frecuencia del origen de nuevas fugas y la presión de servicio

A través de la implantación de distritos hidrométricos en sistemas de distribución de agua potable se obtiene información de cualquier eventualidad que se presente (como por ejemplo el sacar de operación una válvula reguladora de presión para su mantenimiento), mediante la cual permite confirmar que la reducción de presiones no solo afecta al caudal de fuga sino que, también incide en la aparición de nuevas fugas. ^[18]. Para iniciar con un análisis que relacione la presión de servicio y la frecuencia con la que se originan nuevas fugas, se debe conocer: ^[5]

- ✓ Historial de roturas antes y después de la implementación del control de presiones por espacio de varios años.



- ✓ La edad, dimensiones, materiales y condiciones de operación de las tuberías en el tiempo.
- ✓ La distribución espacial de las roturas, la clasificación de las roturas en los componentes del sistema (redes matrices, redes de distribución, conexiones domiciliarias).
- ✓ Clasificación de las roturas en función de las causas que las producen.

Mediante la ecuación desarrollada por la IWA, se puede predecir la variación de la frecuencia del origen de nuevas fugas en función de la presión de servicio:

$$\frac{R_1}{R_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N_2} \quad [\text{Ec. 14}]$$

Dónde:

R_1 : frecuencia de roturas después de la reducción de la presión.

R_0 : frecuencia de roturas antes de la reducción de la presión.

P_1 : presión después de implementar su reducción.

P_0 : presión antes de implementar su reducción.

N_2 : exponente.

El exponente N_2 varía desde 0.5 a 6.5, estos valores son el resultado de analizar algunos datos disponibles en Reino Unido, Australia e Italia, “este exponente representa reducciones importantes en la frecuencia de aparición de nuevas fugas y en los costos de su reparación, con efectos beneficiosos adicionales asociados con menores tiempos de permanencia de la fuga, cumplimiento en reparaciones pendientes, disminución de intervención en la detección de fugas y disminución de los recursos necesarios para la renovación de la infraestructura.” [26]

Cuadro 2.11. Valores promedio del exponente N_2

País	Sistema	N_2
Reino Unido	UKWIR	> 0.5
Australia	Brisbane – Sector piloto	0.5
	Valle Yarra – Sector piloto D	0.64
	Valle Yarra – Sector piloto B	0.68
	Valle Yarra – Sector piloto C	0.91
	Valle Yarra – Sector piloto A	1.55

**Cuadro 2.11.** Continuación

País	Sistema	N ₂
Reino Unido	Welsh Water, redes matrices	3.0
Australia	Gold Coast – Sector piloto, domiciliarias	4.9
	Gold Coast – Sector piloto, redes matrices	6.3
Italia	Turin	6.5

Fuente: Thornton J. y Lambert A. (2006). “Progress in practical prediction of pressure, leakage pressure, burst frequency and pressure, consumption relationships”.

2.2.2.2. **Dispositivos para el control de la presión**

El desarrollo de la gestión de la presión por lo general se consigue mediante la instalación de válvulas de control ya sean reguladoras de presión o sostenedoras de presión.

Un deficiente mantenimiento en conjunto con una inadecuada operación de estas originan problemas en el funcionamiento del sistema de distribución, un ejemplo puede ser cuando el encargado de operar las válvulas realiza el cierre o apertura de las mismas de forma brusca, esta acción produce burbujas de aire dentro de las tuberías y forman ondas de presión las cuales generan sobrepresiones o depresiones, dando paso a ocasionarse transitorios como el golpe de ariete o cavitación, estos fenómenos causan roturas en los conductos y como resultado de ello se originan fugas en la red de distribución. ^[16]

Una válvula reguladora de presión opera de tal modo que a medida que la presión aguas arriba aumenta, esta se cierra paulatinamente creando mayores pérdidas de carga a través de la válvula, de tal forma hasta lograr que la presión se estabilice, por lo contrario si la presión aguas arriba disminuye, la válvula se abrirá de tal modo que si la presión llega al mínimo incluso menor, esta estará totalmente abierta, también puede actuar como una válvula de retención impidiendo la circulación del agua en sentido contrario al establecido.

Las válvulas sostenedoras de presión operan de tal modo que cuando los consumos se incrementan aguas abajo, esta se va cerrando progresivamente para mantener la presión aguas arriba, al igual que las válvulas reguladoras actúan también como válvulas de retención. La elección de qué tipo de válvula se va a utilizar para conseguir un eficiente control de la presión dentro de la red de distribución depende de algunos factores: ^[18]



- ✓ Tamaño y contextura del sistema de distribución.
- ✓ Consecuencias del deterioro.
- ✓ Costos de instalación y mantenimiento.
- ✓ Pronóstico de ahorro de agua.
- ✓ Número de consumidores (presión mínima, regulaciones contra incendios).

2.2.3. Gestión de la infraestructura

La gestión de la infraestructura de todos los sistemas de distribución de agua potable requiere tareas de mantenimiento y en algunos casos de renovación de la infraestructura defectuosa. ^[23]

2.2.3.1. Mantenimiento

El mantener en condiciones de operatividad excelentes a la red de distribución de agua conlleva a realizar actividades correctivas o preventivas, estas a su vez permiten una reparación rápida de las fallas existentes para finalmente lograr el propósito de mantener la infraestructura en excelentes condiciones.

El mantenimiento se lo realiza a los diversos componentes de la red, como tuberías, válvulas, acometidas, y también a los diversos equipos que se utilizan en el control activo de fugas. ^[23]

El mantenimiento correctivo: comprende toda actividad de reparación que se realiza en cualquier punto de la red de distribución donde se produzca una rotura, la ejecución de este mantenimiento no se programa previamente sino que se realiza cuando el usuario reporta el problema.

El mantenimiento preventivo: es llevar a cabo una inspección de todos los elementos de la red de distribución, mediante la planificación de diversas actividades de control que se aplican para prevenir el origen de roturas garantizando mayor vida útil del sistema.

[18] Lambert A., Myers S. & Trow S. (1998). "Managing water leakage". Economic and technical issues. Publicado y distribuido por Financial Times Energy. Gran Bretaña.

[23] Resumido de Rangel Ávila Humberto / Sanabria Clavijo William. "Renovación y rehabilitación de redes de distribución de agua potable y alcantarillado". CIACUA. Bogotá – Colombia.



2.2.3.2. Renovación de la infraestructura

La renovación de la infraestructura debe realizarse cuando un sistema de distribución de agua potable presenta una frecuente ocurrencia de nuevas fugas en un determinado sector, o cuando los diversos componentes de la red (tuberías, válvulas, llaves cortadoras, etc.) han cumplido con su tiempo de servicio.

El cambio de accesorios ya sean válvulas o llaves cortadoras no tiene mayor dificultad, se lo puede realizar mediante un programa de inspección visual a lo largo de toda la red con el objetivo de identificar aquellos que presenten daños y afecten al correcto funcionamiento de la red.

Los cambios a nivel de tuberías de distribución se los realiza en función del tipo de daño que presenten los ductos, es decir, si se presentan fisuras, rajaduras, o cualquier daño menor se realiza una rehabilitación y si el daño es mayor (tuberías reventadas o viejas) se ejecuta una renovación. ^[23]

2.2.3.2.1. Definición de renovación de tuberías

La renovación de tuberías de sistemas de distribución de agua potable es el proceso en el que se realiza un reemplazo total de los conductos cuando están en muy mal estado, se produjo un reventamiento, o se aumenta el diámetro debido al incremento de la demanda hidráulica de un determinado sector. ^[23]

2.2.3.2.2. Definición de rehabilitación de tuberías

La rehabilitación de tuberías de sistemas de distribución de agua potable es el proceso en el cual se mejora o se trata de recuperar las propiedades hidráulicas de los conductos mediante reparaciones en los lugares donde se originó la falla, la cual no destruye la tubería sino solo en el lugar donde se necesite hacer la reparación. ^[23]

2.2.3.2.3. Diferencias entre la renovación y la rehabilitación

Las principales diferencias entre la renovación y la rehabilitación de tuberías de sistemas de distribución son las siguientes: ^[23]

La renovación:

- ✓ Requiere la destrucción de la tubería existente.



- ✓ Se utiliza cuando el grado de deterioro de la tubería existente amerita su reemplazo.
- ✓ Aplicable cuando no es económica la frecuente reparación de la tubería existente.
- ✓ Es posible incrementar la sección transversal de la tubería.
- ✓ Reemplaza totalmente la vieja tubería.

La rehabilitación:

- ✓ No destruye la tubería existente.
- ✓ Se utiliza cuando la tubería existente no presenta un grado de deterioro considerable.
- ✓ Incrementa el tiempo de vida de la tubería existente.
- ✓ La sección de la tubería es disminuida.
- ✓ Mejora las características hidráulicas internas.

2.2.3.2.4. Factores que son considerados en la renovación y rehabilitación de tuberías en sistemas de distribución de agua potable

Al momento de tomar la decisión de renovar o rehabilitar tuberías de sistemas de distribución de agua se deben considerar algunos factores en función de la factibilidad que presentan cada una de estas en comparación con la tradicional apertura de zanja, entre los cuales se tiene: ^[13]

- ✓ **Costo:** las técnicas de renovación y rehabilitación ya sea rotura de tuberías por halado o empuje mediante equipos hidráulicos generan un costo menor frente al cambio de tubería con apertura de zanja. Se debe estimar que porcentaje representan los costos de renovar o rehabilitar frente a la apertura de zanja. ^[13]
- ✓ **Impacto Ambiental:** las técnicas de renovación y rehabilitación generan un menor impacto ambiental, es decir distorsionan en menor medida el entorno comparado con la apertura de zanja.

[13] Tomado de González Agustín. (2009). "REHABILITACIÓN". <http://www.grupoage.com/index.php?view=article&catid=37%3Aproblemas&id=70>.



En este sentido las técnicas sin apertura de zanja poseen una gran ventaja dentro de la zona urbana ya que no es necesario levantar el pavimento para realizar la reposición de las tuberías de distribución de agua, y por lo tanto se evita la contaminación y molestias como ruido, polvo, congestión vehicular. ^[13]

- ✓ **Fiabilidad:** dado que estas tecnologías no son muy conocidas dentro de las empresas operadoras de nuestro país, se desconoce el resultado del uso de las técnicas de renovación y rehabilitación a largo plazo, por lo que se debe estimar el tiempo de vida útil de la obra. ^[13]
- ✓ **Tiempo de ejecución:** el tiempo de ejecución de la obra es un factor determinante en un trabajo, ya que se ahorra dinero y se evita molestias a los usuarios. En la mayoría de los casos las técnicas de rehabilitación de tuberías ocupan un menor tiempo de ejecución en comparación con la tradicional apertura de zanja. ^[13]
- ✓ **Condicionantes técnicos:** cada trabajo de renovación y rehabilitación presenta algunos condicionantes técnicos concretos los cuales se deberán valorar adecuadamente como por ejemplo: existencia de acometidas, necesidad de incrementar diámetros, cumplimiento de los requerimientos sanitarios, etc. ^[13]

2.2.3.2.5. Ventajas que presenta la renovación y rehabilitación de tuberías de distribución sin apertura de zanja

Al ser metodologías el cual su objetivo es el de reducir el impacto ambiental, disminuir los costos de cambio o remplazo de tuberías, y disminuir el tiempo de reparación, presenta las siguientes ventajas: ^[23]

- ✓ Ahorros en el costo de instalación de hasta el 70.00 %, ya que no requiere de excavaciones excesivas, y por lo tanto el uso de poco material de relleno.
- ✓ Menor molestias a las personas en el momento que se está ejecutando una reparación, además de ello no es necesario interrumpir el tráfico vehicular para trabajar.
- ✓ Se disminuyen los daños a la carpeta asfáltica de las calles en donde se presenta el problema.
- ✓ Disminución del tiempo de ejecución de la reparación.



