

**Revisión sistemática de estrategias para la gestión de pérdidas reales y aparentes en red de
distribución de agua en países de Latinoamérica**

Carmen Juliana Mejía Díaz

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Civil

Director

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

PhD. en Ingeniería, área de énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Marco de referencia	13
1.1 Sistema de distribución de agua.....	13
1.2 Pérdidas en sistemas de distribución de agua	14
2. Metodología	18
2.1 Revisión de literatura	18
2.2 Filtro de documentos y criterio de selección	20
2.3 Organización de la información.....	21
2.4 Revisión y análisis de datos	21
3. Resultados y discusiones.....	22
3.1 Revisión de literatura y filtro de documentos	22
3.2 Medición y estimación de pérdidas.....	23
3.2.1 Pérdidas Totales.	24
3.2.2 Reales.	27
3.2.3 Aparentes.	35
3.3 Gestión de pérdidas.....	42
3.3.1 Localización de pérdidas.....	43
3.3.2 Gestión de Pérdidas Reales.....	45

3.3.3 Gestión de Pérdidas Aparentes.	49
3.3.4 Gestión de pérdidas reales y aparentes en países en desarrollo.	52
4. Conclusiones.....	56
Referencias Bibliográficas	59
Apéndices.....	66

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Países en donde se realizaron los estudios de los artículos seleccionados	19
<i>Figura 2.</i> Esquema del proceso de filtrado	23
<i>Figura 3.</i> Esquema de métodos	24
<i>Figura 4.</i> Gestión de pérdidas reales.	45
<i>Figura 5.</i> Gestión de pérdidas aparentes.....	49

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Caracterización general de las pérdidas</i>	15
Tabla 2. <i>Causas más comunes de fugas</i>	16
Tabla 3. <i>Características de los tipos de fugas</i>	17
Tabla 4. <i>Adaptación al español del International Water Balance propuesto por la IWA</i>	25
Tabla 5. <i>Métodos de estimación y cálculo de pérdidas reales</i>	35
Tabla 6. <i>Actividades para la gestión de pérdidas aparentes</i>	51
Tabla 7. <i>Análisis de medidas de gestión aplicadas a países en desarrollo</i>	54

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Casos de estudio	66
Apéndice B. Flujo para método de gestión integrada de fugas.....	70

Resumen

Título: Revisión sistemática de estrategias para la gestión de pérdidas reales y aparentes en red de distribución de agua en países de Latinoamérica *.

Autores: Carmen Juliana Mejía Díaz **

Palabras Clave: Evaluación de pérdidas de agua, Gestión de pérdidas de agua, Evaluación y gestión de fugas, gestión de pérdidas aparentes.

Descripción:

En la actualidad, no se puede solo tener en cuenta la cobertura, calidad, cantidad y costos cuando se piensa en redes de distribución de agua, pues el mundo se encuentra en una crisis de abastecimiento del recurso hídrico que prioriza el uso eficiente de este sobre otras medidas como la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento. Basándose en la importancia de la identificación, reducción y control de pérdidas se realizó una revisión sistemática de literatura sobre la gestión de pérdidas reales y aparentes en redes de distribución de agua potable. Este análisis inició con la identificación de los métodos utilizados para el cálculo de pérdidas tanto reales como aparentes en redes de distribución de agua, una caracterización de las medidas de gestión utilizadas para estas pérdidas, y finalmente una documentación sobre la aplicabilidad de estas en sistemas de distribución en Latinoamérica. Se identificaron casos de estudio desarrollados con éxito en diferentes países del mundo, ya que se encontraron pocos estudios realizados en Latinoamérica, en donde se extrajeron datos como porcentaje de pérdidas y medidas de gestión. Entre los métodos más usados para el cálculo y estimación de pérdidas encontramos el balance de agua, el análisis de flujo nocturno, los modelos hidráulicos, entre otros. Para países en desarrollo las medidas de gestión más efectivas y económicas para pérdidas reales es la gestión de la presión, para pérdidas aparentes es indispensable encontrar la causa de estas, que generalmente es por conexiones ilegales y mala gestión en los medidores.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Ingeniería Civil Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña PhD. en Ingeniería, área de énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Abstract

Title: Systemic review of strategies for the management of real and appearing losses in water distribution network in latin american countries Ingeniería Civil.

Authors: Carmen Juliana Mejía Díaz **

Key Words: Water Loss Assessment, Water Loss Management, Leak Assessment and Management, Apparent Loss Management.

DESCRIPTION:

Currently, it can't be just considered coverage, quality, quantity and costs when thinking about water distribution networks due to the world's water supply crisis that prioritizes the efficient use of water resources over other measures such as; the search for new sources of supply. Based on the importance of identifying, reducing and controlling losses, a systematic literature review was conducted on the management of actual and apparent losses in drinking water distribution networks. This analysis began with the identification of the methods used for the calculation of both actual and apparent losses in water distribution networks, finally, a documentation on the applicability of these in distribution systems in Latin America. Successful case studies were identified in different countries, where data was extracted as a percentage of losses and management measures. For developing countries, the most effective management measures and economies for real losses is pressure management, for apparent losses it is essential to find the cause of these, which is usually by illegal connections and mismanagement in the meters..

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil Director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña PhD. en Ingeniería, área de énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Introducción

La demanda mundial de agua ha venido presentando un aumento anual del 1% en la última década y se prevé que cada vez será mayor, debido al aumento poblacional, el desarrollo económico, cambios en los patrones de consumo, el cambio climático y el deterioro progresivo del recurso hídrico. (WWAP (Programa Mundial de Avaliação da Água das Nações Unidas), 2018) La escasez hídrica mundial no solo se debe a esta creciente demanda que ha modificado el ciclo natural del agua, creando diferentes ciclos artificiales en los que se ve afectada su circulación, características y calidad, sino también a lo limitado que es este recurso en el planeta, en donde a pesar de ocupar el 70% de éste, solo un 0.007% es el agua de fácil acceso para los humanos (Toledo, 2002). A su vez, este es un recurso renovable a partir de su propio ciclo hidrológico, sin embargo, es finito y la demanda está aumentando más rápido de lo que la naturaleza puede abastecer (Cirelli, 2005).

En la actualidad, no se puede solo tener en cuenta la cobertura, calidad, cantidad y costos cuando se piensa en redes de distribución de agua, pues el mundo se encuentra en una crisis de abastecimiento del recurso hídrico que prioriza el uso eficiente del mismo sobre otras medidas como la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento. (Ramírez & Cardona, 2014).

Una red de distribución de agua es aquella obra de ingeniería que permite el transporte de agua desde el tanque de almacenamiento hasta la comunidad en la cantidad requerida cumpliendo los criterios de calidad y condiciones hidráulicas adecuadas (ej. Presión) (Oviedo R, 2017). Las redes de distribución de agua se caracterizan por presentar pérdidas de agua asociadas a fugas, reboses y agua no contabilizada. No existe una red de distribución de agua con pérdidas del 0%; el promedio mundial es del 35% (-i.e. aproximadamente 48.600 millones de metros cúbicos de agua

por año) (AL-Washali, Sharma, & Kennedy, 2016). Sin embargo, es posible encontrar varios países con sistemas de acueductos altamente eficientes como Países Bajos donde se encuentra el porcentaje de pérdidas más bajo a nivel mundial 3-7%, Canadá presenta pérdidas del 13.8% y Estados Unidos del 15% aproximadamente (Babić, Đukić, & Stanić, 2014).

Uno de los principales problemas que afrontan las empresas de distribución de agua, son el cálculo y gestión de pérdidas. El agua no facturada es un volumen de agua que es consumido, pero no es cobrado, estas pérdidas son conocidas como pérdidas aparentes (UNAD, 2014), y las pérdidas que representan un volumen que no llega al consumidor son definidas como pérdidas reales (Kingdom. 2006; Alegre. 2004). El impacto de las pérdidas a las redes de distribución de agua es alto, las fugas pueden afectar la estabilidad del sistema, la edad funcional, la calidad del agua y del servicio prestado (Al-Washali, Kennedy y Sharma, 2016).

Se calcula que en países en desarrollo, aproximadamente un 50% las pérdidas generadas son causadas por filtraciones, conexiones clandestinas y errores de medición de agua potable en países en desarrollo (Cirelli, 2005); por ende, es de vital importancia identificar estrategias que permitan reducir y controlar estos valores teniendo en cuenta el contexto de estos países, para así no solo poder suplir el aumento de la demanda que se viene presentando en los últimos años sino también mitigar los grandes impactos ambientales.

Basándose en la importancia de la identificación, reducción y control de pérdidas se pretende realizar una revisión sistemática de literatura sobre la gestión de pérdidas reales y aparentes en redes de distribución de agua potable. Este análisis inicia con la identificación de los métodos utilizados para el cálculo de pérdidas tanto técnicas como comerciales en redes de distribución de agua, a partir de estos, caracterizar el desarrollo de medidas de gestión y la aplicabilidad de estas en sistemas de distribución en Latinoamérica. Los resultados de este trabajo de grado pueden ser

útil para posteriores estudios donde se quiera optimizar el funcionamiento técnico de un acueducto, realizar una revisión técnica del sistema y estudios donde se enfaticen en la gestión de pérdidas en la red de distribución.

1. Marco de referencia

1.1 Sistema de distribución de agua

Un sistema de abastecimiento de agua es un conjunto de obras e instalaciones ingenieriles (tuberías y accesorios) empleados para el transporte de agua desde el tanque de almacenamiento hasta las viviendas de los usuarios que serán favorecidos con dicho sistema, en la cantidad requerida, cumpliendo criterios calidad y condiciones hidráulicas adecuadas como la presión (Oviedo, R., 2017). Los sistemas de abastecimiento urbano son complejos, geográficamente dispersos y cuentan con diferentes componentes que necesitan funcionar en armonía para que esté presente un óptimo servicio. Los componentes principales son: Captación, Aducción, Desarenador, Conducción, Planta de Tratamiento Agua Potable (PTAP), Tanque de Almacenamiento y Regulación y la Red de distribución.

De otro lado, la **red de distribución** es un conjunto de tuberías de tuberías, bombas y otros accesorios, conectados de modo que suministren a los consumidores la cantidad de agua demandada en las presiones requeridas. Está conformada por una malla principal que distribuye el agua procedente de la planta de tratamiento hacia las redes menores del sistema y las redes de

distribución secundarias y terciarias son el conjunto de tuberías destinadas al suministro del agua potable a las viviendas y otros establecimientos de la población (IDEAM, 2002, págs. 48-101).

Constituyen el acto más importante en todo el sistema de abastecimiento. Estas son clasificadas por (Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua (CIDTA)):

Forma de funcionamiento $\left\{ \begin{array}{l} \text{red ramificada} \\ \text{red reticulada o mallada} \\ \text{red mixta} \end{array} \right\}$

Diferencia de presiones {redes en piso}

Uso en la calidad del agua {redes dobles}

1.2 Pérdidas en sistemas de distribución de agua

El camino que el agua recorre desde la captación hasta los consumidores es largo y es imposible que no se presenten pérdidas de agua, en todos los procesos envueltos siempre existirá un porcentaje de pérdida que en su mayoría son provenientes de operación o infraestructura deficientes y de una gestión inadecuada por parte de las compañías prestadoras del servicio.

Las pérdidas de agua pueden presentarse a lo largo de todo el sistema de abastecimiento, pero se realizó un enfoque en pérdidas en redes de distribución que son las comunes. Estas pérdidas representan un volumen que no llega al consumidor, siendo definidas como **Pérdidas Reales** (Kingdom. 2006; Alegre. 2004). Las principales causas de fuga son: material inadecuado, de mala calidad y/o defectuoso, roturas de tuberías ocasionadas por deficiencia en la mano de obra, errores de operación, que pueden ser exceso de presiones, cierre repentino de válvulas, corrosión interna debido a la agresividad del agua o externa por la deficiente protección contra la agresividad del suelo o el agua y daño premeditado o accidental (Delgado, 2011).