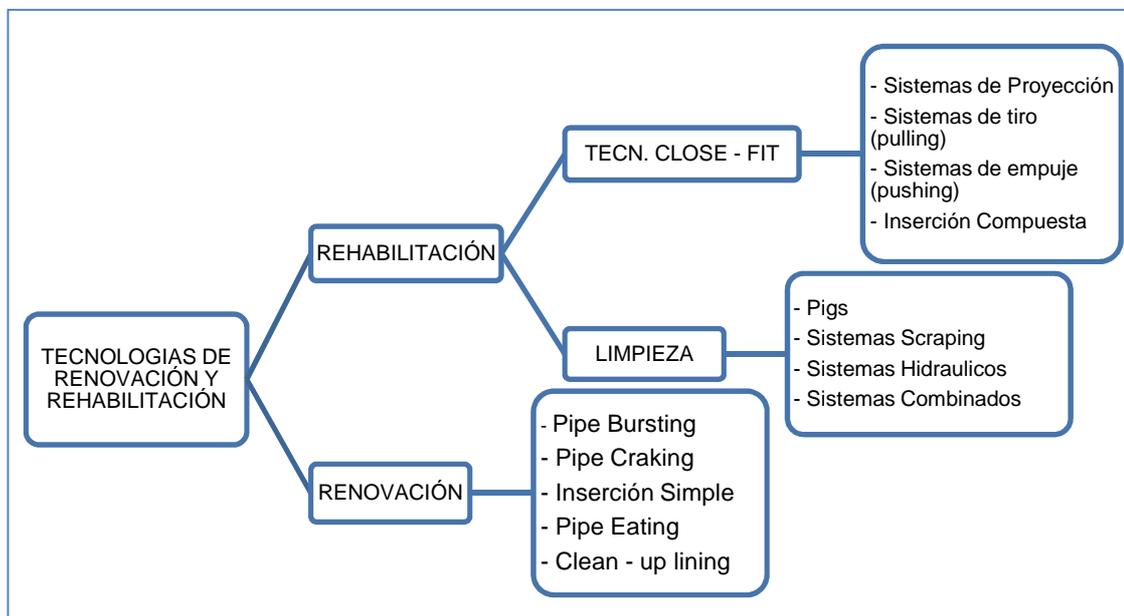
- ✓ No es necesario excavar a lo largo de toda la tubería, sino que solamente se hace calicatas al inicio y final del trayecto. [23]

2.2.3.2.6. Tecnologías aplicadas a la renovación y rehabilitación de tuberías en sistemas de agua potable y alcantarillado

Dentro de este tema se considera que las tecnologías sin apertura de zanja, son un conjunto de técnicas y métodos que se utilizan para reparar, rehabilitar, sustituir o instalar nuevas conducciones sin la necesidad de excavar zanjas, evitando afectar lo menos posible a infraestructuras existentes.

En el mercado existe gran variedad de tecnologías destinadas a la renovación o rehabilitación de tuberías, cada una de estas tecnologías posee características particulares y adecuadas según el tipo de material y características de la tubería, el lugar de instalación y otros factores.

Se debe tener bien claro que la renovación es un método destructivo y la rehabilitación es un método de mejoramiento, en este caso el presente trabajo abordara simplemente sobre tuberías existentes.



Esquema 2.3. Tecnologías de renovación y rehabilitación

Fuente: FUSIONSUDAMERICANA. www.fusionsudamericana.com

Las tecnologías que mejoran al sistema de distribución mediante la sustitución de tubería son conocidas como renovación, y a continuación se describe:



2.2.3.2.6.1. Pipe Bursting (Reventamiento)

El pipe bursting o reventamiento de tubería se lo denomina así porque mediante un cono de rotura y expansión se va rompiendo la antigua tubería, fragmentándola poco a poco y al mismo tiempo se instala la nueva tubería la cual esta sujeta a la parte trasera del cono, todo este mecanismo de halado se lo consigue con la ayuda de un equipo hidráulico, en donde se disponen de cables y barras de acero para introducir la nueva tubería, se utiliza como guía la antigua tubería. [25]

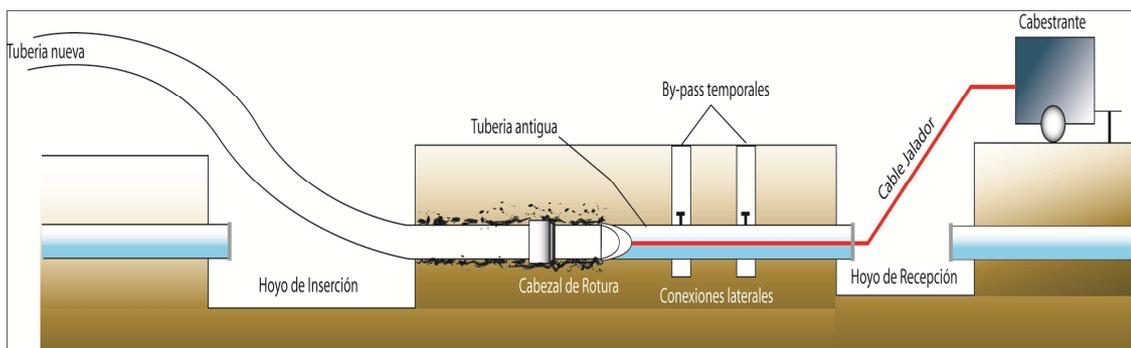


Gráfico 2.2. Operación típica de rotura de tubería

Fuente: Guidelines for Pipe Bursting. ERDC

A medida que va ingresando el cono de expansión se aumenta la sección de la antigua tubería, facilitando el ingreso de la tubería que se va a instalar, también se puede hacer uso de este procedimiento cuando se necesite aumentar el diámetro de la tubería el cual puede ser hasta un 50.00 % del diámetro de la tubería antigua, dependiendo del diámetro de los conductos se puede realizar la rotura de dos maneras:

Estática: en este procedimiento sólo se utiliza el equipo que hala la tubería, reemplazando la vieja tubería es aplicable solamente hasta diámetros de tubería de 200 mm (8 pulgadas), para la ejecución de este mecanismo se necesita que el equipo hidráulico lo realice de una manera lenta. [25]

Dinámica: mediante la ejecución de este procedimiento se pueden realizar cambios de tuberías de diámetros mayores a 200 mm (8 pulgadas) y que se encuentren enterradas a mayor profundidad como es el caso de tuberías de alcantarillado, por lo que se necesita que el equipo hidráulico realice el halado de una manera rápida es decir con una mayor fuerza, adicionalmente al equipo de halado se necesita de un equipo neumático que se une a la cabeza de expansión, la cual transmite energía cinética para fracturar la antigua tubería.



Aunque el método requiera de la apertura de dos zanjas para el ingreso y salida de la nueva tubería, sus dimensiones son pequeñas comparadas con las longitudes de instalación, siendo en promedio entre 2.00 y 3.00 m de longitud por 1.00 m de ancho.

[25]

Rangos de Aplicabilidad

La rotura de tubería se puede aplicar en diversos diámetros y material de conductos, en varios tipos de suelos y condiciones de sitio, los rangos típicos de tuberías que se pueden cambiar con esta metodología son desde 50 mm a 900 mm (2 – 35 pulgadas) aunque se puede extender hasta 1200 mm (47 pulgadas), el más común uso de este procedimiento es el de “size for size” (tamaño por tamaño), o el “upsizing” (aumento de tamaño) de tuberías existentes a 3 veces su diámetro, por ejemplo un cambio de una tubería con diámetro de 50 mm (2 pulgadas) a 160 mm (6 pulgadas). [25]

Pero realizar aumento de diámetros muy grandes, requiere de más energía y en consecuencia causa un mayor movimiento de tierra, por lo que la operación de reemplazo es más lenta y se necesita de una evaluación más cuidadosa.

En lo que se refiere a material de la tubería, es aplicable en tuberías que son de materiales quebradizos tales como el asbesto cemento y el PVC, esta metodología no es aplicable en tuberías de hierro dúctil, acero ya que para estos materiales se aplican otras metodologías. [25]

Ventajas y desventajas del método

Al hablar de ventajas se tiene que:

- ✓ Los rendimientos para la renovación son mayores.
- ✓ Las molestias a las personas disminuyen.
- ✓ Reducción de daños a tuberías adyacentes.
- ✓ Resulta más económico en el aspecto que se disminuyen gastos como excavaciones a lo largo de todo el tramo a reemplazar, rellenos, reconstrucción de calzada, etc.
- ✓ Menos contaminación (ruido, polvo, etc.).



Y las principales desventajas de este método son:

- ✓ Si existen cambios significativos de alineamientos en la tubería la metodología es obsoleta.
- ✓ Si las tuberías tienen colapsos en el trayecto, el cable de halado no puede pasar por lo que se debe excavar en el lugar que se presente el colapso.
- ✓ No es aconsejable realizarlo en suelos de consistencia dura, pues resultaría costoso.
- ✓ Las vibraciones del equipo neumático pueden afectar a las tuberías de otros servicios, provocando fisuras. ^[23]

2.2.3.2.6.2. Slipinning

Es una técnica de rehabilitación para reducir el diámetro de las tuberías de la red, esta técnica consiste en introducir la nueva tubería con diámetro menor a la de la tubería existente para lo cual se debe realizar dos calicatas en las cuales por él un lado es introducida la nueva tubería y al mismo tiempo por el otro lado será halada y acoplada a la tubería existente.

Una alternativa que se puede dar en el momento de empujar la nueva tubería es el uso de una retroexcavadora o en su defecto puede ser halada por un cabrestante el cual se debe ubicar o bien en una calicata de las hechas o en un boca de salida, es necesario el uso de una cabeza para jalar la tubería, o sino, se puede realizar cortes en el borde de la tubería para luego unirlos con cables y proceder a halar con el cabrestante o con la retroexcavadora. El rango de aplicabilidad se lo puede realizar en casi cualquier tipo de suelo, con esta metodología se puede realizar cambios de tuberías de diámetros de hasta 800 mm (32 pulgadas), el material en el cual se lo puede realizar es PVC o tuberías de polietileno. ^[21]

Ventajas y desventajas del método ^[21]

Este método tiene las ventajas de que:

- ✓ Los rendimientos para la rehabilitación son mayores, ya que al aplicar esta metodología no se necesita cambiar toda la tubería sino que se refuerza el tramo que presenta fallas.



- ✓ No necesita de equipo especializado para realizar la rehabilitación.
- ✓ Al no necesitar equipo dinámico para la instalación de la nueva tubería no genera daños adyacentes, además como la nueva tubería es de menor diámetro no comprime el suelo circundante.

Las principales desventajas que presenta este método son que:

- ✓ No es aconsejable en diámetros pequeños de tuberías.
- ✓ Como se trata de una reducción de diámetro se debe realizar un análisis de capacidad de flujo.

2.2.3.2.6.3. Sistemas de limpieza ^[12]

Los sistemas de limpieza de tuberías están diseñados para utilizarse tanto con la finalidad de limpieza propiamente dicha o también pueden ser el primer proceso antes de realizar una renovación o rehabilitación, los sistemas de limpieza son de propulsión hidráulica con un tapón denominado pig compuesto de un dispositivo de goma poliuretánica, y otra variedad de métodos mecánicos denominados scrapers o raspadores.

Tapones o piggs

Tienen forma de bala y están diseñados para ser impulsados por presión hidráulica, constan de varios recubrimientos exteriores y de diferentes densidades de compuesto esto con el propósito de permitir desde una limpieza ligera superficial hasta la remoción de incrustaciones duras. Por lo general existen cuatro tipos de tapones, piggs simples o desnudos, piggs revestidos, y dos tipos de piggs abrasivos, la mayoría de ellos tienen una densidad de 32, 96 o 128 Kg/m³, estos dispositivos pueden ser utilizados para limpiar tuberías de diámetros desde 50.00 mm hasta tuberías de 1.80 m de diámetro.

Proceso de operación

Los fabricantes recomiendan utilizar un método progresivo en el cual los depósitos son gradualmente removidos por pasadas con piggs más largos, el procedimiento de realizar la limpieza es:



- ✓ Excavación de los sitios de lanzamiento y recepción de los dispositivos.
- ✓ Se lanza un primer tapón de medida plana, el cual podría ser un swab, para determinar la dirección del flujo y chequear interferencias que podrían causar problemas durante las pasadas de limpieza.

Los lanzadores que se utilizan sobre las líneas de transmisión deben ser limpiados y controlados periódicamente en tubos de diámetros de 150.00 mm los pigg se pueden lanzar y recuperar utilizando la fuerza del agua de un hidrante.

- ✓ Lanzamiento de un squeegee pig para determinar el verdadero diámetro abierto. Para esto, se debe tomar la medida del squeegee a la salida del tubo, para determinar la medida del primer pig de limpieza.
- ✓ Lanzamiento del primer pig de limpieza, el cual se debe revestir y calibrar al diámetro del squeegee anterior. Normalmente se inserta un swab detrás de éste para asegurar el sello hidráulico durante la corrida.

Es recomendable la repetición de este proceso hasta que el pig salga del tubo en condiciones de ser re-utilizado. Para lograr una limpieza óptima, debe mantenerse la velocidad entre 0.60 y 1.50 metros por segundo (2.2 y 5.4 km/h).

- ✓ Realizar corridas progresivas de pigs revestidos, hasta que el diámetro del pig que se introduce sea igual al diámetro interior del tubo a limpiarse, un incremento de 25.00 mm por pasada es normal, pero si la tubería se encuentra severamente incrustada, este incremento no debería superar los 12.00 mm.

En tubos con alta acumulación de residuos, las dos o tres últimas pasadas pueden hacerse con pigs raspadores, pero nunca con más de dos cerdas de acero en la última pasada.

- ✓ Realizar una pasada final con un swab de medida plena para eliminar todo residuo remanente.
- ✓ Desinfectar la tubería después que todas las pasadas de limpieza se hayan completado.

[12] Resumido de FUSIONSUDAMERICANA SA. Nota Técnica N° 154 "Sistemas de limpieza utilizados previo al proceso de recubrimiento". Buenos Aires – Argentina. www.fusionsudamericana.com



Algunos de modelos de piggs son los que se muestran en la siguiente imagen.



Imagen 2.7. Modelos de piggs más usuales

Fuente: FUSIONSUDAMERICANA. www.fusionsudamericana.com

Scrapers o dispositivos raspadores

Los scrapers o raspadores son dispositivos mecánicos equipados con una serie de resortes pre-tensionados que actúan sobre cuchillas metálicas y que se mueven dentro y a través de las tuberías de variadas maneras.

Los raspadores pueden ser físicamente empujados o traccionados a través del tubo o pueden ser propulsados utilizando presión de agua de la misma manera que los piggs de poliuretano.

Los scrapers son más costosos, pero están en condiciones de efectuar limpiezas completas en líneas bloqueadas y remover las incrustaciones más duras. Son usualmente empleados como apoyo y parte de un proyecto de renovación, y no como una solución en sí misma. ^[12]

CAPÍTULO III

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS DE FLUJOS MÍNIMOS NOCTURNOS



3.1. ANÁLISIS DE FLUJOS MÍNIMOS NOCTURNOS (AFMN) – DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Para aplicar la metodología AFMN, se utilizó información brindada por el director del presente proyecto, se mantendrá en anonimato el nombre de la ciudad a la cual pertenecen los datos, por cláusulas legales en los convenios que mantiene la Universidad, para este efecto.

El sector que se va a evaluar tiene un área de 101924 Ha, consta de 832 usuarios de los cuales 550 usuarios son no-domésticos y 282 son domésticos con consumo nocturno, el número de conexiones domiciliarias o acometidas es de 3494, la longitud promedio de acometida es de 8.00 m, esta longitud se considera desde la tubería principal hasta la caja de medidor.

La longitud total de la red de distribución es de 9.70 km con un caudal medio de 12.15 l/s. el período de estudio será el mes de Diciembre, durante el cual se registró un volumen de distribución de 31182 m³ y se facturó un volumen de 15111 m³

El tiempo de registro de datos (caudal y presión) con los que se aplica la metodología AFMN es de 13 días.

En el siguiente cuadro se resume los datos del sector que va a ser analizado:

Cuadro 3.1. Información del sector A-1

<i>Información básica del sector en estudio</i>	
Identificación:	Sector A-1
Área :	101924 Ha
Usuarios :	832
Número de conexiones (acometidas) :	3494
Longitud total de la red :	9.7 Km
Longitud promedio acometida :	8 m
Periodo de estudio :	Diciembre / 09
Días de registro de datos :	13 días
Volumen distribuido en período :	31182 m ³
Volumen facturado en período :	14111 m ³

Fuente: El autor

3.2. REGISTRO DE DATOS – TABULACIÓN

El registro de datos (caudal y presión) se lo realizó durante 15 días, los equipos se disponen de la siguiente manera: caudalímetro ultrasónico se instaló en la salida del



tanque de distribución y los data logger se los ubicó en la parte alta, media y baja de la red de distribución, el intervalo de tiempo en el cual los equipos registran datos es de 15 min, luego de terminado el tiempo de registro de datos de caudal y presión se descarga la información obtenida para tabular y analizar los datos de caudal y presión.

Utilizando el formato del Anexo 1 se ingresan y ordenan los datos de caudal y presión, por facilidad de manejo e interpretación de la información se agrupa datos de dos días, a continuación se presenta un fragmento de los datos ya ordenados y listos para su análisis.

En la misma hoja se observa que los datos de los días que se utilizan para aplicar la metodología AFMN es de 13 días; los dos días que no se consideran se obvian del análisis debido a que en ellos se han presentado eventualidades (cortes de servicio) que afectan las lecturas tanto del caudalímetro como de los data logger.

ANEXO 1 - FORMATO PARA REGISTRO DE DATOS CAUDAL Y PRESIÓN							
Fecha	Hora	Caudal (l/s)	Presiones (m.c.a)				
			P(ZA)	P(ZM)	P(ZM)	P(ZA)	P promedio
23/12/2009	0:00	7.41	27	41	53	80	50
23/12/2009	0:15	7.02	27	42	53	81	51
23/12/2009	0:30	6.99	27	42	54	81	51
23/12/2009	0:45	6.97	27	42	54	81	51
23/12/2009	1:00	7.07	27	42	53	81	51
23/12/2009	1:15	6.82	27	42	54	81	51
23/12/2009	1:30	6.87	27	42	54	81	51
23/12/2009	1:45	6.84	27	42	54	81	51
23/12/2009	2:00	6.88	27	42	54	81	51
23/12/2009	2:15	6.81	27	42	54	81	51
23/12/2009	2:30	6.78	27	42	54	81	51
23/12/2009	2:45	6.94	27	42	54	81	51
23/12/2009	3:00	6.99	27	42	53	80	51
23/12/2009	3:15	7.00	27	42	53	81	51
23/12/2009	3:30	6.98	27	42	53	81	51
23/12/2009	3:45	6.94	27	42	54	81	51
23/12/2009	4:00	6.93	27	42	54	81	51

Tabla 3.1. Tabulación de datos de caudal y presión del sector A-1

Fuente: El Autor

Primeramente se analiza el caudal, en el gráfico 3.1., se muestra la variación de caudal durante el tiempo que se registró los datos, se identifica que el máximo caudal que ocurre es de 21.10 l/s, y se tiene un caudal promedio de 12.00 l/s, como lo que interesa en esta metodología es identificar el QMN que ocurre en horas de la madrugada, observamos que el QMN es de 6.27 l/s.

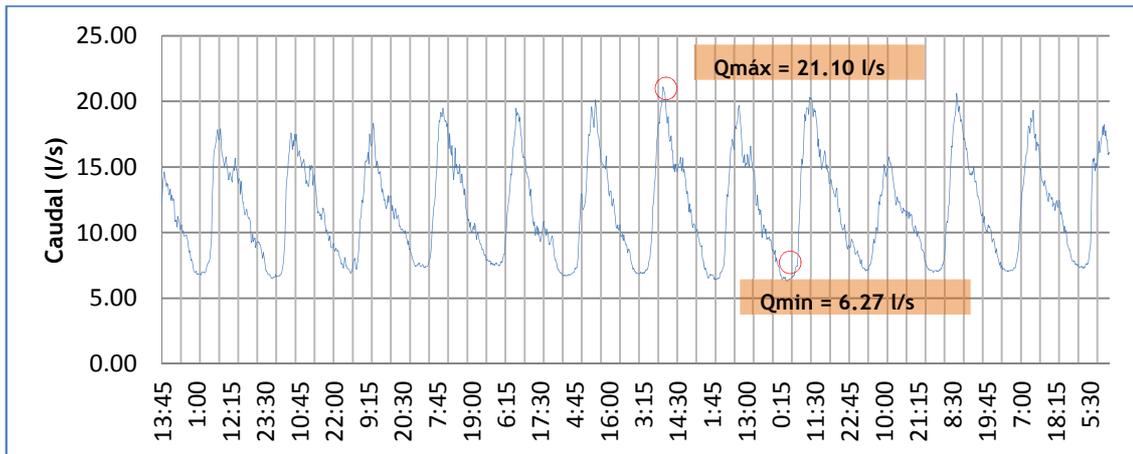


Gráfico 3.1. Caudal a la salida del tanque del sector A-1

Fuente: El Autor

De la misma forma que el caudal, graficamos las presiones promedio (grafico 3.2.) (se promedian todos los valores de presión que se registran) como se explicó anteriormente que el caudal está influenciado directamente con la presión se observa que cuando ocurre el QMN la presión del sistema es la máxima con un valor de 52 m c.a. esto se atribuye a la disminución de los consumos, de igual forma si el caudal es máximo la presión disminuirá hasta los 21 m c.a. por las razones indicadas.

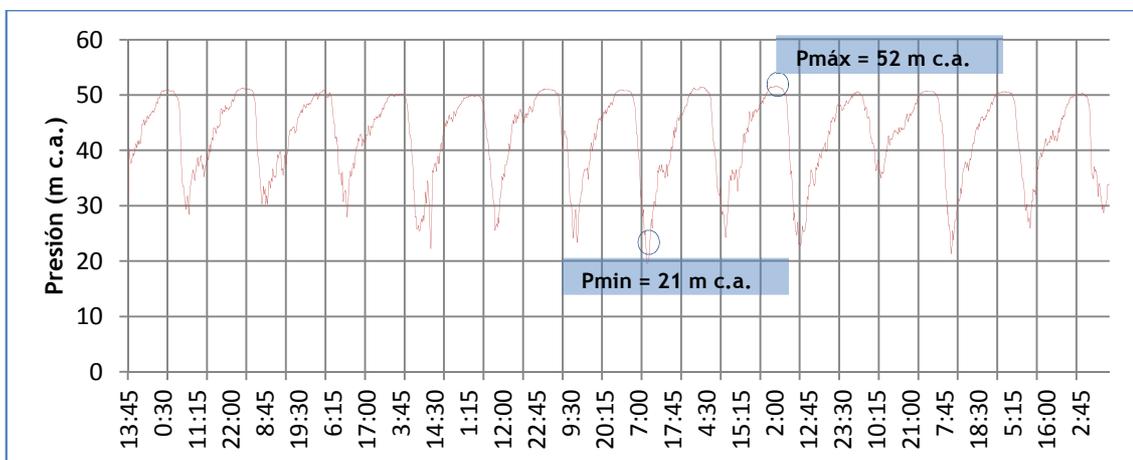


Gráfico 3.2. Presiones promedio del sector A-1

Fuente: El Autor

3.3. EXTRAPOLACIÓN DE CAUDALES DE FUGA

De los datos de caudal que se registran se determina el QMN el mismo que se presenta a las 02h30 de la madrugada, por lo tanto la presión que se genera en ese instante en la red es la máxima. Como la presión afecta de forma directa la magnitud del caudal es de gran importancia conocer la variación del caudal de fuga a lo largo de un período de tiempo.