El volumen que, llega a ser consumido y no es facturado por fallas en los registros, fraudes, conexiones ilegales, clandestinas, se conocen como las **Pérdidas Aparentes**, son aquellas relacionadas con el funcionamiento comercial y técnico de la empresa. Las principales causas son usos no autorizados como robos o conexiones clandestinas, por errores en la lectura por imprecisión de los medidores o mal procesamiento de datos en la empresa prestadora del servicio (MMAyA, 2013). En la Tabla 1 se presentan las características principales de las pérdidas reales y aparentes.

Tabla 1.

Caracterización general de las pérdidas

Ítem	Características principales	
	Pérdidas Reales	Pérdidas Aparentes
Causa más común	Fuga	Error de medición
Costo asociado al volumen de agua perdido	Costo de producción de agua tratada	Cargo al consumidor minorista
Efectos en el medio ambiente	Desperdicio de recursos naturales Mayores impactos ambientales debido a una necesidad de ampliación de la explotación de los recursos	No es relevante
Efectos en la salud publica	Riesgo de contaminación	No es relevante
Punto de vista empresarial	Pérdida de producto industrializado	Alta pérdida de ingresos
Punto de vista del consumidor	Imagen negativa de la empresa asociada a desperdicios e ineficiencia	No es una preocupación inmediata

Ítem	Características principales	
	Pérdidas Reales	Pérdidas Aparentes
Efectos finales en el consumidor	Transferencia de costos a la tarifa. Desincentivo al uso racional del agua.	Transferencia de costos a la tarifa. Incitamiento a robo y fraudes

Fuente: Tsutiya, (2006).

Las pérdidas reales se consideran las más graves, ya que muchas veces pueden permanecer meses o hasta años sin que sean detectadas, estas pueden ocurrir en cualquiera de las componentes principales de los sistemas de distribución de agua, lo cual depende en gran medida de las características de los materiales y de los procedimientos de las empresas prestadoras del servicio para mantenimiento y reparación (Farley, 2001). En la Tabla 2 se presentan las principales causas de fugas:

Tabla 2.

Causas más comunes de fugas

Componentes	Causas Internar	Causas Externas
Bombas	Desgaste de la junta Ajustes inadecuados Presiones elevadas	No aplica
Embalses	Mala calidad de los materiales Mala ejecución de la obra Envejecimiento de los materiales	No aplica.
Tuberías	Materiales Mala calidad de los materiales Corrosión Envejecimiento	Ambiente Carga del trafico Agresividad del suelo (corrosión externa)

Componentes	Causas Internar	Causas Externas
	Ejecución	Polución del suelo
	Proyecto inadecuado	Desastres naturales
	Asentamiento inadecuado	Movimientos de tierra
	Corrosión	ocasionados por obras
	Operación	Deslizamientos
	Golpe de ariete	Movimientos sísmicos
	Presión alta	
	Calidad del agua (corrosión interna)	

Fuente: Tsutiya, (2006).

Las fugas en un sistema de distribución de agua pueden ser visibles o no visible, las visibles son fácilmente detectadas, en bombas o tubos expuestos se nota con simple inspección visual, en tubos o estructuras enterradas, la fuga necesita salir a la superficie para ser detectada (Farley, 2001; Kingdom et al., 2006). Las fugas no visibles exigen técnicas y equipos especiales para ser detectadas y reparadas, ya que la gran mayoría dura largos periodos de tiempo desperdiciando grandes volúmenes de agua antes de volverse visibles.

Las fugas con caudales muy bajos, bajo nivel de ruido, presiones reducidas y difíciles de detectar, son denominadas fugas de fondo, generalmente sus caudales son inferiores a $0.25 \text{ m}^3/\text{h}$ (Lamber, 2000). La Tabla 3, presenta las características principales de los tipos de fugas

Tabla 3.

Características de los tipos de fugas

Tipo de fuga	Características
Fondo	Fuga no visible, no detectable, bajos caudales, largas duraciones
Ráfaga visible	Afloramiento, altos caudales, baja duración

Tipo de fuga	Características
Ráfaga no visible	Detectable, caudales moderados, duración depende de la frecuencia de búsqueda de fugas

Fuente: Tsutiya, (2006).

2. Metodología

2.1 Revisión de literatura

Inicialmente se investigó acerca del panorama mundial en cuanto a cálculo y gestión de pérdidas, se extrajo información relevante como índices de pérdidas, porcentaje de pérdidas admitido y recomendaciones generales de la Asociación Mundial para el Agua (IWA).

Antes de iniciar la búsqueda de artículos en las bases de datos, se realizó una búsqueda acerca del cálculo y gestión de pérdidas reales y aparentes empleando el buscador de Google®. Se recopiló información como clasificación de pérdidas, pérdidas más comunes y sus diferentes medidas de gestión para obtener información acerca del panorama actual y de esta manera profundizar más en la revisión bibliográfica.

Posteriormente se realizaron dos revisiones literarias, siguiendo un protocolo de búsqueda (Reyes, et al., 2018), empleando para el primer grupo denominado cálculo de perdidas, el cual fue dividido en tres subgrupos, pérdidas reales (palabras claves “Leakage assessment”, “Leakage detection methods”), pérdidas aparentes (palabras claves “Methods of Apparent losses”) y

pérdidas totales (palabras claves “Assessment of Water Losses”), y para el segundo grupo denominado gestión de pérdidas se utilizaron las palabras claves “Economic Level of Leakage” para el primer subgrupo y “Economic Level of Apparent Losses” para el segundo subgrupo. Para la localización de los documentos bibliográficos se utilizaron varias fuentes documentales y bases de datos como Google Scholar®, Science Direct®, Scopus®, Springer® y otras fuentes adicionales como trabajos de grado realizados por el grupo de investigación de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental de la Universidad Industrial de Santander.

En la revisión de literatura se encontraron muy pocos artículos donde se realizarán un estudio de cálculo y gestión de perdidas en países en Latinoamérica, por lo tanto, se tomaron estudios realizados en países en desarrollo y países desarrollados

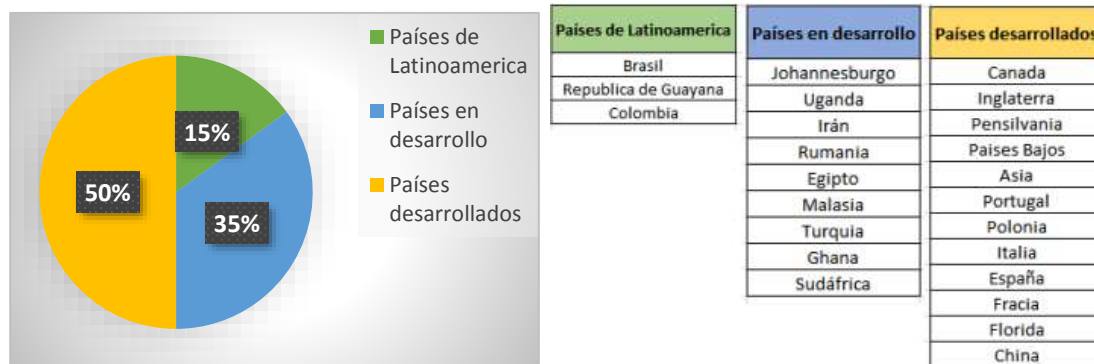


Figura 1. Países en donde se realizaron los estudios de los artículos seleccionados

En la siguiente tabla se presentan los estudios que se realizaron en cada uno de los países

Países	Calculo de pérdidas	Gestión de pérdidas	Cálculo y gestión de pérdidas
Brasil	x	x	x
Republica de Colombia		x	
Johannesburgo		x	x
Uganda	x	x	
Irán	x	x	x
Rumania		x	
Egipto		x	
Malasia	x		
Turquia		x	x
Ghana	x		
Sudáfrica	x		
Canada		x	
Inglaterra	x	x	
Pensilvania		x	
Países Bajos		x	
Asia		x	
Portugal		x	
Polonia		x	x
Italia	x	x	
España	x		
Francia	x		
Florida	x		
China	x		

2.2 Filtro de documentos y criterio de selección

Con el fin de identificar la documentación más relevante para la investigación, se realizó un proceso de filtrado de los artículos obtenidos, donde se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de selección:

Título: Descarte de artículos cuyo título no presentaba relación con el cálculo y gestión de pérdidas reales y aparente en sistemas de distribución de agua.

Citaciones: De los artículos seleccionados por el primer filtro, se realizó una revisión de donde habían sido citados y se incluyeron los estudios que contuvieron los temas abordados en esta investigación.

Resumen: Lectura del resumen de cada artículo con el fin de seleccionar estudios que se enfocaran en el cálculo y gestión de pérdidas reales y aparentes en sistemas de distribución de agua.

Contenido: Lectura del contenido total del artículo en donde se identificaron los diferentes métodos para el cálculo y gestión de pérdidas reales y aparentes, especialmente en países de Latinoamérica. Adicionalmente los artículos que contienen información acerca del cálculo y gestión de pérdidas reales y aparentes fueron seleccionados desde el año 2003.

2.3 Organización de la información

Para la organización de la información se seleccionaron los artículos más relevantes de ambos grupos. Se hizo uso de la herramienta de Excel y para ambos grupos se extrajo información para su identificación como: año de publicación, autor, nombre, revista, tipo de país (i.e. en vías de desarrollo o desarrollado).

2.4 Revisión y análisis de datos

De los artículos seleccionados para el primer grupo, se realizó una revisión respecto a los métodos utilizados para el cálculo de pérdidas tanto reales como aparentes y se identificó las pérdidas más frecuentes en los sistemas de distribución y cuáles son sus principales causas. Por otra parte, para los artículos seleccionados para el segundo grupo “gestión de pérdidas”, se realizó una revisión literaria enfocada a las medidas de gestión utilizadas para la reducción y control de pérdidas. Se identificaron y estudiaron casos implementados en países desarrollados y en desarrollo, se

generaron tablas con atributos clave para cada propósito del estudio (identificación de métodos de estimación y gestión de pérdidas)

3. Resultados y discusiones

3.1 Revisión de literatura y filtro de documentos

De acuerdo con la estrategia de búsqueda mencionada para el primer grupo se encontraron un total de 1.951 artículos y 1420 para el segundo subgrupo, los cuales la mayoría de estos artículos no tenían relación con la temática de investigación. Al realizar una búsqueda más avanzada por título, obtuvo un total de 167 artículos para el primer grupo y 43 artículos para el segundo grupo.

Adicionalmente se empleó el buscador Google Scholar® se revisaron los artículos que citaron los artículos seleccionados y contribuyeran con el propósito del estudio, dando como resultado un total de 180 artículos para el grupo de cálculo de pérdidas y 61 artículos para el grupo de gestión de pérdidas. Seguidamente se efectuó la lectura de los resúmenes de los artículos previamente filtrados: para el primer grupo se seleccionaron 120 artículos los cuales presentan los métodos utilizados para el cálculo de pérdidas reales y aparentes y 50 artículos para el grupo de gestión de pérdidas. Finalmente se realizó la lectura del contenido de los artículos en donde se excluyeron aquellos que no brindaron la información necesaria, por lo cual no resultaron aplicables al tema de estudio, esta selección dio un total de 35 artículos para el primer subgrupo cálculo de pérdidas reales, 30 artículos para el segundo subgrupo cálculo de pérdidas aparentes y 4 artículos para el

tercer subgrupo pérdidas totales, para el segundo grupo dio un total de 38 artículos, 25 para gestión de pérdidas reales y 18 para gestión de pérdidas aparentes. El esquema de proceso de filtrado de esta investigación se representa en la Figura 5. *NOTA: El conteo de artículos fue realizado por subgrupos, es decir que hay artículos fueron contados varias veces.*

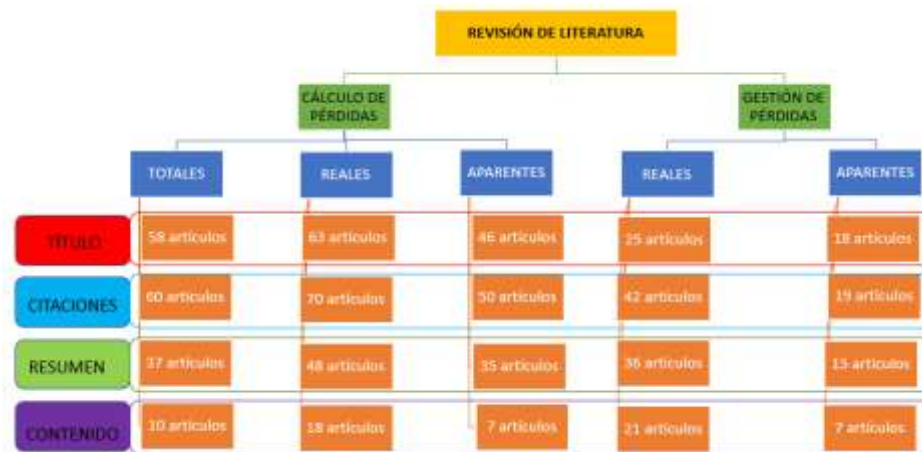


Figura 2. Esquema del proceso de filtrado

3.2 Medición y estimación de pérdidas

La realización de una auditoria en una red de distribución de agua permite cuantificar el volumen de pérdidas, determinar la situación actual de la entidad prestadora del servicio, realizar una comparación con otras entidades prestadoras del servicio que tienen un desempeño óptimo para así realizar una evaluación de calidad y determinar objetivos futuros para el mejoramiento del sistema. La cuantificación de perdidas es el punto de partida para adoptar una estrategia de reducción de pérdidas y optimización del sistema (AWWA, 2003). En los últimos años se han venido desarrollando varios métodos y estrategias para la medición y estimación de pérdidas, en este documento se presentan las más representativas, enunciadas en la Figura 2.