Por lo que se extrapolan los caudales de fuga mediante la ecuación 3 cambiando los valores del exponente N_1 , en el Anexo 2 se presenta en detalle. Para el presente caso se optó por incrementar valores de 0.02 (1, 1.02, 1.04,... etc.), esto se lo realiza con el propósito de conocer en qué forma varían dichos caudales al aumentar el valor del exponente.

Para una mejor explicación se tomará como ejemplo un dato para realizar el cálculo respectivo:

t (h)	Pmed (m c.a.)	QMN (l/s)	Pmáx. (m c.a.)
13h45	31	6.27	52

Ahora bien, como se conoce el valor del QMN, y la presión a la cual ocurre este caudal que es la máxima que se presenta en el sistema, se extrapola un caudal de fuga para una presión de 31 m c.a. en el instante t, con un valor de exponente $N_1= 1$:

$$Q_{fugas(t)} = Q_{f(t_{QMN})} \times \left(\frac{P_t}{P_{(t_{QMN})}} \right)^{N_1}$$

$$Q_{fugas(t)} = 6.27 \frac{l}{s} \times \left(\frac{31 \text{ m c. a.}}{52 \text{ m c. a.}} \right)^1$$

$$Q_{fugas(t)} = 3.80 \text{ l/s}$$

Extrapolación de caudal con $N_1= 1.15$

$$Q_{fugas(t)} = 6.27 \frac{l}{s} \times \left(\frac{31 \text{ m c. a.}}{52 \text{ m c. a.}} \right)^{1.15}$$

$$Q_{fugas(t)} = 3.52 \text{ l/s}$$

Como podemos observar si el valor del exponente N_1 aumenta, el caudal de fuga disminuye es por ello que se aconseja determinar valores de fuga para distintos valores del exponente y luego promediarlos, así se analizará de mejor forma los datos y se llegará a un resultado fiable.

Luego de que se obtiene varios valores de caudales de fuga, se determina que caudal del registrado es en realidad el que se entrega al usuario, para lo cual se realiza la diferencia entre el caudal medido y el caudal de fuga en el mismo tiempo (t) por ejemplo, siguiendo con los datos anteriores se tiene un $Q = 12.22 \text{ l/s}$ y determinamos un $Q_f = 3.67 \text{ l/s}$ (promedio), entonces tendremos que el caudal entregado al usuario es



de $Q_{ent} = 8.55$ l/s; de la misma forma para el resto de datos, para interpretar mejor se grafica tanto el caudal registrado (Q_{reg}), entregado (Q_{ent}), y fugado (Q_f).

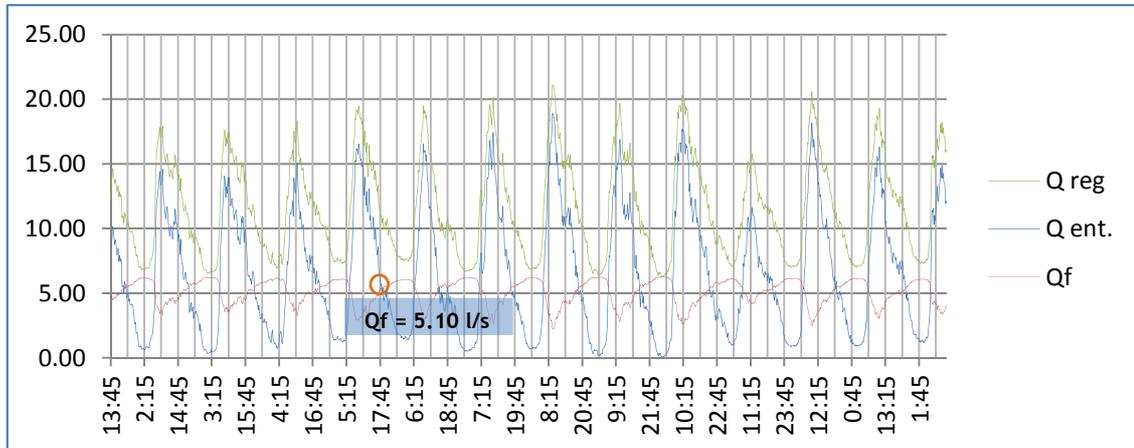


Gráfico 3.3. Evolución de caudales registrados, entregados y fugados del sector A-1

Fuente: El Autor

En el sector A-1 se determinó un $Q_f = 5.10$ l/s, este caudal se compara con el caudal determinado por fugas latentes, luego de ello se podrá decidir si existe un nivel de fugas importantes en el sistema de distribución.

3.4. ANÁLISIS DE LOS CONSUMOS GENERADOS EN EL SECTOR

Se logra mediante la evaluación de fugas mediante caudales inyectados, es un análisis en el cual se examina que porción del caudal que ingresa a un sector se le atribuye a fugas y que porción es la que se entrega a los usuarios, para lograrlo se analiza en dos partes: primeramente se estima el caudal que reciben los usuarios o consumidores ya sean domésticos o no-domésticos, además se tiene que evaluar aquellos consumos que son autorizados pero no son cobrados por la entidad (mantenimiento, bomberos, parques, etc.).

Como una segunda parte de la evaluación de las fugas, se debe estimar las fugas latentes en función del estado en que se encuentra la infraestructura de la red, es decir, tuberías y acometidas (conexiones domiciliarias), Lambert y Hirner (2000) denominan a este tipo de fugas como UARL (unavoidable average real losses) por tener un caudal muy bajo son difíciles de detectar por lo que se establece como el caudal mínimo inevitable que se presenta en la red de distribución, en el Anexo 3 se muestra en resumen este análisis.

Para determinar el caudal que se entrega a los usuarios se debe determinar que usuarios tienen consumos nocturnos mayores a 500 l/h tanto domésticos como no –



domésticos, existentes en el sector, en este caso se tiene un número de 550 usuarios no – domésticos, los cuales comprenden empresas, consumos en domicilios en horas de la noche, u otro tipo de consumo que ocurra en la noche.

Ahora se debe estimar el consumo doméstico nocturno, partiendo de la afirmación propuesta en “Managing leakage” el cual atribuye un valor de 1.7 l/viv/h en función de las viviendas o puntos de conexión y un 0.6 l/hab/h cuando se cuente con el número de habitantes del sector, partiendo de esta afirmación se estima el consumo doméstico nocturno, para ello se multiplica el número de viviendas por el coeficiente dado.

Como se tienen 832 usuarios en el sector A-1, equivale a considerar que son 832 viviendas; por lo tanto la estimación del consumo doméstico nocturno se obtendrá:

$$Est. cons. dom. noct. = 1.7l/viv/h \times 832 viviendas$$

$$Est. cons. dom. noct. = 1414.4 l/h$$

También se debe estimar el consumo no – doméstico nocturno de la misma forma el “Managing leakage” propone un valor de 8 l/usuario/h, estos consumos comprenden a usos no intencionados o que no se facturan, en el sector A-1 no se tiene estos consumos por lo que no se considera para el análisis, finalmente para determinar los consumos en el sector se debe sumar todos los consumos existentes en el sector, entonces: ^[1]

$$CONSUMOS = \left(Cons. > 500 \frac{l}{h} \right) + (Cons. domestico noct.) + (Cons. no – domestico noct.)$$

$$CONSUMO = 550 l/h + 1414.4l/h$$

$$CONSUMO = 1964.4 l/h$$

Determinado el consumo que existe en el sector, el siguiente paso es el de determinar las fugas latentes, en el “Managing leakage” propone una ecuación en la cual los valores de los factores F y G varían en función del estado de la red de distribución y de las acometidas, el sector A-1 está catalogado en un estado medio por lo que los valores de F y G serán de 4 l/viv/h y 40 l/Km/h, respectivamente, con estos valores y con datos de la red como la longitud de la misma y el número de acometidas existentes en el sistema se calculara las fugas latentes, se tiene: ^[1]

$$Q_{fugaslatentes} = F \times N_c + G \times L_m$$



$$Q_{fugaslatentes} = ((4 \text{ l/viv/h}) \times (832)) + ((40 \text{ l/Km/h}) \times (9.67 \text{ Km}))$$

$$Q_{fugaslatentes} = 3714.89 \text{ l/h}$$

Como la presión es un factor importante en el sistema, ya que influye directamente en los valores de los caudales mínimos nocturnos (QMN), se trata de minimizar el efecto de la misma. Por lo cual se debe corregir el valor de fugas latentes a través del FCP (factor corrector de presión) el “Managing leakage” presenta un cuadro con valores estándar de FCP a una presión de 50 m c.a. (cuadro 2.4.), para el presente caso de estudio la presión media nocturna del sistema de distribución es de 43 m c.a., por lo que se ha estandarizado los valores para una presión de 40 m c.a., luego de ello se realiza una regla de tres para poder obtener el valor exacto de FCP para la presión que se tiene.

El procedimiento para conseguir los nuevos valores de FCP es sencillo, basta con dividir el FCP de la presión que se desea estandarizar para cada uno de los factores de las diferentes presiones, en el ejemplo se detalla lo expuesto, en el cuadro 2.5. se muestran los nuevos valores de FCP para la presión de 40 m c.a.

$$\text{FCP (15 m c.a.)} = 0.238$$

$$\text{FCP (40 m c.a.)} = 0.753$$

$$\text{FCP (estandarizar a 40 m c.a.)} = 0.238 / 0.753$$

$$\text{FCP (estandarizar a 40 m c.a.)} = 0.316$$

En el presente análisis se consideró el uso de FCP obtenido de la tabla para una presión de 50 m c.a. y se calculó una nueva tabla de valores de FCP para una presión de 40 m c.a., esto con el propósito de poder comparar ambos valores y considerar cuál de los resultados da un caudal corregido mayor es decir:

Si se determina el FCP en la tabla para una presión de 50 m c.a. se obtiene:

$$\text{FCP (43 m c.a.)} = 0.83$$

Ahora si se considera la tabla para una presión de 40 m c.a. el valor de FCP es:

$$\text{FCP (43 m c.a.)} = 1.10$$

De los dos valores se utiliza el mayor ya que este provoca que el caudal corregido sea mayor, entonces:



Caudal fugas latentes ($Q_{\text{fugaslat.}}$)	Presión media nocturna (m c.a.)	FCP
3714.89	43	1.10

$$Q_{\text{CORREGIDO}} = Q_{\text{FUGASLATENTES}} * FCP$$

$$Q_{\text{CORREGIDO}} = 3714.89 \text{ l/h} * (1.10)$$

$$Q_{\text{CORREGIDO}} = 4080.46 \text{ l/h}$$

Finalmente para determinar el caudal nocturno inevitable se debe sumar a los consumos el valor de las fugas latentes, este valor será de referencia el cual indicará la existencia de fugas en el sistema ya que si el valor que se registró (caudalímetro) o el que se calculó (extrapolación de caudales de fuga), es superior al mínimo inevitable, indica que en el sistema existen fugas y se deberá investigar la causa de ello.

De lo anterior mencionado se tiene que:

$$QMN_{\text{INEVITABLE}} = \text{Consumos} + \text{Fugas Latentes}(\text{corregido})$$

$$QMN_{\text{INEVITABLE}} = 1964.4 \text{ l/h} + 4080.46 \text{ l/h}$$

$$QMN_{\text{INEVITABLE}} = 6044.86 \text{ l/h}$$

$$QMN_{\text{INEVITABLE}} = 1.68 \text{ l/s}$$

Como parte final del análisis se realiza una resta entre el QMN medido y el QMN inevitable, la cual si el resultado es positivo significa que en el sistema de distribución existen roturas no detectadas, mala estimación del caudal que utilizan los grandes consumidores o a una mala estimación del estado de la infraestructura, adicionalmente a esto se debe investigar algunos consumos importantes que no se consideran; ahora si por el contrario el resultado de la operación es negativo no es necesario realizar acciones complementarias debido a que el caudal que fuga es menor y resulta difícil poder detectarlo.