Figura 3. Esquema de métodos

3.2.1 Pérdidas Totales. Una metodología para el dimensionamiento y monitoreo de las pérdidas es la formación de **áreas medias de distritos (DMA)**, descrita por Morrison et al (2007) y Farley (2001), que hace posible dividir una red de distribución de agua en redes de distribución pequeñas, aisladas e independientes (Karadirek, et al, 2012). Un DMA es un área específica generalmente definida por el cierre de válvulas, en la que se mide la cantidad de agua que ingresa y sale del área (Morrison 2007, Thornton 2008). Un DMA monitoreado permanentemente es la herramienta más efectiva para ayudar a reducir la duración de las fugas no reportadas.

Los niveles de pérdidas de agua pueden ser determinados a partir de **balance de agua**, este término se presentó por primera vez por Lambert and Hirnen (2000) (AL-Washali et al., 2016) . Este balance es basado en mediciones o estimaciones del agua producida, importada, exportada, usada y pérdida. Los componentes del balance hídrico, necesarios para la cuantificación de las pérdidas, son el cálculo de volumen de entrada del sistema, el cálculo de consumo autorizado y el agua no facturada que equivale a la suma de pérdidas (reales y aparentes) con un consumo de agua no facturado (Caicedo & Blanco, 2017) . Para el cálculo de pérdidas se han estimado dos tipos de métodos complementarios los de evaluación descendente y los de evaluación ascendente (Puust,

Kapelan, Savic, & Koppel, 2010). Los primeros estiman las pérdidas a través del balance hídrico, basados en la estrategias de evaluación y monitoreo de perdida de agua, estrategias de planificación de medidas y la implementación de acciones reactivas y proactivas de fugas y la detección de conexiones ilegales (AL-Washali et al., 2016). Los métodos ascendentes se consideran una segunda parte del proceso ya que solo puede ser aplicado cuando se han confirmado los datos utilizados por el método descendente (Caicedo & Blanco, 2017). Esta evaluación se puede realizar por medio de una medición horaria durante 24 horas o por un análisis de flujo nocturno mínimo (Liemberger & Farley, n.d.).

Tabla 4.

Adaptación al español del International Water Balance propuesto por la IWA

Volumen de entrada al sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado facturado	Consumo facturado medido	Agua facturada
		Consumo autorizado no facturado	Consumo facturado no medido	
		Consumo autorizado no facturado	Consumo facturado medido	
		Pérdidas aparentes (comerciales)	Consumo facturado no medido	
	Pérdidas de agua	Pérdidas aparentes (comerciales)	Consumo no autorizado	Agua no facturada
		Pérdidas reales (físicas)	Inexactitud de la medición y errores en el manejo de los datos de lectura de medidores	
			Fugas en tuberías de conducción y en redes principales de distribución	
			Fugas y desbordamiento en tanques de almacenamiento	
			Fugas en acometidas	

Nota: Esquema de balance hídrico. Adaptado de: CRA (2014).

Cuando los datos con los que se ha realizado el balance de agua no son confiables, se recomienda que posterior a este se realice un **análisis de componentes**, para así verificar la veracidad de los resultados. Las componentes para analizar son las siguientes: pérdidas en nodos y conductos de distribución, fugas y volúmenes desbordados en embalses, pérdidas en ramas de conexiones (hasta el contador).

Los volúmenes de pérdidas en nodos y conductos de distribución se obtienen a través de la siguiente formula (Lambert, 1994):

$$\begin{aligned} & \text{Volumen de pérdida (m}^3\text{)} \\ &= \text{tasa de flujo de fuga promedio } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right) * \text{Número de fugas} \\ & \quad * \text{Duración media (d)} \quad (1) \end{aligned}$$

A esté valor se le debe adicionar el volumen de agua perdido a través de fugas de base, estas fugas son casi imposibles de detectar y reparar por tener caudales muy bajos, sin embargo, a través del tiempo representan pérdidas de grandes volúmenes de agua.

La componente de fugas y volúmenes desbordados en embalses puede ser fácilmente calculado si existe control de los volúmenes de entrada y salida de los embalses. Para determinar si existen fugas se debe realizar un “**drop-test**”, esta prueba se realiza cerrando las entradas y salidas de agua y analizando el nivel de agua, si este desciende es porque existen fugas, y la velocidad con la que desciende permite calcular el caudal de fuga. Para calcular los volúmenes perdidos por desbordamientos, es necesario analizar la entrada y salida de los caudales durante su funcionamiento normal, sin embargo, este fenómeno ocurre principalmente durante las noches cuando los consumos son bajos y la cantidad de agua que entra es mayor que la sale.

La tercera componente, pérdidas en ramas de conexiones es la más difícil de calcular, principalmente porque estas pérdidas son difíciles de detectar y localizar, ya que normalmente

tienen pequeños caudales, que no logran ser detectados, muchas veces hasta pasados varios meses e incluso años, estas fugas son conocidas como fugas de fondo. Actualmente existen varios modelos y metodologías para la estimación específica de estas pérdidas que se desarrolla más adelante.

3.2.2 Reales. Una importante metodología para la estimación de pérdidas reales es el *análisis del flujo nocturno (MNF)*, que es el flujo más bajo hacia el DMA, calculado entre las 2:00 – 4:00 a.m. por todo un año, ya que considera que el uso es muy bajo y por tanto predominan las fugas, se calcula (Chisakuta et al. 2011; Farley y Trow 2007):

$$NNF = MNF - LNF \quad (2)$$

Donde NNF =Flujo nocturno neto, MNF = flujo mínimo nocturno y LNF= flujo nocturno legítimo. El LNF es toma como una suposición de 6% de la población activa (Hamilton and McKenzie 2014). A partir de la descarga de área fija y variable (FAVAD) (Lambert 2001), calcula el NNF

$$\frac{L1}{L0} = \left(\frac{P1}{P0} \right)^{N1} \quad (3)$$

Donde:

L: Fugas, P: Presiones y N1 es un exponente de fuga que depende del material y área de la tubería, generalmente se toma 0.5 para áreas fijas (Tubería rígidas), 1.5 para áreas variables (PVC o polietileno) y 1.5 para tuberías mixtas.

Por lo tanto, conociendo la relación de fuga presión y el valor del exponente N1, el volumen de fuga se puede calcular, con la ecuación anterior, sin embargo para obtener el volumen de fuga diario (o pérdidas reales), se debe calcular un factor de día y noche (NDF), este es un factor que relaciona a tasa de fuga nocturna con la tasa de fuga diaria (Morrison et al. 2007)

$$\text{Volumen de fuga diario} = NDF \times MNF \quad (3)$$

Donde el NDF, es

$$NDF = 24 * \text{Presión media diaria} * P_{min} \quad (4)$$

El MNF permite medir satisfactoriamente las pérdidas reales del sistema. Girol (2008), utilizó la metodología junto con el software Epanet Calibrator para estimar las pérdidas reales en una red de distribución de agua en Capinzal, Santa Catarina (Brasil), donde se realizaron unos estudios de campo para determinar el exponente $N1$ entre 1.54-1.74. Hunaidi y Brothers (2007), también estimaron las pérdidas físicas con esta metodología en Ottawa (Canadá), donde encontraron que más sencillo identificarlas entre la 1:00 - 3:00 o 1:30 – 3:30 horas. Peters e Ben -Ephraim (2012) utilizaron esta metodología también para estimar pérdidas en la Republica de Guayana, y encontraron que la estimativa de pérdidas reales funciona en países desarrollados, en países en desarrollo como era el caso es necesario realizar adaptaciones a la metodología para poder tener en cuenta factores como bajas densidades de conexiones por kilómetro de red, bajas presiones, diámetros menores que los tabulados, clima y tipos de suelos que pueden influenciar la precisión de la estimación.

La metodología propuesta por Allan Lambert (1994), ***Ráfaga y estimación de fugas de fondo (BABE)***, predice las pérdidas de agua provocadas por condiciones específicas del funcionamiento de la red. Esta metodología define dos tipos de fugas: de fondo (background) y tipo ráfaga (burst). Se considera que la duración de una fuga está compuesta por tres fases: detección, localización y reparación.

Para calcular el volumen de fuga utiliza la siguiente ecuación (Washali T. et al., 2016):

$$V = N * Q * T \quad (5)$$

Donde; V es el volumen de la fuga, N es número de fugas, Q la tasa de flujo de fuga y T la duración de la fuga. Con factores BABE, generalmente se calcula la estimación de pérdidas anuales inevitables (Washali T. et al., 2016):

$$UARL(L/serviceconnection/day) = (18 * \frac{Lm}{Nc} + 0.80 + 0.025 * Lp) * P \quad (6)$$

Donde; Lm es la longitud de la red en Km, Nc el número de conexiones del servicio, Lp es la longitud total en km de tubería sub-privada de conexiones (calle-cliente), P la presión media de trabajo en m.

Otra importante herramienta para la estimación y cálculo de pérdidas reales son los **modelos hidráulicos**, que permite analizar y prever el comportamiento hidráulico de la red de distribución. Para que un modelo hidráulico pueda ser implementado, es necesario tener conocimiento previo de la distribución de los consumos esperados, diámetros, cotas, longitud del conducto, entre otros. Este es un procedimiento largo, que implica bastante trabajo tanto en campo y procesamiento de datos, pero que trae muchas ventajas, ya que esta es la forma más realista de predecir el comportamiento de una red y permite proyectar cualquier parámetro de la red de abastecimiento.

Hoy en día ya existen muchos modelos enfocados en sistemas de distribución de agua, que permiten ver y proyectar cualquier parámetro de la red de abastecimiento.

Wu y Sage (2006) elaboraron un modelo hidráulico para ayudar a detectar y localizar las pérdidas de agua en redes de distribución, la calibración del modelo se formula como un problema de optimización no lineal que se resuelve mediante un algoritmo genético. El método se desarrolla integrando una simulación hidráulica y modelado de optimización. La calibración del modelo incluye factor de rugosidad, ajuste de demanda, estado de operaciones de enlace (tuberías, válvulas y bombas). La calibración optimizada se define como un problema de optimización no lineal para un paso de tiempo t. Las fugas y pérdidas de agua se modelan como la demanda, para aplicar el

método de calibración la demanda de cada unión se descompone en una demanda representativa y un ajuste de demanda. La demanda representativa se define como una demanda de línea de base (cantidad fija, demanda diaria promedio, hora pico, etc.) y un patrón de demanda (coeficiente de variación diurna durante 24 horas), que se determina utilizando los datos de consumo medidos y la medición de flujo. Para hacer una buena estimación de pérdidas de agua a través de este enfoque de calibración, se debe registrar la entrada total del sistema, las condiciones límites y el tiempo de recopilación de datos para proporcionar una calibración precisa de la demanda.