3.5. ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS TÉCNICAS, CÁLCULO DE LOS DIFERENTES ÍNDICES PARA LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Anteriormente se determinó que los diferentes índices ya sean el IFE, ICONOD, IANC, son valores de comparación con otros sistemas, y el cálculo de los mismos determinarán el estado de la red, existencia de fugas en la red, condiciones de operación, etc.



- ✓ Como un primer indicador se calcula el índice de fugas estructurales (IFE), el cual nos revela la eficiencia física del sistema, esto en función de longitud de la red, número de conexiones, longitud promedio desde la tubería hasta el punto de conexión de la acometida, presión del sistema, como se sabe que el IFE es la relación entre el CARL (current anual real losses o volumen incontrolado fugado) y el UARL (unavoidable anual real losses o umbral mínimo de fugas), se determinara como un primer paso el valor de cada uno de estos términos:

Para determinar el CARL o Volumen incontrolado fugado (VIF), se debe considerar el caudal incontrolado fugado y el número de acometidas existentes en el sector, además los días en los cuales se está realizando el análisis.

$$Q_{if} = \text{Volumen inyectado} - \text{Volumen facturado} \quad [\text{Ec. 15}]$$

Entonces:

$$VIF = \frac{Q_{if}}{N_a \times d} \quad [\text{Ec. 16}]$$

Se calcula un $Q_{if} = 16071 \text{ m}^3$, en un tiempo de registro de datos de 13 días, y el número de acometidas es de 832, por lo tanto se tiene un valor de $VIF = 1485.85 \text{ l/acometida/día}$

Ahora el valor del umbral mínimo de fugas (UARL), el cual se le atribuyen a las fugas de fondo se determina considerando la longitud de las tuberías de distribución, la longitud de acometidas, el número de acometidas y la presión del sistema de distribución, el valor de este término se calcula:

$$UARL = \frac{(18 \times L_m + 0.80 \times N_a + 25 \times L_p) \times P}{N_a}$$

Con la información del sector mostrada en el cuadro 3.1., se determina el valor de $UARL = 52.02 \text{ l/acometida/día}$. Conocidos los dos términos se determinara el valor del IFE, por lo tanto:



$$IFE = \frac{CARL}{UARL}$$

$$IFE = \frac{1485.85 \text{ l/acometida/día}}{52.02 \text{ l/acometida/día}}$$

$$IFE = 29$$

Una vez que se determina un $IFE = 29$, se compara con la matriz de evaluación de pérdidas físicas (cuadro 2.4.) se llega al resultado de que el sector A-1 se encuentra catalogado en una categoría D, esto quiere decir que el uso de los recursos es ineficiente, y por lo tanto se tiene que instaurar programas de reducción de pérdidas de forma inmediata.

- ✓ Otro indicador a evaluar será el índice de agua no contabilizada (IANC), el cual es un índice porcentual y servirá para diagnosticar la eficiencia general de la entidad operadora. Para su cálculo se involucra el volumen facturado y el volumen inyectado al sistema de distribución, el sector A-1 presenta los siguientes registros de volúmenes durante el mes de diciembre entonces se tiene que:

Mes de registro	Vol. inyectado (Wi)	Vol. facturado (Wf)
Diciembre	31182 m ³	15111 m ³

$$IANC(\%) = \left(1 - \frac{W_f}{W_i}\right) \times 100$$

$$IANC(\%) = \left(1 - \frac{15111}{31182}\right) \times 100$$

$$IANC(\%) = 51.54 \%$$

En el siguiente gráfico se muestra la variación de este índice durante el período octubre – diciembre/2009, en el cual se puede observar variaciones considerables durante estos meses de registro.

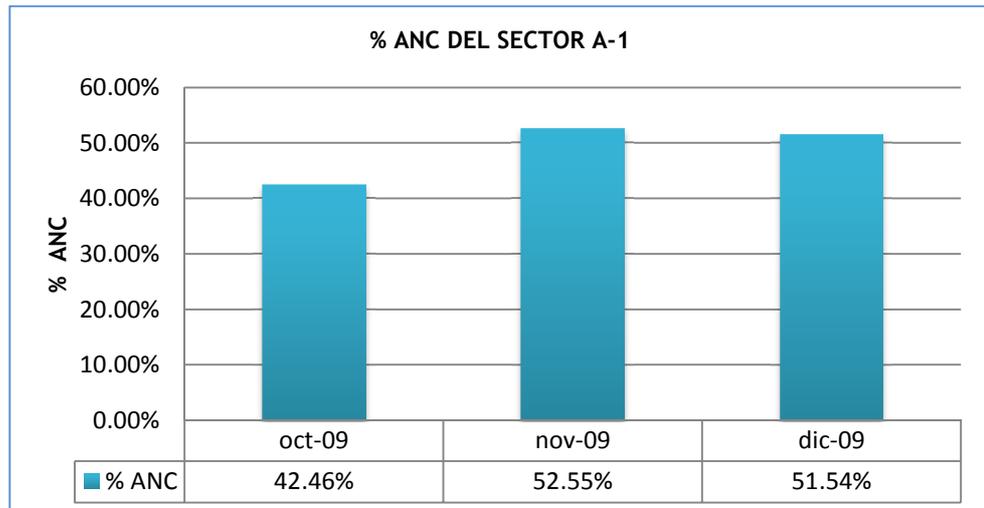


Gráfico 3.1. %ANC DEL SECTOR A-1 PERIODO 0CT 09/DIC 09

Fuente: El Autor

Los sistemas con un índice de agua no contabilizada del 10.00 % incluso hasta 20.00 % son considerados como eficientes, se considera que el límite superior aceptable es de 25.00 % (valor indicado por el Banco Mundial), índices superiores a este valor son indicadores de una deficiente gestión operativa y comercial dentro de la entidad encargada. ^[29]

Pero no se puede fiar totalmente de este resultado ya que para el cálculo de este indicador solamente se basa en valores estimados y muchas de las veces no se considera algunos consumos que ocurren en el sistema de distribución (consumos no autorizados).

- ✓ **Índices de consumo:** mediante los cuales se puede revelar de una manera anticipada el estado de la red de distribución mediante valores orientadores, para su cálculo se debe considerar los consumos horarios (datos registrados con caudalímetro) que se generan en la red de distribución durante un día (24 horas). Los coeficientes de consumo que se utilizan en la evaluación del estado en que se encuentra un sistema de distribución son: ^[2]

Índice de consumo máximo horario (ICMH), que relaciona el consumo máximo que se presenta en una hora (CHM), y el consumo horario promedio (CHP). Para determinar el CHP se debe dividir los consumos que se registran en un día para las 24 horas que tienen un día.



$$CHP = \frac{CT}{24 \text{ horas}} \quad [\text{Ec. 17}]$$

$$ICMH = \frac{CHM}{CHP} \quad [\text{Ec. 18}]$$

Índice de Consumo Mínimo Nocturno (ICMN), este índice se lo considera para zonas residenciales e involucra el consumo mínimo nocturno que se produce en el lapso de una hora y el consumo horario promedio. ^[1]

$$ICMN = \frac{CMN}{CHP} \quad [\text{Ec. 19}]$$

Índice de Consumo Horario (ICH), resulta de dividir el consumo horario máximo para el consumo mínimo nocturno registrado en una hora

$$ICH = \frac{CHM}{CMN} \quad [\text{Ec. 20}]$$

Con los datos registrados del sector A-1 pertenecientes a un día (se considera el día en el cual se registra el QMN) se analizan cada uno de los índices antes mencionados, entonces se tiene que:

Consumos del sector A-1 del 31 de Diciembre de 2009		
Consumo total de 1 día	Consumo horario máx.	Consumo min. nocturno
CT = 4334.00 m ³ /h	CHM = 356.65 m ³ /h	CMN = 114.41 m ³ /h

Una vez que se conocen los consumos en el sector se determinan los índices utilizados en la gestión activa de fugas, para evaluar el estado de la red de distribución y saber de manera instantánea la existencia de fugas, por lo que:

Se debe obtener el valor del consumo horario promedio, entonces:

$$CHP = \frac{CT}{24 \text{ horas}}$$

$$CHP = \frac{4334.00 \text{ m}^3/\text{h}}{24 \text{ horas}}$$

$$CHP = 180.58 \text{ m}^3/\text{h}$$



Conocido el consumo promedio y el consumo máximo horario registrado en un día, se obtiene el índice de consumo horario máximo.

$$ICMH = \frac{CHM}{CHP}$$

$$ICMH = \frac{356.65 \text{ m}^3/\text{h}}{180.58 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$ICMH = 1.97$$

Este valor es superior al de referencia del país de México (ICMH = 1.55).

Como el sector A-1 es zona residencial se desea conocer el índice de consumo mínimo nocturno, para luego poder compararlo con los valores recomendados.

$$ICMN = \frac{CMN}{CHP}$$

$$ICMN = \frac{114.41 \text{ m}^3/\text{h}}{180.58 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$ICMN = 0.63$$

El valor de referencia para el ICMN es de 0.4, valores superiores indican la presencia de fugas en la red de distribución, la AWWA recomienda un valor de 0.35.

Si se observa el valor obtenido para el sector A-1 se determina que está por arriba del límite; el índice para el sector en estudio es de ICMN = 0.63 y es superior los valores de referencia por lo que se debe considerar que dentro del sistema hay fugas de agua.

Se calcula el índice de consumo horario del sector A-1 con el propósito de establecer el nivel de fugas existentes dentro de la red de distribución, entonces:

$$ICH = \frac{CHM}{CMN}$$



$$ICH = \frac{356.65 \text{ m}^3/\text{h}}{114.41 \text{ m}^3/\text{h}}$$

$$ICH = 3.12$$

El valor de 3.12 se lo compara con los valores de referencia y se determina que está entre los valores de 3 a 7, esto indica un bajo nivel de fugas que por el hecho de ser menores no significa que no se las deba localizar y reparar.

Este índice al no considerar las presiones para su cálculo, no permite decidir si para mejorar el estado de la red se debe establecer un control de presiones, si analizamos comparativamente el índice de consumo horario (ICH) con el índice de fugas estructurales (IFE), se tiene una contradicción entre los dos, es así que, el valor del IFE describió a la red como ineficiente es decir que el sector A-1 tiene muchas fugas y se debe desarrollar programas de control de pérdidas, mientras que el ICH indica un nivel bajo de fugas.

Se debe tener muy en cuenta que para el cálculo del IFE se implica la infraestructura de la red, es decir involucra longitud de la red, longitud de acometidas, cantidad de acometidas, volumen de agua que ingresa al sistema y el volumen de agua que es facturada, mientras que el ICH solamente se basa en consumos que se generan en la red dejando fuera muchos otros parámetros importantes que al no considerarlos este índice se vuelve en algo poco confiable.

- ✓ **Índice lineal de fugas o Consumo Específico Nocturno (CEN):** el cual relaciona el consumo mínimo nocturno registrado y la longitud de la red expresada en km, pero para realizar el análisis se debe comparar el valor del CEN frente a un consumo específico límite nocturno (CELN), con el objetivo de detectar la presencia de fugas, ya que si el valor del CEN es superior al CELN, se debe realizar acciones complementarias como la localización y reparación.