Giustolisi (2008) creó un modelo de simulación estático que considera que las pérdidas de agua varían con la presión del sistema (pressure-driven) y es capaz de cuantificar simultáneamente las demandas impulsadas por presión y fugas. El modelo se desarrolla integrando completamente las demandas del sistema a nivel de tubería en el modelo hidráulico. La comparación de los flujos de fuga para redes diseñadas usando simulación impulsada por la demanda bajo el supuesto de una fuga nodal porcentual constante, muestra que la simulación realista del flujo de fuga resulta en presiones generalmente más altas a través de una red que para la simulación impulsada por la demanda. El aumento general de las presiones de red para las redes específicas (elevaciones, topología, demandas nodales, etc.) se explica por la disminución del flujo general a través de las tuberías debido a una mayor fuga en los nodos con alta presión (por ejemplo, cerca de tanques). Varios autores consideran que el modelo “pressure-driven” es la forma más realista de predecir el comportamiento de una red, dado que ciertos consumos son dependientes de la presión, como es el caso de las fugas (Araujo. 2006; Tabesh, 2008; Nazif, 2009; Gomes, 2011; Muranho, 2014).

De otro lado Kazeem, et al. (2017) presentan un procedimiento para el cálculo de fugas de fondo el cual las detecta por medio de un algoritmo que integra un modelo de fugas en un modelo hidráulico esto permite la detección y estimación de segmentos o ramas críticas de la red que

experimentan una mayor salida agua y un punto de la red donde se puede realizar un control de presión, por medio de $qnleak$, el vector de flujo de fuga nodal

$$qnleak = \frac{1}{2} \Psi \bar{Q} \quad (7)$$

Y el flujo a lo largo de una tubería, expresado como:

$$\bar{Q}_j = \begin{cases} \beta_j L_j (P_j)^\delta, & \text{if } P_j > 0 \\ 0, & \text{if } P_j \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

Tabesh, et al. (2008) realiza un modelo de fuga integrado que puede calcular y evaluar los componentes del NRW y las pérdidas reales, esto lo hace por medio del análisis del “balance hídrico anual” y el “flujo minino nocturno”, desarrollando los resultados de la estimación del índice de rendimiento de fugas a partir de unos modelos de simulación hidráulicos en EPANET, que se basan en datos de entrada recopilados de una investigación de campo donde se determina; la tasas de fuga nodal y las tuberías de manera más realista posible.

Al reconocer la dependencia de la presión de fuga, el consumo total se divide en dos partes, uno dependiente de la presión y el otro independiente, esto con el fin de analizar el comportamiento hidráulico de la red y desarrollar un código para evaluar todos los componentes de las pérdidas de agua. Los resultados de salida se exportan y se analizan mediante un modelo SIG.

Boulos y AbouJaouda (2011) describen una metodología para para el cálculo de pérdidas con un análisis de los caudales combinado con un modelo hidráulico. Sensores de caudales son instalados en determinados puntos del sistema y una comparación en la diferencia de los caudales medidos en campo con el modelo hidráulico permiten estimar las perdidas.

Buchberger y Nadimpalli (2004) realizaron un **análisis estadístico** de datos de alta resolución (intervalos de un segundo) en redes con pérdidas simuladas, y concluyeron que es posible deducir las pérdidas de los datos de los caudales. Sin embargo, datos con esa frecuencia son raramente

producidos por las empresas de servicios públicos y el análisis depende de la creación de DMA pequeños, con menos de 1000 residencias para obtener resultados confiables.

El desarrollo en recientes campos de la inteligencia computacional, llamadas modelo basado en datos o monitoramiento y detección online, están ayudando a resolver varios problemas en el dominio de los recursos hídricos. Estas técnicas son ideales para analizar problemas donde las soluciones necesitan ser desarrolladas sin resolver las interacciones a microescala, pero donde los datos medidas están fácilmente disponibles. En la medición y estimación de pérdidas, las más destacadas son filtros de Kalman, redes neuronales artificiales, modelos Bayseanos, también se conocen otros métodos de control estadístico de procesos y modelos de series de tiempo.

El *filtro adaptativo de Kalman* se usa para modelar el uso normal de agua o alternativamente la presión del agua, por lo tanto, el residuo del filtro (la diferencia entre el flujo predicho y el flujo medido) representa la cantidad de uso anormal del agua en relación con las fugas, es decir, el método aplica una prueba de ingeniería con explosiones simuladas y luego datos de otras áreas de DMC con ráfagas y fugas reales (Ye y Fenner, 2011).

Un filtro de Kalman es un algoritmo de procesamiento de datos recursivo óptimo para el sistema dinámico estocástico lineal (Bar-Shalom y Fortmann 1988). Utiliza toda la información de las mediciones y la dinámica de estado del sistema y toma en cuenta sus incertidumbres para producir una estimación óptima. Las incertidumbres se modelan como funciones gaussianas, por lo que, si la serie temporal sufre de ruido blanco gaussiano, el filtrado de Kalman procesa los datos para estimar de donde procede esta señal.

Ye y Fenner (2011) utilizan el filtrado de Kalman para estimar el parámetro hidráulico normal (flujo o presión) en el sistema de distribución de agua del norte de Inglaterra, donde se detecta una explosión a través del residuo del filtro, que es la diferencia entre la estimación y la medición. Esto

lo realizan a través de la medición de la presión de flujo y presión en la tubería de entrada del área del medidor de distrito (DMA) y aplicar los residuos normalizados de flujo y presión en su análisis de detección de estallidos.

Las **redes neuronales artificiales (ANN)** se han aplicado ampliamente en diferentes campos de la ingeniería y son un enfoque de modelado basado en cómo se cree que funcionan los sistemas neuronales biológicos. Mounce, et al. (2003), utilizaron un sistema basado en ANN en datos de series temporales producidas por sensores para construir un modelo empírico para la predicción y clasificación de fugas. Un sistema basado en reglas realiza una fusión en las salidas de las ANN para producir una clasificación de estado general para un conjunto de zonas.

En el 2007 Mounce y Machell presentaron una investigación sobre la aplicación de redes neuronales artificiales (ANN) para el análisis de datos de sensores que miden parámetros hidráulicos (flujo y presión) del flujo de agua en sistemas de distribución de agua tratada, donde aplicaron dos ANN, para la clasificación de patrones de series de tiempo desde la perspectiva de detectar fugas.

Mounce, et al. (2010), presentaron un modelo de ANN, una red de densidad mixta, utilizando una base de datos histórica continuamente actualizada para construir un modelo de densidad de probabilidad del perfil de flujo futuro. Se usó un sistema de inferencia difusa para la clasificación; comparó los últimos valores de flujo observados con los flujos pronosticados a lo largo de ventanas de tiempo, de modo que en caso de condiciones de flujo anormales se generan alertas. A partir de las funciones de densidad de probabilidad de los flujos pronosticados, el sistema de inferencia difusa proporciona intervalos de confianza asociados con cada detección, estos valores de confianza proporcionan información útil para filtrar y clasificar las alertas.

Poulakis, Z., et al. (2003), utilizaron el **modelo bayesiano** para la estimación de la probabilidad de fuga, para ello utilizaron una simulación hidráulica para la simulación de la red de tuberías de agua. Las ecuaciones de flujo a resolver consisten en las ecuaciones de conservación de masa en los nudos de unión y las ecuaciones de conservación de energía, el sistema se resuelve utilizando un esquema de iteración de Newton. Una vez que se estiman las tasas de flujo de la tubería, el grado de energía en los nodos se estima. La detección de fugas se basa en que el daño en una o más ubicaciones de la red de tuberías involucra con la salida de agua en el lugar de la fuga, lo que al cambiar las características de flujo (cabezales de presión, caudales, señales acústicas, etc.) en las ubicaciones de monitoreo de la red de tuberías las calcula. La magnitud de los cambios en las características del flujo depende de la posición y la gravedad del daño (cantidad de flujo de salida). La existencia de fugas en la red de tuberías se diagnostica al monitorear los cambios permanentes en las características de flujo del sistema. Una vez que se ha diagnosticado la existencia del daño, es posible mediante la actualización del modelo hidráulico a través de un conjunto completo de parámetros para identificar la ubicación y la gravedad del daño.

D. Misiunas, et al. (2006), presentan una metodología denominada **control estadístico de procesos** para la detección y localización de explosiones repentinas en redes de tuberías basada en el monitoreo continuo de la presión en dos (o más) puntos dentro de la red y la teoría transitoria hidráulica. La técnica se basa en el monitoreo continuo en tiempo real de la entrada y la presión de la red, por lo tanto, la explosión se detecta y localiza directamente después de que ocurre y el tiempo de aislamiento se puede minimizar para evitar las grandes pérdidas asociadas con la falla de la tubería.

En la Tabla 5 se presentan un resumen de los métodos.

3.2.3 Aparentes. Las pérdidas aparentes son causadas por errores de medición y consumos no autorizados, normalmente ocurren en: lectura de los registros (falla humana), mal funcionamiento de los equipos de medición, errores de medición de los contadores, dificultad para acceder a los equipos y errores derivados de instalaciones deficientes. La mayor parte de estos errores sucede en contadores localizados cerca de la propiedad de los usuarios, los cuales van perdiendo su sensibilidad a través de los años.

Tabla 5.

Métodos de estimación y cálculo de pérdidas reales

Método	Ventajas	Limitaciones	Requerimientos	Problemas de precisión
Balance de Agua	No depende de la presión. Económico. Suposiciones claras y mejorables.	Se enfoca en pérdidas reales. El enfoque de suposición congela la variable supuesta Suposiciones inadecuadas de las pérdidas aparentes para países en desarrollo. No hay metodología para estimar el consumo no autorizado	Datos disponibles Estimación del consumo no autorizado Estimación de las imprecisiones de medidores	La precisión del método depende de la precisión de los supuestos de pérdidas aparentes. Esto debería ser crítico cuando el consumo no autorizado es significativo El método probablemente sobreestima las pérdidas reales
Análisis MNF	Mediciones reales.	Trabajo intensivo de campo.	Equipos sofisticados.	Los datos son propensos a una

Método	Ventajas	Limitaciones	Requerimientos	Problemas de precisión
	Proceso de evaluación y reducción.	Requiere mano de obra específica. Depende de la presión.	Zonificación de la red. Capacidad técnica	mala instalación técnica. Representativa de la DMA
Factores BABE	Sencillo. El único método que divide las pérdidas reales en subcomponentes. Considera las condiciones de la estructura. Aclara la naturaleza de la fuga.	Depende de la presión. Suposiciones intensivas. Los factores del modelo no están calibrados para otros casos de estudio. Aplicable solo a empresas de servicios públicos que tienen un control de fugas activo regular	Mediciones de presión. Registros de mantenimiento. Longitudes de red y número de conexiones con el cliente.	La presión promedio de toda la red siempre es cuestionable y rara vez es precisa. Suposiciones no representativas. El método probablemente subestima el volumen de pérdidas reales. Baja precisión en general.
Modelos Hidráulicos	Permiten ver y proyectar cualquier parámetro de la red de abastecimiento. La forma más realista de predecir el	Requiere de un amplio trabajo tanto en campo como en oficina. Requiere de mano de obra especializada. Costosa	Conocimientos previos sobre la distribución de los consumos esperados, diámetros, cotas, longitud del conducto, entre otros.	La precisión del modelo hidráulico depende de la confiabilidad de los datos con los que es realizado.

Método	Ventajas	Limitaciones	Requerimientos	Problemas de precisión
	comportamiento de una red			
Análisis Estadístico	Solo requiere del conocimiento de los caudales	Se requieren de datos de amplia resolución	Caudales	La confiabilidad de los datos depende de la creación de DMA pequeños, con menos de 1000 residencias para obtener resultados confiables
Filtro adaptativo de Kalman	Eficiencia computacional, las tasas de detección rápida y no requiere requisitos para grandes cantidades de datos de entrenamiento Autosupervisión	Tienen que ser entrenados con los datos normales de tres meses típicos y actualizados cada mes. Es difícil detectar fugas estables, a menos que el método esté calibrado. Puede generar falsas alarmas asociadas con grandes eventos deportivos o condiciones climáticas extremas	Flujo, caudal o presiones	Los datos de medición de flujo son más sensibles a una explosión o fuga que los datos de medición de presión. El rendimiento de NKF en la detección de ráfagas debe confirmarse con datos reales del sistema

Método	Ventajas	Limitaciones	Requerimientos	Problemas de precisión
Redes Neuronales Artificiales	Útil para el reconocimiento de patrones, el aprendizaje, la clasificación, la generalización y la abstracción y la interpretación de datos incompletos o ruidosos	Solo detecta fugas tipo ráfaga. Se necesita personal especializado con una gran cantidad de conocimientos previos.	Datos de series temporales producidas por sensores, especialmente los calculados en el análisis MNF	La efectividad de la ANN en el descubrimiento de relaciones dentro de los datos dependerá de dos factores clave: disponibilidad de ejemplos suficientes (se necesitan muchos ejemplos de capacitación y estos deben ser representativos del espacio de características) y la calidad de esos ejemplos: un problema para una red de distribución de agua es el registro preciso y consistente de eventos en el sistema.
Modelo Bayesiano	Se hace un uso explícito de la probabilidad para cuantificar la incertidumbre	Se deben eliminar errores provocados por la modelación y errores de medición.	Datos de eventos históricos	Se hace un uso explícito de la probabilidad para cuantificar la

Método	Ventajas	Limitaciones	Requerimientos	Problemas de precisión
	de la interferencia. Representación gráfica, modelo cuantitativo y cualitativo, interferencia bidireccional, análisis de sensibilidad, incertidumbre y valores de confianza.	Estructuras de modelo de dominio, variables ocultas, probabilidades inconsistentes		incertidumbre de la interferencia

Hasta el momento no se ha desarrollado un método estándar para la estimación de pérdidas aparentes, pero una investigación realizada por Xin, et al, (2014), basado en el método de la IWA desarrolla una metodología para estimar los errores de medición en la aplicación del análisis de estructuras de medición especial en la gestión de DMA en suministro de agua. El método en primer lugar aplica los datos conocidos para establecer las funciones de los errores de medición sobre fugas, consumos ilegales, y otros factores de pérdidas aparentes por medio de la curva de variación; posteriormente el error de medición se calcula mediante un algoritmo genético con el modelo integrado basado en la auditoría de balance de aguas IWA.

Para estimar el deterioro en presión del medidor y la edad promedio, Couvelis y van Zyl (2015) realizaron un estudio que consistió en combinar la estimación del nuevo medidor debido a fugas y el medidor con envejecimiento. Concluyen que el error por subregistro del medidor debido a fugas

en el sitio es el 2.2% y debido al envejecimiento es del 2.6%. Se recomienda un valor de perdidas aparentes del 5% del consumo

Mutikanga, et al. (2011), también realizaron un estudio respecto al rendimiento de los medidores, agrupando medidores en función del registro total en lugar de la edad. Para evaluar el margen de error del medidor con respecto al medidor tipo, se instalan medidores tipo de monitoreo y se toman lecturas de medidores semanales y mensuales por un periodo de 4 meses. Esto se realizó después de unas exhaustivas investigaciones para eliminar cualquier fuga, uso ilegal y derivación del medidor entre el medidor tipo y el micromedidor. La diferencia entre las lecturas inicial y final para cada uno de los medidores se obtuvo y se tomó como el volumen de consumo de agua a través del medidor. El agua total de todos los submedidores para cada una de las propiedades fue obtenido y comparado con el consumo del medidor tipo por el mismo período de tiempo. Se obtuvo la diferencia total para todas las propiedades y se expresó como un porcentaje de volumen total del medidor; esto fue tomado como el error de medición debido a la micromedición.

Richards, et al (2010), describe dos métodos para estimar las pérdidas aparentes causadas por la imprecisión del medidor a flujos bajos. El método de perfil de flujo AWWA para estimar las pérdidas de agua, requiere de una estimación del porcentaje del uso total del agua en diferentes rangos de flujo, así como la precisión promedio de los medidores en esos rangos. Esta precisión puede ser estimada realizando pruebas con una muestra significativa, aunque si no puede realizarse se usan las especificaciones del fabricante (AWWA, 2009). Para utilizar el método AWWA es necesario un perfil de flujo en incrementos mucho menores a 1 gpm y conocer el volumen total del agua suministrada anualmente para el sistema. Con estos datos calcula el volumen de agua perdido por error del medidor (ME)(Richards, G., et al, 2010);

$$ME = \sum V_t * F_t(1 - 0.01 * R_i) * (1 - 0.01 * U_i) \quad (9)$$

Donde V , es el volumen total de agua suministrada por un sistema, F_N es la fracción del consumo total sobre un rango de flujo dado, R_i es el porcentaje de registro sobre el mismo rango de flujo (es decir, 95,5%), y U_i es el porcentaje de tiempo que el medidor está registrando otro flujo (es decir, 10%).

El otro método utilizado es la distribución del método de fugas cuantificadas, este método requiere estimaciones con respecto a la distribución de fugas de diferentes caudales, precisión del medidor y el caudal, al igual que en el primer método se hacen varias suposiciones.

En primer lugar, se debe, se estima el porcentaje de fugas que ocurren agua abajo de un medidor residencial) (Richards, et al, 2010).

$$ME = \sum (1 - 0.01 * R_i) * (1 - 0.01 * U_i) * V_i \quad (10)$$

$$V_i = Q_i * L_i * N * F_N \quad (11)$$

Donde ME es el volumen de agua perdido por error del medidor, R_i es el registro promedio del medidor a un caudal dado (es decir, 95,5%), U_i es el porcentaje de tiempo que el medidor está registrando otro flujo (es decir, 10%), V_i es el volumen de agua consumida anualmente a un caudal dado, Q , es el dado flujo o velocidad de fuga convertida en un flujo anual (es decir, 0,0625 gpm corresponde a 32.850 gal anuales), L , es la fracción de total de fugas que ocurren a ese caudal particular, N es el número de conexiones servidas por el sistema, y F_N es la fracción de conexiones del sistema que se asumen para tener una fuga aguas abajo del medidor (es decir, 0,25 corresponde al 25% de las conexiones del sistema que tienen una fuga).

Criminisi, et al (2009), analizan el papel de dos variables que influyen en las pérdidas aparentes: la edad del medidor de agua y el efecto del tanque de almacenamiento privado en el rendimiento del medidor. El impacto del envejecimiento del medidor se evaluó en laboratorio se les realizaron pruebas a 180 medidores, con edades entre los 0 y 45 años. Los efectos de los tanques privados se

determinaron mediante el monitoreo de campos de usuarios reales y un modelo matemático. Se concluyó que el error de la medición es directamente proporcional a la edad del medidor, también que el tanque de almacenamiento privado genera errores considerables solo si se mantiene casi lleno ya que así los errores del medidor del flujo se amplifican, si el tanque se vacía y se llena periódicamente los errores son insignificantes.

Moahloli, et al (2019), analizaron una base de datos del medidor de agua utilizando el método de error relativo del medidor para determinar si existe una relación entre la edad del medidor, el volumen total registrado y la precisión. Este estudio no encontró relación entre la edad del medidor de agua y el volumen total registrado, se encontró una relación entre la edad y la precisión del medidor de agua y también entre el volumen total registrado y la precisión.

Ncube y Taigebenu (2018), también realizaron un estudio para la evaluación de pérdidas teniendo en cuenta la inexactitud del medidor, a través de un método mejorado de análisis de agrupamientos y de regresión. Se encontró una estimación promedio para una empresa de servicios de agua en Johannesburgo, Sudáfrica, de un promedio de perdidas aparentes 8,2% a 9,4%.

3.3 Gestión de pérdidas

La estimación y cálculo de pérdidas permite determinar la existencia de las pérdidas y la magnitud del problema, a partir de estas se buscan estrategias de gestión y control de estas pérdidas para lograr reducirlas al máximo y optimizar los recursos y funcionamiento de la red. La gestión de la pérdida de agua está intrínsecamente vinculada a cómo operan y funcionan los servicios de agua (Chinokoro, 2007).

3.3.1 Localización de pérdidas. La localización es necesaria para ubicar con precisión los puntos específicos de las fugas existentes (Pilcher, 2003). Puust et al. (2010), clasifica los métodos de localización de fugas en aproximados y exactos. Las técnicas de localización aproximada más utilizadas son; step-test y loggers acústicos, y las técnicas de localización exacta son; sensores acústicos, inspección visual, sensores térmicos y radares de penetración del suelo.

Localización de pérdidas aproximada

El **step-test** es un método de localización de fugas basado en un registro continuo del flujo ingresado en la zona de control y el cierre progresivo de las válvulas. Las válvulas se cierran desde el extremo más alejado de la red hasta la ubicación más cercana del medidor del flujo, con el fin de verificar que el flujo disminuya a cero gradualmente, de acuerdo con el consumo de la zona aislada (Gomes, 2011).

Los **loggers** son aparatos acústicos que se esparcen por la red. Estos dispositivos captan el sonido generado debido a la fuga en la tubería, lo que hace posible la localización de fugas. Water Research Centre, creó un dispositivo de correlación de ruido digital (Ozevin y Harding, 2012), este determina las diferencias de tiempo de llegada utilizando la función de correlación cruzada y la conectividad geométrica para identificar las rutas que las ondas de fuga deben propagar para llegar a los sensores.

Localización de pérdidas exactas

La **inspección visual** es el método tradicional para la detección de fugas, generalmente se mandaban patrulleros que recorrían la estructura buscando señales de fugas, como: afloramiento de agua a la superficie, demasiada vegetación en solo cierta área, crecimiento de musgos o suelo saturado (Gomes, 2011). Esta técnica es generalmente simple, pero es muy lenta e ineficaz.

Los **sensores acústicos** funcionan de forma similar a los loggers, sin embargo, mientras los loggers están fijos a las tuberías, los sensores están integrados en dispositivos móviles que pueden usarse dentro o fuera de las redes y se basan en señales de sonido y vibraciones inducidas por las fugas. Los dispositivos acústicos, como las listening rods, ground microphones, registradores de ruido y los correlacionadores de ruido son los más usados para la detección y ubicación de fugas (Clark 2012, Hartley 2009). Los “ground microphones”, son sensores acústicos los cuales tienen un alcance limitado de 1.3m a 3m (Puust et al 2010), estos dispositivos se ven afectados por el ruido externo, por esto es mejor usarlos de noche cuando el ruido externo es bajo y las presiones en la tubería son más altas, lo que indica un mayor caudal de pérdida y más ruido. También es posible que el ruido no viaje a través de la tubería, esto depende del tipo de fuga, material de la tubería, saturación del suelo, entre otras. Las “smart balls” e hidrófono de natación, son dispositivos que se introducen en la tubería e identifican la señal de fuga al pasar por a posición de la fuga.

Los **radars de penetración** emiten ondas que pueden detectar cavidades en el suelo, cuando estas encuentran una perturbación reflejan un patrón anormal, revelando el tamaño y la forma de la cavidad (Gomes, 2011). Son ideales cuando los sensores acústicos no son una opción debido al ruido, sin embargo, como es una tecnología a gran escala es bastante costosa (Pilcher, 2003).

Los **sensores térmicos**, a pesar de ser una tecnología prometedora esta aún en desarrollo sumado a que de momento es muy costosa (Fanner et al., 2007). El suelo saturado tiene diferentes características térmicas y a partir de unas cámaras infrarrojas se puede identificar fácilmente.

Monitoreo de flujo y presión, las fugas son un flujo inesperado que puede causar aumento de flujo y disminución de la presión, que son notables si la fuga es lo suficientemente grande (Xu, et

al. 2014), esto se nota en un aumento repentino y constante en el MNF, cambios en el patrón de flujo y caída repentina de la presión.