De lo expuesto anterior se procede a calcular el valor del CEN y CELN para luego compararlos y determinar si existe o no fugas en el sistema, entonces:



$$CEN = \frac{CMN}{L}$$

$$CEN = \frac{31.78 \text{ l/s}}{9.7 \text{ Km}}$$

$$CEN = 3.30 \text{ l/s/km}$$

Para el cálculo del CELN, se considera un porcentaje esperado de entrega a los usuarios (E) el cual si no se tiene la suficiente información del sector no se lo puede determinar, por lo que se adopta un 70.00 %, en el caso de que exista almacenamiento domiciliar, entonces se tiene que:

$$CELN = \frac{E \times CMN}{100 \times L}$$

$$CELN = \frac{70 \times 31.78 \text{ l/s}}{100 \times 9.7 \text{ km}}$$

$$CELN = 2.30 \text{ l/s/km}$$

Se tiene que el $CEN > CELN$, por lo tanto indica que en el sector se debe inspeccionar el porqué de consumos elevados, si se debe a fugas en la red, fugas en las acometidas, fugas de pequeño y gran caudal, etc.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS



4.1. EVALUACIÓN DE DATOS REGISTRADOS

Los datos del sector A-1 que se registraron durante el período de 15 días, se analizan de tal forma que se tenga que considerar 5 días de menor consumo y 2 días de mayor consumo; con la finalidad de poder establecer una matriz comparativa de resultados, aplicando el AFMN y evaluando los diferentes índices de pérdidas, en los siguientes cuadros muestra los días a considerar para ser evaluados.

Cuadro 4.1. Días de menor consumo del sector A-1

Fecha	Hora	QMN (l/s)	Pmáx. (m c.a.)
23/12/2009	2:30	6.78	51
28/12/2009	2:00	6.70	51
24/12/2009	2:00	6.52	51
30/12/2009	3:00	6.41	51
31/12/2009	2:30	6.27	52

Fuente: El Autor

Como se puede observar en el cuadro anterior, todos los consumos de menor caudal se presentan en horas de la madrugada oscilando los mismos entre la 01h00 y 03h00. Se ha incluido el día en el que se presenta el menor consumo de todo el sector A-1 y se puede apreciar que la presión que se presenta en la hora del menor consumo incrementa su magnitud.

Cuadro 4.2. Días de mayor consumo del sector A-1

Fecha	Hora	QMN (l/s)	Pmáx. (m c.a.)
29/12/2009	9:45	21.10	51
02/01/2010	10:00	20.60	51

Fuente: El Autor

En el cuadro anterior se exponen los consumos de mayor caudal del sector A-1.

4.2. ANÁLISIS DE DATOS APLICANDO EL AFMN

Una vez identificados los días con menor consumo y días con mayor consumo en el sector A-1 se debe determinar que parte de estos caudales son aquellos que representan fugas en la red de distribución, para ello mediante el AFMN se obtendrá aquel caudal de fuga que siempre prevalecerá en el sistema es decir el caudal mínimo inevitable (fugas latentes).



De los datos que se registran en los días considerados para el análisis se detecta el caudal mínimo nocturno que se presenta en cada uno de ellos, con el cual se debe extrapolar los caudales de fuga y se debe establecer un rango de valores.

Al compararlos se puede establecer el caudal de consumo más crítico que se presente en la red de distribución del sector A-1.

Extrapolando caudales de fuga en los días de menor consumo se obtiene que:

Cuadro 4.3. Caudales extrapolados de los días de menor consumo

Fecha	Q _{máx.} (l/s)	Q _{mín inév.} (l/s)	Q _{mín.} (l/s)
23/12/2009	6.78	5.67	3.63
28/12/2009	6.70	5.53	2.90
24/12/2009	6.52	5.39	3.71
30/12/2009	6.41	5.25	2.86
31/12/2009	6.27	5.10	2.21

Fuente: El Autor

Extrapolando los caudales de fuga en los días de mayor consumo:

Cuadro 4.4. Caudales extrapolados de los días de mayor consumo

Fecha	Q _{máx.} (l/s)	Q _{mín inév.} (l/s)	Q _{mín.} (l/s)
29/12/2009	6.87	5.44	2.46
02/01/2010	6.97	5.67	2.76

Fuente: El Autor

Observamos que el QMN es el mismo caudal máximo resultado de la extrapolación de caudales de fuga, esto se atribuye a que la presión es la misma en el instante que se presenta el menor consumo, por lo tanto el valor es igual al registrado.

De entre los días con menor y mayor consumo respectivamente se establece que el mínimo inevitable registrado es de 5.10 l/s, siendo menor que el registrado en el sector A-1 (6.27 l/s) luego de estos cálculos se determina las fugas latentes con el propósito de establecer si existen fugas en la red de distribución mediante la sustracción entre el caudal mínimo inevitable (registrado) y el mínimo inevitable (calculado); ya que si el resultado es positivo indica la presencia de estas.

Para mayor facilidad se muestra un cuadro donde se encuentran los diferentes caudales para los días que se analizan, cabe señalar que se calcula para diferentes



estados de la red y acometidas, es decir se considera el caso cuando la red de distribución se encuentre en excelentes condiciones, en medianas condiciones y en pésimas condiciones (edad de tuberías, calidad de tuberías, etc.); al igual que las acometidas para las mismas condiciones, entonces:

Cuadro 4.5. Caudales obtenidos de fugas latentes (días de mayor y menor consumo)

Fecha	QMN _{INEVITABLE} (calculado) Estado bueno (red y acometidas)		
	Q _{máx.} (l/s)	Q _{mín inév.} (l/s)	Q _{mín.} (l/s)
23/12/2009	1.19	1.11	1.04
28/12/2009	1.19	1.11	1.04
24/12/2009	1.19	1.11	1.04
30/12/2009	1.19	1.11	1.04
31/12/2009	1.19	1.11	1.04
29/12/2009	1.15	1.08	1.00
02/01/2010	1.17	1.10	1.02

Fuente: El Autor

Cuadro 4.6. Caudales obtenidos de fugas latentes (días de mayor y menor consumo)

Fecha	QMN _{INEVITABLE} (calculado) Estado medio (red y acometidas)		
	Q _{máx.} (l/s)	Q _{mín inév.} (l/s)	Q _{mín.} (l/s)
23/12/2009	1.76	1.68	1.60
28/12/2009	1.76	1.68	1.60
24/12/2009	1.76	1.68	1.60
30/12/2009	1.76	1.68	1.60
31/12/2009	1.76	1.68	1.60
29/12/2009	1.69	1.61	1.54
02/01/2010	1.72	1.65	1.57

Fuente: El Autor

Cuadro 4.7. Caudales obtenidos de fugas latentes (días de mayor y menor consumo)

Fecha	QMN _{INEVITABLE} (calculado) Estado malo (red y acometidas)		
	Q _{máx.} (l/s)	Q _{mín inév.} (l/s)	Q _{mín.} (l/s)
23/12/2009	2.32	2.25	2.17
28/12/2009	2.32	2.25	2.17
24/12/2009	2.32	2.25	2.17
30/12/2009	2.32	2.25	2.17
31/12/2009	2.32	2.25	2.17
29/12/2009	2.22	2.14	2.07
02/01/2010	2.27	2.20	2.12

Fuente: El Autor



De los cuadros anteriores se tiene que, mientras en mejor estado se encuentre la red el caudal mínimo atribuido a fugas es menor, por el contrario cuando las redes están en mal estado este caudal es mayor; de entre todos los valores de los cuadros anteriores se promedia los $QMN_{INEVITABLE}$ y se establece si la condición para determinar la existencia de fugas cumple.

Cuadro 4.8. Caudales promedios del sector A-1

$QMN_{INEVITABLE}$ (registrado)	$QMN_{INEVITABLE}$ (l/s)			$QMN_{REG.} - QMN_{CALC.}$			Si dif. es positiva existe fuga
	bueno	medio	malo	bueno	medio	malo	
6.78	1.10	1.67	2.23	5.68	5.11	4.55	Si
6.70				5.42	4.85	4.29	Si
6.52				5.60	5.03	4.47	Si
6.41				5.77	5.20	4.64	Si
6.27				5.31	4.74	4.18	Si
6.87				5.87	5.30	4.74	Si
6.97				5.17	4.60	4.04	Si

Fuente: El Autor

Ahora bien, se puede observar que en el sector A-1 la red de distribución tiene fugas las mismas que a través del análisis de los caudales registrados se calculan, en resumen se tiene que:

Cuadro 4.9. Resumen de caudales registrados del sector A-1

$QMN_{REG} = 6.27$ l/s		
$QMN_{EXT. Q}$	máximo = 6.27 l/s	
	mínimo inevitable = 5.10 l/s	
	mínimo = 2.21 l/s	
$QMN_{FUGAS LATENTES}$	bueno	máximo = 1.18 l/s
		mínimo inevitable = 1.10 l/s
		mínimo = 1.03 l/s
	medio	máximo = 1.74 l/s
		mínimo inevitable = 1.67 l/s
		mínimo = 1.59 l/s
	malo	máximo = 2.30 l/s
		mínimo inevitable = 2.23 l/s
		mínimo = 2.15 l/s

Fuente: El Autor

En el sector se tiene un nivel de fugas considerable ya que si se compara con el peor de los casos (estado de red y acometidas en mal estado) aún es superior el caudal registrado fugado durante el periodo de estudio, la entidad encargada deberá realizar



acciones de reducción de pérdidas indagando en toda la red de distribución la razón para que se presente dicho consumo nocturno elevado.

4.3. EVALUACIÓN Y CÁLCULO DE ÍNDICES DE PÉRDIDAS

Los índices de pérdidas que se consideran para el sector A-1 son el IFE, %IANC, índice de consumos e índice lineal de fugas. En el capítulo anterior se determinó que el índice de fugas estructurales es 29, este valor al compararlo en la matriz de evaluación de pérdidas físicas lo ubica en la categoría D, en la cual recomienda establecer de manera inmediata programas de reducción de pérdidas.

En la misma matriz se cataloga a nuestro país como en vías de desarrollo con lo que se está aseverando que definitivamente ninguna entidad operadora ejecuta programas para el control y la reducción de pérdidas, el alto valor del IFE resultado del análisis del sector A-1 indica, que la red de distribución se encuentra en mal estado y debe darse su correspondiente mantenimiento de manera inmediata al igual que a todos sus componentes (válvulas, llaves cortadoras, hidrantes, etc.) en mejoras de lograr disminuir las pérdidas. Dentro de la información del sector en análisis se tiene los volúmenes de los últimos tres meses, al igual que los diferentes valores de agua no contabilizada los cuales han aumentado como se muestra en el siguiente gráfico:

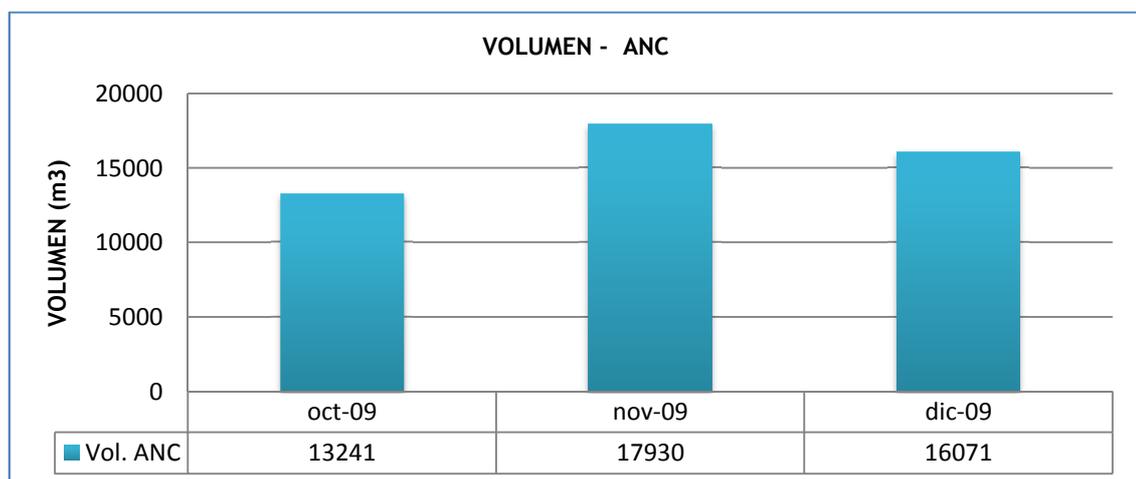


Gráfico 4.1. Volumen de ANC del sector A-1 período OCT 09/DIC 09

Fuente: El Autor

Al variar el volumen de agua no contabilizada de la misma manera variará el índice de agua no contabilizada expresada en porcentaje (%IANC), lo cual es un indicativo que dentro de la red de distribución existen fugas las cuales se deben detectar, localizar y reparar de manera rápida.