Existen otros enfoques como ondas de presión transitoria, donde la existencia de fugas puede imponer una reflexión de onda en una señal transitoria entrante y alterar la respuesta de presión del sistema al mediar las características de la onda de presión transitoria se pueden detectar fugas (Colombo et al., 2009).

3.3.2 Gestión de Pérdidas Reales. Lambert et al. (2005), a partir de la Figura 7, plantea los principios esenciales para una gestión efectiva de pérdidas reales.

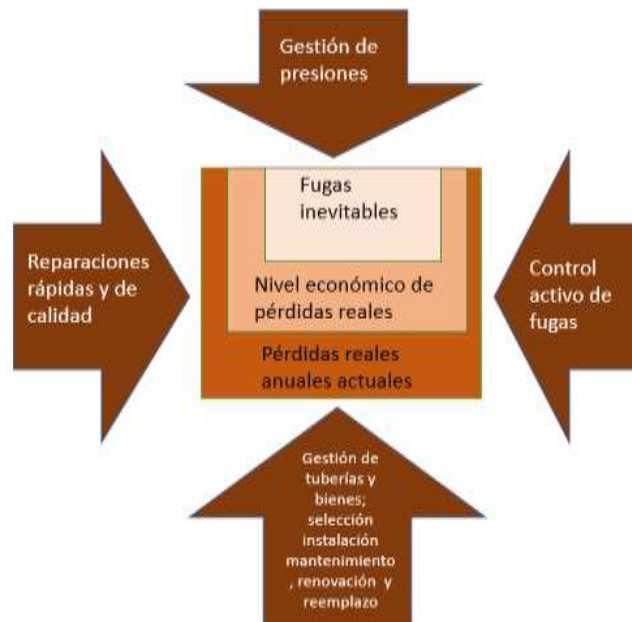


Figura 4. Gestión de pérdidas reales. Fuente: Adaptado de Lambert (2005)

La **gestión de presión** es una herramienta importante para la reducción de pérdidas reales, ya que las fugas se pueden controlar reduciendo el exceso de presión en los sistemas ya que así, también se reduce la posibilidad de explosión del conducto (Adedeji et al. 2018). La gestión de

presión puede ser controlada por medio de programaciones y predicción de demanda, válvulas reductoras de presión, sectorización, control de nivel y desbordamientos en embalses (Lambert, 2002).

Walski et al (2006) proponen un modelo de computadora para demostrar como la reducción de presión afecta las fugas, esto lo hacen a partir de un sistema de distribución donde simula como a partir de un modelo se pueden evaluar la configuración de presiones, estimar la reducción de fugas y posibles problemas de presión. La reducción de presión es más efectiva cuando tanto la fuga como la presión son relativamente altas, esta es controlada a partir de una válvula reductora de presión o una bomba de velocidad variable. Sin embargo, la hora del día es muy importante para que funcione el control de la presión, la reducción de presión durante la hora pico puede llegar a causar deficiencias de presión en la red.

Nazif, et al (2009), utiliza un modelo de optimización basado en el algoritmo genético (GA), para la optimización del nivel de almacenamiento de agua en el tanque para la reducción de presión. Los resultados de un modelo de simulación propuesto se utilizan para entrenar un modelo de Red Neural Artificial (ANN), los resultados del modelo ANN como función de presión hidráulica se vinculan a un modelo de optimización basado en GA para simular la presión hidráulica y fugas en cada nodo de la red de distribución de agua en función del nivel de agua en el tanque de almacenamiento, el consumo de agua y la elevación de cada nodo.

La reducción de presión por válvulas reductoras de presión (PRV), puede ser de tres tipos: salida fija, modulada en el tiempo, modulada en flujo. El método de salida fija utiliza una válvula de control básica operada hidráulicamente. La modulada por tiempo es un dispositivo de sincronización para reducir la presión en ciertos momentos del día (McKenzie, 2011). La modulación de flujo controla la presión del DMA en función de la demanda.

Creaco y Pezzinga (2014), desarrollan un algoritmo híbrido multiobjetivo para el **Control activo de fugas** mediante la optimización combinada de tuberías y válvulas de control para la reducción fugas en las redes de distribución de agua, este se usa para la colocación óptima de válvulas de control también se utilizan tecnologías de sensores inalámbricos que proporciona monitoreo en línea en tiempo real de la infraestructura de agua.

Pretner et al, (2008) desarrollaron una herramienta para la detección integral de fugas (TILDE), que a partir de una gestión integrada y análisis de todos los datos provenientes de sensores de flujo y presión, el sistema identifica la ubicación de la tubería, donde se requiere la reparación debido a fugas.

SCADA es un sistema de control de supervisión y adquisición de datos (Mounce et al., 2007), este sistema realiza un análisis a los datos recopilados por medidores inteligentes. También se han demostrado el uso de presiones inalámbricas, medidor inteligente y red de sensores de flujo.

Reparaciones rápidas y de calidad

Una vez que la tubería se encuentre deteriorada se deben tomar decisiones para la reparación, rehabilitación y/o reemplazo de tuberías. El reemplazo de la tubería es trocar la tubería vieja por una nueva esto restaura completamente la condición de la tubería, la reparación, es reemplazar una fracción bastante pequeña de la tubería en comparación con su longitud, y la rehabilitación es una variedad de operaciones de mantenimiento en la tubería. Ya que la reparación de tuberías requiere un menor costos y el reemplazo uno mayor, se debe considerar cuidadosamente que decisión tomar.

Entre los modelos de optimización para calcular el tiempo óptimo para reemplazar tuberías, se encuentra el modelo de predicción de roturas de tuberías (Shamir y Horward, 1997), en donde establecen que:

$$F(\text{costo}) = \text{Costo total de reparación} + \text{Costo reposición tubería}$$

En donde el tiempo óptimo de reemplazo de la tubería se obtiene minimizando la función de costos. Park y Loganathan (2002), introdujeron el concepto de tasa de ruptura umbral, y cuando la tasa de ruptura real alcanza este valor menos costoso reemplazar que predecir roturas.

Entre los modelos más destacados para priorizar las tuberías para su reemplazo la mayoría se enfoca en clasificar tuberías de acuerdo con la evaluación de prioridades para el reemplazo, por ejemplo; plan de reemplazo del 1% de la tubería por año, pero en lugar del momento más económico es saber que tuberías deben reemplazarse primero (De Oliveira et al., 2010; Ho et al., 2010; Luong y Fujiwara, 2002; Luong y Nagarur, 2005)

Gestión de tuberías y bienes

Las tuberías en un sistema de acueductos representan el mayor costo, por lo tanto, merecen más atención, para esto se sugiere que la empresa adopte un enfoque proactivo en donde se rehabiliten las tuberías y los bienes antes de que estos fallen. Inicialmente se deben identificar los parámetros para apoyar las decisiones sobre el “que”, “donde” y “como” planificar actividades para mejorar el rendimiento del sistema (Ugarelli, 2009). Por esto se recomienda la implementación un sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS) ya que este proporcionara un marco racional para planificar futuras inversiones teniendo en cuenta la evaluación de la condición, los objetivos de rendimiento, el análisis de riesgos y los impactos de soluciones y estrategias alternativas. (Saegrov et al., 2004). Para evaluar el riesgo de falla de la tubería y priorizar las secciones a monitorear, se han desarrollado modelos basados en la física, donde su objetivo es revelar el mecanismo físico detrás del comportamiento de rotura, como la capacidad de resistencia estructural de la tubería disminuye con procesos químicos (corrosión) (Rajani y Kleiner, 2013), y modelos estadísticos, como macro indicadores para predecir roturas de tuberías, para ese se necesitan propiedades de la tubería como

el material, edad, diámetro, longitud y el número de conexiones del servicio (Xu et al., 2011), este modelo ha tenido mucho éxito para evaluar la probabilidad de falla de las tuberías piloto.

3.3.3 Gestión de Pérdidas Aparentes. Para reducir el volumen de las pérdidas Thornton, et al (2008), plantea que debe haber una intervención en las siguientes 4 áreas: equipos de medición, consumos no autorizados, análisis de datos y errores causados por la toma y análisis de datos de manera manual.



Figura 5. Gestión de pérdidas aparentes. Fuente: Adaptado de Thornton (2002)

La pérdida por *inexactitudes en los medidores* es una de las más comunes, estas podrían minimizarse mediante políticas y estrategias de gestión de medidores, tales como tipo y selección de medidores óptimos, control de calidad, dimensionamiento e instalación adecuados, frecuencia de prueba y reemplazo óptimo de medidores (Arregui et al, 2009).

Otra medida de gestión a utilizar para contrarrestar la inexactitud generada por el paso del tiempo en los aparatos es la renovación de micromedidores que ya cumplieron su tiempo de vida útil o que se encuentran en mal funcionamiento.

Arregui et al. (2006) desarrollaron una gestión integrada del medidor de agua (IWMM), este tiene como objetivo mejorar la gestión del medidor de agua desde un punto de vista operativo, que incluye; la selección adecuada del medidor, muestreo y pruebas de control de calidad de los medidores recién comprados, el dimensionamiento adecuado del medidor, instalación adecuada, muestreo óptimo para pruebas y reemplazos.

El **uso no autorizado del agua** es una problemática presentada principalmente en países en desarrollo donde clientes u otros usuarios a través de acciones deliberadas extraen agua del sistema sin pagarla, esta puede ocurrir por medio de conexiones ilegales, anulaciones, manipulaciones y abuso de hidrantes contra incendios. Esto es una problemática sociotécnica que más que soluciones ingenieriles requiere cambios en los comportamientos y actitudes de los usuarios. Para esto se recomienda la detección de usuarios fraudulentos, Mutikanga (2012), plantea un modelo de detección de usuarios fraudulentos por medio de pruebas rápidas, a través de Transient Test-Based Techniques (TTBT), donde se ubican y se muestran las ramificaciones de conexiones ilegales. También se pueden identificar a través de una investigación detallada por medio del consumo y el número de habitantes por unidad de vivienda (Aldana J, 2003). Otras medidas de gestión que pueden ser aplicadas para lidiar con esta problemática puede ser: control riguroso de los flujos en las redes, acciones legales, aplicación de políticas de prepago por el consumo, limitar la presión o medidas de concientización y educación a la comunidad (Thornton, 2002). La amnistía y los incentivos a empleados públicos por informar el uso ilegal del agua son intervenciones que han demostrado ser muy útiles para minimizar las pérdidas (Mutikanga et al. 2011; Lea 2011).

Los errores en el **análisis de datos** pueden reducirse mediante auditorías, inspecciones de rutina o actualizaciones de equipos.

Las pérdidas por **errores humanos** pueden reducirse a través de la capacitación adecuada de los empleados, informes y auditorías regulares. Una herramienta que ha dado muy buenos resultados en el departamento de aguas de Filadelfia es la lectura automatizada del medidor (AMR), eliminando así errores de transferencia de datos, además incluye capacidades de detección de manipulación (AWWA, 2009), esta herramienta también fue implementada en Kampala en un proyecto piloto (Mutikanga et al. 2010).

Cada empresa de servicios de agua debe intentar llevar a cabo su propia evaluación de pérdidas aparentes, para así identificar, cuantificar y desarrollar las mejores estrategias de reducción apropiadas que contribuyan a una reducción significativa de pérdidas.

Tabla 6.

Actividades para la gestión de pérdidas aparentes

Actividades para gestión de pérdidas aparentes	
Gestión de medidores de agua	1. Política de calibración del medidor vigente 2. Prueba de medidor / programas de reemplazo en su lugar 3. Medidor de prueba cada 6 meses 4. Reemplazo del medidor cada 5 a 7 años 5. Política de medición del cliente y estructura tarifaria 6. Dimensionamiento y mantenimiento adecuados de medidores de agua. 7. Monitoreo y control continuo de medidores de agua en las instalaciones de los clientes. 8. Instalación de DMA con gestión de la presión.
Manejo de datos y control de errores de facturación	1. Informatización de los sistemas y cuentas de facturación.