Los consumos que se generan durante el período de estudio en el sector A-1 se presentan en el siguiente cuadro resumen, se considera tanto los días de mayor consumo como los de menor consumo:

Cuadro 4.10. Consumos generados en el sector A-1

Consumos del sector A-1				
Fecha	CHM m ³ /h	CMN m ³ /h	CHP m ³	CT m ³ /h
23/12/2009	311.08	123.19	165.09	3962.12
24/12/2009	308.05	118.73	166.26	3990.24
28/12/2009	341.86	121.07	167.24	4013.82
29/12/2009	362.77	123.84	178.78	4290.77
30/12/2009	341.32	116.21	167.12	4010.98
02/01/2010	354.2	127.51	172.87	4148.86
31/12/2009	356.65	114.41	180.58	4334.00

Fuente: El Autor

Los consumos calculados en el sector A-1 sirven para determinar los diferentes índices de consumo tales como; el índice de consumo máximo horario (ICMH) el cual refleja el consumo máximo generado en una hora durante un período de 24 horas de registro continuo, el índice de consumo mínimo nocturno que involucra los consumos nocturnos del sector que se presentan en una hora durante la noche y finalmente el índice de consumo horario el cual relaciona los dos anteriores; mediante estos valores se puede establecer la existencia y el nivel de fugas en un determinado sector, a través de valores recomendados se puede comparar los diferentes índices obtenidos, en el siguiente cuadro se muestra estos:

Cuadro 4.11. Índices de consumo obtenidos del sector A-1

Índices de consumo			
Fecha	ICMH	ICMN	ICH
23/12/2009	1.88	0.75	2.53
24/12/2009	1.85	0.71	2.59
28/12/2009	2.04	0.72	2.82
29/12/2009	2.03	0.69	2.93
30/12/2009	2.04	0.70	2.94
02/01/2010	2.05	0.74	2.78
31/12/2009	1.97	0.63	3.12

Fuente: El Autor



De estos valores observamos que los índices están por sobre los límites establecidos a excepción del ICH del día 31/12/2009 que esta fuera de los valores que se vienen generando.

Valores recomendados		
ICMH	ICMN	ICH
1.55 (México)	0.4 0.35 (AWWA)	> 3 a 7 / Bajo nivel de fugas < 3 / Nivel considerable de fuga

Comparando cada uno de los valores se puede establecer que definitivamente existe un nivel considerable de fugas, y se le atribuye a que los ICMH son superiores a 1.55, de la misma manera el valor de los ICMN superan el valor de 0.35 (recomendado por la AWWA) y todos los ICH son menores al valor de 3 (valor recomendado).

Finalmente mediante el índice lineal de fugas se trata de determinar valores de los consumos nocturnos en el sector para luego poder compararlos con un consumo específico límite nocturno (CELN) y finalmente establecer de que si el consumo específico nocturno (CEN) es superior al CELN hay que indagar en el sector posibles averías, o si es el caso informar a los usuarios de la zona que revisen las instalaciones domiciliarias.

De la misma forma se obtiene valores para los días de mayor consumo y los días de menor consumo, en el siguiente cuadro se muestra:

Cuadro 4.12. Índice lineal de fugas del sector A-1

Índice lineal de fugas			
Fecha	CEN l/s/km	CELN l/s/km	Observación CEN>CELN
23/12/2009	3.5	2.4	fugas en el sector
24/12/2009	3.4	2.3	fugas en el sector
28/12/2009	3.5	2.3	fugas en el sector
29/12/2009	3.6	2.4	fugas en el sector
30/12/2009	3.3	2.2	fugas en el sector
02/01/2010	3.7	2.5	fugas en el sector
31/12/2009	3.3	2.2	fugas en el sector

Fuente: El Autor

Como se puede observar durante los días considerados se tiene que el consumo nocturno supera al consumo límite establecido para el sector, por lo cual se debe



iniciar con la detección de las mismas utilizando los métodos de detección (fonómetro, geófono, etc.) a nivel de la red de distribución hasta tener una zona delimitada para luego utilizar equipos de localización y determinar exactamente el lugar de ocurrencia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



5.1. CONCLUSIONES

Al aplicar la metodología propuesta para la detección de fugas de agua en el sector A-1 mediante el AFMN, y con la utilización de la hoja de cálculo elaborada en el programa Excel se ha concluido que:

- En el sector A-1 durante el período de muestreo diciembre 2009/enero 2010 se registró un caudal mínimo de 6.27 l/s el día 31 de diciembre de 2009 a las 02h30 de la madrugada, este caudal se lo denomina caudal mínimo nocturno (QMN), como es de esperarse sucede en horas de la madrugada cuando los consumos en el sector disminuyen y paralelamente generan presiones elevadas de hasta 52 m c.a.
- Mediante el uso de la hoja de cálculo “fugas latentes”, se determinó el caudal nocturno mínimo inevitable el cual se lo define como aquel caudal que permanece en la red de distribución, es por ello que se lo considera como una fuga de fondo, la cual no resulta económico repararla para la entidad operadora, dentro de la hoja de cálculo se determina que el caudal mínimo inevitable para el sector A-1 es de 1.68 l/s.
- En el presente cuadro se presenta un resumen de los caudales: registrado, calculado y mínimo inevitable del sector A-1:

Tipo de caudal	Máx. (l/s)	QMN (l/s)	Min. (l/s)	Observaciones
Mínimo inevitable	1.76	1.68	1.60	Obtenidos de la hoja de cálculo “fugas latentes”
Calculado	6.27	5.10	2.21	Obtenidos de extrapolar los caudales de fuga
Registrado	-	6.27	-	Obtenido de la medición en el sector mediante caudalímetro

Como se observa en el cuadro resumen en el sector existen fugas ya que tanto el valor de caudal registrado como los caudales calculados son superiores a los caudales mínimos inevitables.

Posteriormente a estos cálculos se debe analizar los diferentes índices técnicos que se utilizan en la gestión activa de fugas, con el propósito de determinar el estado de la



infraestructura de la red (índice de fugas estructurales - IFE), el porcentaje de pérdidas de un sistema de distribución de agua potable (IANC), el estado de la red (índices de consumo):

- A través del Índice de Fugas Estructurales (IFE) se conoce la eficiencia física del sistema, es decir, el estado de la infraestructura de la red de distribución, el cálculo del IFE es la relación entre el CARL y el UARL, que a su vez dependen del volumen inyectado a la red, el volumen que se factura durante un período (UARL), la longitud de la red de distribución, la cantidad de acometidas domiciliarias, la longitud promedio de acometida, y de la presión del sistema (CARL), en el sector A-1 se determinó un IFE = 29, este valor es un indicador que la empresa encargada de la distribución de agua no desarrolla programas de reducción de pérdidas y por lo tanto es un sistema ineficiente.

El uso de este índice tiene una limitación, ya que carece de una explicación física, además de ello, para el cálculo del UARL se debe tener una base de datos muy amplia la cual contenga información acerca de longitud de la red de distribución, cantidad de acometidas domiciliarias, longitud promedio de acometida, por lo general en la mayoría de entidades operadoras todos estos parámetros son estimados, otro parámetro a considerar es el registro de la presión del sistema que en lo habitual si la red no se encuentra sectorizada y no se controla presiones difícilmente se logra obtener información.

De igual forma para el cálculo del CARL se tiene que conocer los volúmenes tanto, los que son inyectados a la red como los facturados durante un período, se debe considerar que si la red no cuenta con un sistema de medición no se podrá conocer el volumen que es inyectado a la red, al igual que si la micromedición no es exacta (medidores defectuosos o dañados) no se factura lo que realmente se entrega a los usuarios.

Por estas razones este indicador no es muy fiable, debido a que su cálculo es elemental depende de datos exactos para determinarlo.

- Para determinar qué porcentaje de pérdidas se presentan en un sistema de distribución de agua potable y diagnosticar la eficiencia general de la empresa o entidad encargada se debe utilizar el índice de agua no contabilizada (IANC), ya que el principal objetivo de una entidad operadora es de reducir



este porcentaje, según el Banco Mundial establece un límite aceptable de 25.00 %. En el sector en estudio se tiene un IANC = 51.54 % por lo que se concluye que la gestión operativa y comercial es deficiente.

La principal desventaja del uso de este índice es que para su cálculo se necesita conocer el volumen que se inyecta al sistema y el volumen que se factura durante un período, pero en la realidad, muchas de las veces se usa agua sin medir (aseo de parques, limpieza de calles, etc.) y por ende estos consumos son estimados, razón por lo cual se deja una gran incertidumbre al menos dentro del volumen facturado.

- A través de los índices de consumo se puede tener un conocimiento previo del sistema de distribución, mediante el uso de valores orientadores que determinan la existencia de fugas.

Su cálculo se basa principalmente en los consumos que se generan durante un tiempo mínimo de 24 horas, los cuales se obtienen a través de mediciones de caudal que se realizan en el sector de forma continua; los principales índices que más se utilizan son el índice de consumo máximo horario (ICMH) y el índice de consumo mínimo nocturno (ICMN).

Para el cálculo de estos índices se necesita conocer los consumos; máximo horario, mínimo horario, y horario promedio, cabe recalcar que son consumos que se presentan durante 24 horas de servicio continuo.

En el sector A-1 se ha considerado el día en que se presenta el QMN, entonces se tiene que el CMH = 356.65 m³/h y el CMN = 114.41 m³/h; por lo que el ICMH = 1.97 y el ICMN = 0.63.

Al momento de comparar estos índices con los valores de referencia, se dice que en el sector existen fugas, para establecer qué nivel de fugas existen en la red se debe considerar el índice de consumo horario (ICH), por lo que en el presente caso se obtuvo un ICH = 3.12; este valor está dentro de los valores de referencia pero como se observa en el análisis de los días de mayor y menor consumo este índice fluctúa entre 2 y 3, por lo que se determina que en el sector existen fugas y se deben localizar y reparar.

Estos índices al no considerar las presiones que existen en el sistema de



distribución, pierden fiabilidad, ya que no se puede establecer si para mejorar el estado de la red es necesario realizar un programa de control de presiones.

- Comparativamente se dice que entre el índice de fugas estructurales y los índices de consumo existe discrepancia, esto se debe a que principalmente el IFE para su cálculo considera la infraestructura de la red (mediciones aproximadas) y depende mucho de la exactitud con la que se obtengan los diferentes datos (longitud de la red, número de acometidas,...), mientras que los índices de consumo se basan en mediciones de consumos ocasionados por los usuarios y por ende se aproxima a la realidad en la que se encuentra la red.



En el siguiente cuadro se muestra comparativamente estos índices:

índice	Datos necesarios		Ventajas	Desventajas	Formas de uso
Índice de fugas estructurales (IFE)	CARL	Vol. inyectado Vol. facturado	-permite determinar el estado de la red de distribución. - a través de los resultados obtenidos se puede establecer el punto de falencia del sistema.	- solo se puede aplicar en redes que cuenten con macromedición y micromedición. - carece de una explicación física. - si no se tiene una base de datos completa para su cálculo, los resultados no serán tan fiables.	En redes sectorizadas, las cuales cuentan con un programa completo de medición (macromedición y micromedición).
	UARL	Long. de red (Lm). Nº de acometidas (Na). Long. prom. de acometida (Lp). presión (P).			
Índice de agua no contabilizada (IANC)	-	Vol. inyectado Vol. facturado	-permite diagnosticar la eficiencia general de la entidad encargada.	- aun cuando el sistema de distribución es completamente medido, se utiliza agua sin medir (usos autorizados) por lo que estos consumos son estimados y afectan en el cálculo de este índice.	En sistemas de distribución completamente medidos.
Índices de consumo	ICMH	Consumo máximo horario (CMH). Consumo horario promedio (CHP)	- permiten tener un conocimiento previo del estado de la red de distribución. - mediante valores orientadores se puede conocer si en la red existen fugas de agua.	- su cálculo se basa solamente en consumos generados en la red. - al no considerar presiones no se puede saber si el mediante gestión de la presión se puede mejorar el estado de la red de distribución.	Los consumos se deben registrar y medir durante 24 horas de forma continua.
	ICMN	Consumo mínimo nocturno (CMN). CHP.			
	ICH	CMH CMN			
	ICONOD	CMN CHP Consumo mínimo nocturno de grandes consumidores (cmn). Consumo horario promedio de grandes consumidores (chp).			Solamente se utiliza este índice cuando existen grandes consumidores en el sector caso contrario el valor del ICONOD coincide con el ICMN



5.2. RECOMENDACIONES

Como al aplicar la metodología AFMN, se necesita de la realización de varios aspectos se recomienda:

- A las entidades encargadas del almacenamiento y distribución del agua potable, realizar programas de sectorización de la red, ya que mediante la implantación de sectores, subsectores o distritos hidrométricos es posible determinar el estado de la red y la eficiencia del mismo mediante indicadores técnicos.
- Instaurar en la red de distribución la macromedición y micromedición con lo que se podrá conocer los volúmenes que ingresan al sistema y la cantidad de agua que se entrega a los usuarios.
- Ejecutar programas de control de fugas mediante la detección y localización de las mismas, a través del uso de instrumentos acústicos (geófono, varilla acústica, etc.) y conjuntamente con el análisis de flujos mínimos nocturnos con el propósito de poder cuantificarlas.
- Desarrollar la gestión de la presión, este es una actividad muy importante dentro de lo que se refiere la disminución de las fugas de agua en sistemas de distribución, debido a que mientras la presión aumenta en la red ocasiona que el caudal de fuga aumente.
- Utilizar el AFMN, mediante el caudal mínimo nocturno se determina cuanta cantidad de agua se fuga realmente en la red de distribución, adicionalmente a ello con el uso de los diferentes índices técnicos expuestos en el presente proyecto es posible determinar en qué estado se encuentra el sistema de distribución frente a otros sistemas más eficientes.
- Automatizar la hoja de cálculo en Excel, utilizada para la aplicación de la metodología AFMN.

ANEXOS



ANEXO 2 Extrapolación de caudales

A través del presente anexo se extrapola el caudal de fuga para los diferentes valores del exponente N_1 , se ingresa con valores conocidos como lo son el QMN y la presión que se genera cuando este sucede, y se calcula para cada instante de caudal que se registra en el sector en estudio. Finalmente se promedia todos los caudales de fuga calculados y se determina el caudal que se entrega efectivamente al sector, es decir, se resta del caudal que se registra el caudal de fuga extrapolado.

Luego de ello se grafica los caudales que se registran, fugan y que se entregan, con el propósito de identificar de manera visual la variación de los consumos que se generan en el sector durante el período de análisis.

QMN =	l/seg							P _{QMN} =	m c.a.	
<i>Valores de exponente N_1</i>										
1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.15			
<i>Caudal fugado</i>								Evaluación de caudales		
<i>Q_f</i>	<i>Q_f</i>	<i>Q_f</i>	<i>Q_f</i>	<i>Q_f</i>	<i>Q_f</i>	<i>Q_f</i>	<i>Q_f</i>	<i>Q_f prom</i>	<i>Q ent.</i>	



ANEXO 3 Cálculo de fugas latentes

ANÁLISIS DE LOS CONSUMOS GENERADOS EN EL SECTOR				
CAUDAL ENTREGADO A LOS USUARIOS				
Total consumo de usuarios con más de 500 l/h en horas nocturnas (Se deben medir individualmente)		l/h	Sub-Total (l/h)	
	Domésticos			
	No domésticos			
Estimación del consumo doméstico nocturno				
			Sub-Total (l/h)	
1.7 l/viv /h	# Viviendas	1.7 x # Viv.		
0.6 l/hab /h	# Habitantes	0.6 x # Hab.		
Estimación del consumo no doméstico nocturno				
<i>Simplificado:</i>				Sub-Total (l/h)
8 l/usuario/h	# Usu. no doms	8 x # Usuarios no dom.		
Caudal total entregado a usuarios (Consumos A) :				
FUGAS LATENTES				
	Condición red (G)	Condición	Long. (Km.)	Sub-Total (l/h)
Tuberías de distribución	Buena 20 l/km/h	1	2	1 x 2
	Medio 40 l/km/h			
	Malo 60 l/km/h			
	Condición red (F)	Condición	# Usuarios	Sub-Total (l/h)
Acometidas	Buena 2 l/viv/h	3	4	3 x 4
	Medio 4 l/viv/h			
	Malo 6 l/viv/h			
			TOTAL (l/h) B =	
Factor de corrección de Presión (FCP)				
Presión media nocturna =		m c.a.	FCP =	Valor de cuadro 7 o cuadro 8
			TOTAL CORR. (l/h) C =	B x FCP
Caudal mínimo nocturno inevitable (fugas latentes + consumos)			A + C	l/h
Caudal mínimo nocturno inevitable es =			m ³ /h	
Caudal mínimo nocturno inevitable es =			lt/s	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN UNA MEDIDA				
<i>Estimación del consumo doméstico :</i>		sub-total (l/h)	Total (l/h)	
3.8 √ # viviendas				
2.4 √ # hab.				
<i>Estimación del consumo no doméstico :</i>				
11 √ # uso. no doms.				
TOTAL :				



Referencias Bibliográficas

- [1] Arregui de la Cruz Francisco. "Evaluación de las fugas mediante el Análisis de los Caudales Inyectados" ITA.
- [2] Bourguet Ortiz Víctor. (2004). A.C. AF1-3 "Estrategia y Organización para la Detección de Fugas". Centro mexicano de capacitación en agua y saneamiento, México.
- [3] Benavides Muñoz Holger. "Gestión y Políticas para fugas en la Red". Apuntes de Clase. UTPL
- [4] Cabrera Marcet Enrique. (2006). "Alternativas y Estrategias disponibles en la Reducción de Pérdidas"
- [5] Contreras Garzón Fabio Y Thornton J. (2006). "Influencia de la presión en las pérdidas de agua en sistemas de distribución". Asociación Interamericana de Ingeniería sanitaria y ambiental-ADIS. XXX CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL. URUGUAY. www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/CO02045_Garzon_Contreras.pdf. Página activa.
- [6] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2009) "Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable". Editor Secretaría de medio ambiente y recursos naturales – México D.F. 175 páginas.
- [7] Delgado David Michael. Publication "Infrastructure Leakage Index (ILI) as a Regulatory and Provider Tool". Department of Civil Engineering & Engineering Mechanics College of Engineering. University of Arizona.
- [8] EATHISA. Ficha técnica "Correlador acústico controlado por PC, Multicorrelación". www.eathisa.com/data/archivos/MAQ6000.pdf
- [9] Farrer, Crespo Herbert. (1979). "Control de fugas en redes de distribución de agua". Proyecto de Desarrollo Tecnológico de Instituciones de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado. (DTIAPA). www.cepis.org.pe/bvsacd/scan/011632-05.pdf. Página Activa.
- [10] Farley M. y Trow S. (2003). "Losses in water distribution networks". Publicación de la IWA. 273 páginas
- [11] Forero Saenz Rodolfo. "Algunos aspectos económicos importantes en la evaluación de los costos de distribución de agua potable". Proyecto de Desarrollo Tecnológico de las Instituciones de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado. DTIAPA. 1982.
- [12] FUSIONSUDAMERICANA SA. Nota Técnica N° 154 "Sistemas de limpieza utilizados previo al proceso de recubrimiento". Buenos Aires – Argentina. www.fusionsudamericana.com
- [13] González Agustín. (2009). Resumido "REHABILITACIÓN". <http://www.grupoage.com/index.php?view=article&catid=37%3Aproblemas&id=70>. Página activa.
- [14] Hamilton S., Mckensie R., SEAGO S. (2006), "A review of performance indicators for real losses from water supply system"
- [15] Hueb, José Augusto. (1986). "Proyecto de control de fugas". Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. (CEPIS). www.cepis.org.pe/bvsacd/scan/011632-05.pdf. Página Activa.



- [16] Jiménez Aldana Mauricio. (2003). "La sectorización hidráulica como estrategia de control de pérdidas en sistemas de acueducto".
- [17] Lambert A.O. y Fantozzi Marco. Publicación "Recent developments in pressure management". http://www.miyawater.com/user_files/Data_and_Research/miyas_experts_articles/15jun2010/Recent%20Developments%20in%20Pressure%20Management.pdf. Página activa.
- [18] Lambert A., Myers S. & Trow S. (1998). "Managing water leakage". Economic and technical issues. Publicado y distribuido por Financial Times Energy. Gran Bretaña.
- [19] Mataix Claudio. (1982). "Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas". 2da edición. Alfaomega Grupo Editor. Oxford University. Páginas 312-313.
- [20] Mckensie, Meyer Y Lambert. (2002). "Calculating Hour-Day Factors for Potable Water Distribution System in South Africa". Desarrollado por South African Water Research Commission.
- [21] Mckensie A.F. Publicación "Viabilidad de las nuevas metodologías para la renovación y rehabilitación de tuberías". Universidad de los Andes, Bogotá – Colombia.
- [22] ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. Fascículo "Fugas y Medidores" <http://www.paho.org/Spanish/HEP/HES/LksnMtrS.pdf>. Página activa.
- [23] Rangel Ávila Humberto/Sanabria Clavijo William. Resumido "Renovación y Rehabilitación de redes de distribución de agua potable y alcantarillado". CIACUA. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados. Universidad de los Andes. Bogotá – Colombia.
- [24] SUBSURFACE LEAK DETECTION.Inc. "How to find leaks". www.subsurfaceleak.com/find_leaks.html. Página activa.
- [25] Simicevic Jadranka, Sterling Raymond L. "Guidelines for pipe bursting". U.S. Army Corps of Engineer. ERDC (Engineering Research and Development Center) March 2001.
- [26] Thornton J. y Lambert A. "Progress in practical prediction of pressure, leakage pressure, burst frequency and pressure, consumption relationships". www.leakssuite.com/Documents/.../Thornton%26LambertFinal15Aug.pdf. Página activa.
- [27] Triviño Peralta Antonio. Publicación "Reducción de pérdidas en redes. Sectorización de la red de distribución en Barcelona". VII CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE.
- [28] User Manual - Portable Digital Correlation Transit Time Ultrasonic Flowmeter – Thermo Polysonics.
- [29] Vindas Villalobos Juan C. (2005). "Modelo para la cuantificación y desagregación de las pérdidas en sistemas de agua potable como herramienta para el establecimiento de un programa eficiente de reducción de pérdidas". Revista Evolución/Vol. 3/Nº 1.
- [30] Recomendaciones para la detección y aforo de fugas en tomas domiciliarias. CEPIS. <http://www.cepis.org.pe/bvsair/e/repindex/rep48/recomen.html>. Pagina activa.
- [31] http://www.aguacam.com/materiales/pdf/aguamediterraneo/hacia_un_uso_sostenible_del_agua.pdf. Pagina activa.