Actividades para gestión de pérdidas aparentes	
	2. Capacitación del personal en nuevas habilidades, técnicas y tecnologías cada 6 meses / año. 3. Facturación y cobro mejorados 4. Supervisión frecuente de datos de facturación y auditoría de facturación anual. 5. Seminario de sensibilización del personal cada 6 meses.
Reducción y control de robo de agua.	1. Encuesta frecuente sobre conexión familiar 2. Mejora de la detección y regularización del fraude. 3. Capacitación del personal y programas de concientización establecidos. 4. Introducción de incentivos y promociones para contadores de agua y fontaneros. 5. Programas de sensibilización social establecidos cada año.

Fuente: Adaptado de Chimene (2013)

3.3.4 Gestión de pérdidas reales y aparentes en países en desarrollo. Las pérdidas de agua varían ampliamente en todo el mundo de 3-7% en Países Bajos (Beuken et al. 2006) al 55% en América Latina (Corton y Berg 2007), 63.8% en Maynilad, Manila en Asia (ADB 2010) y 70 % en Liberia Water and Sewer Corporation en África (WSP 2009).

El problema de pérdidas de agua es más notorio en países en desarrollo, donde la mala gestión del recurso y la corrupción hacen más complicada la problemática. Según la OMS / UNICEF (2010), 884 millones de personas en el mundo no tienen acceso a agua potable y El Banco Mundial estima que más de 16 mil millones de m³ de agua se están perdiendo por pérdidas físicas en países en desarrollo, mientras que más de 10 mil millones de m³ se entregan a los clientes, pero no se pagan (Kingdom et al. 2006).

En países en desarrollo se enfrentan a muchas dificultades, no solo de manejo y corrupción sino también de falta de recursos, además no existe una guía o metodología lineal para abordar las pérdidas de agua en general, y las estrategias basadas en tecnologías de alto nivel o aplicadas en países desarrollados generalmente no se ajustan a la situación real que viven. La mayoría de las empresas prestadoras del servicio en países en desarrollo no cuentan con la tecnología adecuada, tienen una mala gestión de los activos de infraestructura (deteriorada, mal gestionada, tuberías envejecidas, sin mantenimiento) y mala gestión de los medidores de agua (Nhemafuki, 2008).

Las principales dificultades que se encuentran en los países en desarrollo son: sistemas de distribución en riesgo con estructura inadecuada que carecen de DMA debidamente establecidos que carecen de la información pertinente, con sistemas de suministro intermitentes de donde surgen problemas asociados a la medición, no cuentan con las herramientas para apoyar una decisión, donde se pueda evaluar con precisión los beneficios asociados a la gestión de pérdidas para así justificar la inversión, las condiciones socio-económicas y políticas son generalmente muy complicadas donde se viven situaciones de pobreza extrema, altos índices de corrupción, no existen leyes que regulen las conexiones ilegales y no se cuenta con políticas de gestión de pérdidas.

En la Tabla 7 se analizan las medidas de gestión aplicadas a países en desarrollo por medio de la calificación de requerimiento y atributos siendo +++ de alta aplicabilidad, ++ posible aplicabilidad, + poca aplicabilidad.

Tabla 7.

Análisis de medidas de gestión aplicadas a países en desarrollo

Medidas de gestión aplicadas a países en desarrollo		
1. Localización de pérdidas		
Método	Requerimientos y Atributos	Calificación
Step-Test	Registro continuo del flujo, bajo costo	+++
Loggers	Aparatos acústicos fijos a la tubería, alto costo	+
Inspección visual	Simple pero lenta, no debe ser la única medida de gestión, bajo costo	+++
Sensores acústicos	Aparatos acústicos dentro o fuera de la red, mediano costo, uso nocturno	++
Radares de penetración	Alto costo, e ineficiente a gran escala	+
Sensores térmicos	Muy costosa, tecnología en desarrollo	+
Monitoreo de flujo y presión	Muy eficiente, bajo costo, solo funciona para fugas tipo ráfaga	++
2. Gestión de pérdidas reales		
Gestión de presión	Modelo de computador, alto costo, personal capacitado	+
	Modelo de optimización, alto costo, personal capacitado	+

Medidas de gestión aplicadas a países en desarrollo	
	Válvulas reductoras de presión, bajo costo y alta efectividad +++
Control activo de fugas	Algoritmo híbrido multiobjetivo, válvulas de control, mediano costo, personal capacitado ++
	Sensores inalámbricos, mediano costo ++
	TILDE, bajo costo, datos de sensores de flujo y presión, personal capacitado +++
	SCADA, alto costo, medidores inteligentes, personal capacitado +
	Modelo de optimización de para calcular el tiempo óptimo para reemplazo de tuberías +++
Gestión de tuberías y bienes	DSS, bajo costo, herramienta de apoyo de decisiones +++
	Modelos basados en la física, alto costo, menor procesamiento de datos. ++
	Modelos estadísticos, mediano costo, mayor procesamiento de dato ++
3. Gestión de pérdidas Aparentes	

Medidas de gestión aplicadas a países en desarrollo		
Inexactitudes en los medidores	Control de calidad, mediano costo	++
	Reemplazo de medidores, alto costo	+
Uso no autorizado del agua	Identificación y sanción de ramificaciones no autorizadas, alto costo	++
	Medidas de concientización y educación a la comunidad	+++
Análisis de datos	Inspecciones de rutina y auditorias	+++
	Actualización de equipos, alto costo	+

Nota:+++ de alta aplicabilidad, ++ de posible aplicabilidad, + poca aplicabilidad. Color verde más viable, color amarillo viable, color rojo inviable

4. Conclusiones

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, es evidente la falta de estudios sobre todo en el cálculo de pérdidas aparentes en países en desarrollo, se hace necesario el desarrollo de métodos más prácticos para estimar el consumo. Por otro lado, a pesar de tener una gran información y desarrollo de investigaciones a lo largo del mundo, el porcentaje de pérdidas es alarmante. Hay varios métodos y herramientas disponibles para la estimación y cálculo de pérdidas que incluyen; el balance de agua, BABE, equipos de detección y localización de fugas acústicas, análisis de

MNF, análisis estadístico, modelado y optimización de redes hidráulicas, gestión de presión, monitoreo en línea y detección de eventos, entre otros. Sin embargo, todavía faltan pautas de apoyo a la decisión sobre qué herramienta o método apropiado elegir para las condiciones locales dadas y necesitan más investigación. Se sugiere un diagrama de flujo para método de gestión integrada de fugas (Anexo 2). La falta de metodología objetiva para la estimación de pérdidas aparentes es una limitación importante. Las pérdidas de agua por consumo no autorizado requieren enfoques socioculturales importantes.

Se encontró que la gestión de presión es considerada el mejor método, el control de fugas mediante la instalación de PVR ha demostrado ser eficiente, existen muchas medidas e información al respecto, sin embargo, todavía hay mucho más que investigar; desarrollo de modelos de predicción más confiables, la invención de dispositivos de detección de fugas y regulación de presión de bajo costo. Es importante realizar más investigación respecto a la estimación y gestión de fugas de fondo. Se recomienda que cada empresa prestadora del servicio lleve a cabo su propia evaluación de pérdidas, en especial de pérdidas aparentes, ya que las suposiciones hechas para estos cálculos no son aplican para varios sistemas de distribución de agua en países en desarrollo. Para que de esta manera se realice la identificación de factores que contribuyen a estas pérdidas y se desarrollen estrategias de reducción apropiadas, no solo basando sus decisiones en disponibilidad presupuestal (como suele hacerse, generalmente en países en desarrollo), sino en un análisis de eficiencia que contribuiría realmente a la optimización del sistema.

A partir del análisis de medidas de gestión aplicadas a países en desarrollo se concluye que las medidas con mayor aplicabilidad son Setp-Test e inspección visual para la localización de fugas, válvulas reductoras de presión, detección integral de fugas (TILDE) para la gestión de pérdidas,

también se recomiendan Modelo de optimización de para calcular el tiempo óptimo para reemplazo de tuberías y la implementación un sistema de apoyo a la toma de decisiones (DSS). Para las pérdidas aparentes, se recomienda medidas de concientización y educación a la comunidad e inspecciones de rutina y auditorias.

Referencias Bibliográficas

- Alegre, H., Hinder, W., Baptista, J. M. y Parena, R. (2004). Indicadores de desempenho para serviços de abastecimiento de agua. Série Guias Técnicas, LNEC and IRAR.
- AL-Washali, T., Sharma, S. y Kennedy, M. (2016). Methods of Assessment of Water Losses in Water Supply Systems: a Review. *Water Resources Management*, 30(14), 4985–5001.
- Araujo, L., Ramos, H., y Coelho, S. (2006). Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, 20(1), 133–149.
- Babić, B., Đukić, A., y Stanić, M. (2014). Managing water pressure for water savings in developing countries. *Water SA*, 40(2), 221.
- Bar-Shalom, Y., y Fortmann, T. (1988). *Tracking and data association*, Academic, New York.
- Boulos, P. y AbouJaouda, A. (2011). Managing leaks using flow step-testing, network modeling, and field measurement. *J Am Water Works Assoc.*
- Buchberger, S. y Nadimpalli, G. (2004). Leak estimation in waterdistribution systems by statiscal analysis of flow readings, *Journal of water resources planning and management*.
- Caicedo, C., y Blanco, L. (2017). Formulación de alternativas para optimizar el funcionamiento técnico del sistema de abastecimiento urbano del municipio de Málaga (Santander), enfatizado en la gestión de pérdidas en la red de distribución (tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Chisakuta, S., Mayumbelo, K., Mulenga, K., Simbeye, I., Wegelin, W., Mckenzie, R., Hamilton, S y Anders D. (2011). *Non-revenue water: trainers manual*. Wave Pool Zambia Imprint. German Foundation for International Cooperation (GIZ), Germany

- Cirelli, A. y Mortier, C. (2005). Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica. *Tecnologías Solares Para La Desinfección y Descontaminación Del Agua.*, 17–32.
- Colombo, A., Lee, P. y Karney, B. (2009). A selective literature review of transient-based leak detection methods. *J. Hydro. Environ. Res.*, 2(4), 212–227.
- Couvelis F. y JE van Zyl. (2015). Apparent losses due to domestic water meter under-registration in South Africa. *Water S.A. Africa*, 41(1), 699-705.
- Creaco, E., Pezzinga, G. (2014) Multiobjective optimization of pipe replacements and control valve installations for leakage attenuation in water distribution networks. *J Water Resour Plan Manag*, 141(3), 04014059
- Criminisi, A., Fontanazza, M., Freni, G. y Loggia L. (2009). Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. *Water Sci Technol*, 60(9): 2373–2382.
- De Oliveira, P., Garrett H. y Soibelman, L. (2010). A density-based spatial clustering approach for defining local indicators of drinking water distribution pipe breakage. *Adv. Eng. Inform.*, 25(2), 380– 389.
- Delgado, X. (2011). Aplicación del método de jerarquías analíticas (AHP) a la gestión de pérdidas de agua en redes de abastecimiento (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- EPM (2009). Normas de diseño de sistemas de acueducto de EPM. Medellín, Colombia.
- Farley M, Trow S (2007) Losses in water distribution networks; a practitioner's guide to assessment, monitoring, and control. International Water Association Publishing, 4(2).
- Farley, M. (2001). Leakage management and control: A best practice training manual.1-69
- Girol, G. (2008). Análise de perdas reais em um setor do sistema de abatecimento de agua no municipio de Capinzal-SC (Trabalho de conlusao de curso). UFSC. Brasil

- Giustolisi, O., Savic, D., y Kapelan, Z. (2008). Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(5), 626–635.
- Gomes, R., Marques, A., y Sousa, J. (2011). Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 8(2), 65–77.
- Guiaro, S., Ferrer, E. y Olmedo, A. (2008). El artículo de revisión. *Revista iberoamericana de Enfermagem Comunitaria*.
- Gupta, A. y Kulat, K. (2018). A selective literatura review on leak management techniques for water distribution system. *Water Resour Manage*, 32(10) 3247-3269
- Ho, C., Lin, M., Lo, L., (2010). Use of a GIS-based hybrid artificial neural network to prioritize the order of pipe replacement in a water distribution network. *Environ. Monit. Assess.* 166(1), 177–189.
- Hunaidi, O. y Brothers, K. (2007). Night flow análisis of pilot dmas in Ottawa. Canada. Loss specialist conference, International Water Association, Bucharest, Romania, 32-46.
- Iaradirek, I., Kara, S., Yilmaz, G., Muhammetoglu, G. y Muhammetoglu, H. (2012). Implementation of hydraulic modelling for water-loss reduction through pressure management. *Water Resources Management*, 26(9), 2555-2568.
- IDEAM (2002). Guía ambiental para sistemas de acueductos. Medellín, Colombia.
- Jiménez, J. (2013). Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario. Universidad Veracruzana. Veracruz, México.
- Kingdom, B., Liemberger, R., y Marin, P. (2006). The challenge of reducing non-revenue wáter (nrw) in developing countries – how the private sector can help: a look at performance-based service contracting. *Water Supply and Sanitation Sector Board*, 5(1), 52.
- Lambert A (2001) What do we know about pressure: leakage relationships in distribution systems. Proceedings of IWA Conference System Approach to leakage control and water distribution system management. Brno, Czech Republic, 16–18 May 2001

- Lambert, A. (1994). Accounting for Losses: The Bursts and Background Concept. *Water and Environment Journal*, 8(2), 205–214
- Lambert, V. y Hirner, W. (2000). Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures. *IWA blue pages*, 48(6), 227-237
- Liemberger, R., y Farley, M. (2004). Developing a Non-Revenue Water Reduction Strategy Part 1 : Investigating and Assessing Water Losses. *Proceeding of IWA WWC 2004 Conference*. Marrakech. Moroco
- Luong, H. y Fujiwara, O. (2002). Fund allocation model for pipe repair maintenance in water distribution networks. *Eur. J. Oper. Res*, 136(2), 403–421.
- Luong, H. y Nagarur, N. (2005). Optimal maintenance policy and fund allocation in water distribution networks. *Water Resour Plann Manage*, 131(4), 299–306.
- Misiunas, D., Vítkovský, J., Olsson, G., Lambert, M., y Simpson, A. (2006). Failure monitoring in water distribution networks. *Water Sci. Technol*, 53(4–5), 503–511.
- Morrison, J., Tooms, S., y Rogers, D. (2007). District metered áreas guidance notes. *Internacional Water Association (IWA)*, specialist group on efficient operation and management of urban water distribution systems, water los task forcé.
- Mounce, S., Boxall, J., y Machell, J. (2010). Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows. *J. Water Resour. Plann. Manage*, 136(3), 309–318.
- Mounce, S., Day, A., Wood, A., Khan, A., Widdop, P., y Machell, J. (2002). A neural network approach to burst detection. *Water Sci. Technol*, 45(4–5), 237–246.
- Mounce, S., Khan, A., Wood, A., Day, A., Widdop, P., y Machell, J. (2003). Sensor-fusion of hydraulic data for burst detection and location in a treated water distribution system. *Inf. Fusion*, 4(3), 217–229.

- Mounce, S., y Machell, J. (2006). Burst detection using hydraulic data from water distribution systems with artificial neural networks. *Urban Water J.*, 3(1), 21–31.
- Mthokozisi, N. y Akpofure, E. (2019). Assessment of apparent losses due to meter inaccuracy using an alternative, validated methodology. *Water Supply*, 19 (4): 1212–1220.
- Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., y Sá Marques, A. (2014). Pressure-dependent demand and leakage modelling with an EPANET extension - WaterNetGen. In *Procedia Engineering*, 89(1), 632–639.
- Mutikanga H., Sharma S. and Vairavamoorthy K. (2011). Investigating water meter performance in developing countries: A case study of Kampala, Uganda. *Water S.A. Africa*, 37(1), 568-576.
- Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M. y Moridi, A. (2009). Pressure Management Model for Urban Water Distribution Networks. *Water Resources Management*, 24(3), 437–458.
- Nhemafuki, A. (2008) Strategies for water loss management in developing countries: Case studies of Bhaktapur and Dhulikhel cities, Nepal (MSc Thesis). Institute for water education, Delft, The Netherland.
- Ozevin, D. y Harding, J. (2012). Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 92(1), 63-69.
- Peters, E. J. y Ben-Ephraim, Y. (2012). System leakage by night flow analysis: a case study in Guayana. *Proceedings of the ICE – Water Management*, 165(1), 451-457.
- Pilcher, R. (2003). Leak detection practices and techniques: a practical approach. *Water*, 21(1), 44–45.
- Poulakis, Z., Valougeorgis, D., and Papadimitriou, C. (2003). Leakage detection in water pipe networks using a bayesian probabilistic framework. *Probab. Eng. Mech.*, 18(4), 315–327.

- Pretner, A., Belltin, A. y Saniz, L. (2008). Application of monitoring and information technologies to optimize asset management. *Water Asset Manage Int*, 4(4), 14–19
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., y Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25–45.
- Ramírez Cardona, D. (2014). Análisis de las pérdidas de agua en los sistemas de abastecimiento. Cali, Colombia.
- Reyes, M., Ocaña, E. R., Domiguez, I., Komilis, D., y Sánchez, A. (2018). A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies. *Waste Management*, 77, 486-499.
- Richards, G., Johnson, M. y Barfuss, S. (2010). Apparent losses caused by water meter inaccuracies at ultralow flows. *American Water Works Association. Journal*, 102(5), 123-132.
- Sægrov, S., Shilling, W., Williams, W. y Ugarelli, R. (2004). Rehabilitación asistida por computadora de redes de alcantarillado y aguas pluviales (CARE-S). Proc., WaPUG (Grupo de usuarios de planificación de agua y aguas residuales) , IWA, Londres.
- Sanabria, A., Fonseca, M. y Cotes, A. (2010). Operación y mantenimiento de sistemas de acueducto de abastecimiento de agua, Guatemala, México
- SIAPA (2014). Lineamiento Técnico para Factibilidades. Capítulo 2: Sistema de agua potable. Guadalajara, México.
- Tabesh, M., Yekta, A. y Burrows, R. (2008). An Integrated Model to Evaluate Losses in Water Distribution Systems. *Water Resources Management*, 23(3), 477–492.
- Tabesh. M., Asadiyani, H., Yekta, A. y Burrows, R. (2018). An Integrated Model to Evaluate Losses in Water Distribution Systems. *Water Resour Manage*, 23(3), 477-492.
- Thornton, J., Sturm, R., y Kunkel, G. (2008). *Water Loss Control*. McGraw-Hill Professional.

Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta Ecológica*, 64, 9–18.

Tsutiya, M. T. (2006). Abastecimiento de agua. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 4 edition.

Walski. T., Bezts, W., Posluszny, E., y Whitman B, (2006) Modeling leakage reduction through pressure control. *J Am Water Works Assoc* 98, 147–155

Wu, Z. y Khaliefa, M. (2012). Cloud computing for high performance optimization of water distribution systems. 71, 679-686

WWAP (Programa Mundial de Avaliação da Água das Nações Unidas). (2018). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones Basadas En La Naturaleza Para La Gestión Del Agua.

Wyatt, A. (2010). Non-Revenue Water: Financial Model for Optimal Management in Developing Countries. RTI International.

Xin, K., Tao T., Yingjun, L., Xiong, X., y Fei L. (2014). Apparent Losses Analysis in District Metered Areas of Water Distribution Systems. *Water Resour Manage*, 28(3), 683–696

Ye, G. & Fenner, R. (2011). Kalman Filtering of Hydraulic Measurements for Burst Detection in Water Distribution Systems. *Journal of pipeline systems engineering and practice* © asce, 2(1).

Apéndices

Apéndice A. Casos de estudio

	Lugar	Cuantificación de pérdidas	% de pérdidas	Gestión de pérdidas	% de ahorro	Otros datos	Autor	Año
Reales	Turquia, Konyaalti en Antalya	El área de estudio se dividió en 18 DMA y a partir de un balance hidrico y la evaluación de rendimiento de la red, también se Se calibró y verificó un modelo hidráulico para cada DMA utilizando los datos proporcionados por SCADA, se calculo el flujo nocturno minimo y el indice de fugas de la estructura	43.50%	Se gestionaron las pérdidas a partir de la reducción de presión de hasta aproximadament e 3 bares utilizando una válvula reductora de presión (PRV)	12.50%	El ahorro total I. E. KaradirekS. 2012 El promedio de KaraG. YilmazA. m3/h, con un Muhammetoglu costo anual de Email authorH. de Muhammetoglu ahorro de 400.000 euros y una inversión		
	Teherán, Irán	Modelo Hidraulico	26%	Un modelo de optimización basado en el algoritmo genético (GA), para la optimización del nivel de almacenamiento de agua en el tanque para la reducción de presión	15.73%	las reducciones en los costos operativos debido al consumo de energía reducido (337,000 kWh por año, o € 21,500 por año)	Sara Nazif· Mohammad Karamouz · Massoud Tabesh de · Ali Morid	2009

Lugar	Cuantificación de pérdidas	% de pérdidas	Gestión de pérdidas	% de ahorro	Otros datos	Autor	Año
Coimbra, Portugal	Modelo Hidraulico	20%	Una torre de presión y una valvula reguladora de presión, a demás la red fue modelada con WaterNetGen (una extencion de EPANET)	de 8.20%	No aplica	Ana Raquel 201 Miranda Gomes 7 da Costa Ferreira	
Malaga, Colombia	A partir de datos de macro y micromedición, se realiza el balance hídrico planteado por la IWA	de 46.53%	Renovación de micromedidores Control de presión, instalación de valvulas reductoras de presión (PRV)	de -30%	No aplica	Cesar Julian 201 Celis Caicedo y 7 Liceth Carolina Blanco Almeida	
Poznán, Polonia	No especifican	Las pérdidas totales de agua fueron de 5.30 millones m3 por año en 2011 11.3%	Un método de control por computadora más avanzados de los que el flujo de producción se controla mediante el uso de un modelo de pronóstico de la demanda de agua a corto plazo y la presión se controla mediante un módulo de control de presión dinámico.	de -20%	El control avanzado de flujo producción aumentó en una reducción del 80% de la variación del flujo de producción, y el control de presión dinámica aumentó en una reducción del 29% de la presión de la bomba y una reducción del 20% de la fuga de fondo en	M. Bakker ; T. 201 del Rajewicz ; H. 4 de Kien ; JHG Vreeburg ; LC aumentó en una Rietveld del la del de de la y el de dinámica en una del de la y una del en	

	Lugar	Cuantificación de pérdidas	% de pérdidas	Gestión de pérdidas	% de ahorro	Otros datos	Autor	Año
						comparación con el control convencional.		
Aparentes	Vilankulos, Mozambique, Africa	Auditoria de agua	9.36%	Estrategias corto plazo: programa de medición; Entrenamiento del lector de medidores de agua; Control de conexión ilegal y encuesta; Conciencia y consenso del personal y campaña de conciencia social; Aplicabilidad de la base de datos de facturación / software. Estrategias a largo plazo: Reemplazo de la red y rehabilitación de la red. Establecimiento de DMA. Medición universal / reemplazo del medidor. Mejora de la calidad del agua. Desarrollo de programas informáticos	a 4%	8% a corto plazo y se espera llegar a un 4% con las medidas a largo plazo.	Catine Chimene	2013
	Maxixe, Moazmbique, Africa	Auditoria de agua	10.36%		4%	No aplica		

Lugar	Cuantificación de perdidas	% de perdidas	Gestión de perdidas	% de ahorro	Otros datos	Autor	Año
			basados en control AL y / o base de datos de clientes.				

NOTA: Esta tabla solo incluye los estudios en los cuales se podía observar un proceso de todos los aspectos analizados en este proyecto, es decir, el calculo del porcentaje de pérdidas que medidas implementaron y como estas medidas influyeron.

Apéndice B. Flujo para método de gestión integrada de fugas

