



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:**

**PROPUESTA METODOLÓGICA SIMPLIFICADA DE GESTIÓN  
DE PRESIONES PARA LA RECUPERACIÓN DE PÉRDIDAS  
REALES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

**AUTOR:**

**Haro Tamayo, Eduardo Alfredo**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL**

**TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

**Ing. Molina Arce, Stephenson Xavier**

**Guayaquil, Ecuador**

**2018**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Eduardo Alfredo Haro Tamayo**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

**TUTOR**

---

**Ing. Stephenson Xavier Molina Arce**

**DIRECTORA DE LA CARRERA**

---

**Ing. Stefany Alcívar Bastidas**

**Guayaquil, a los 16 del mes de marzo del año 2018**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Eduardo Alfredo Haro Tamayo**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación, **Propuesta metodológica simplificada de gestión de presiones para la recuperación de pérdidas reales en redes de distribución de agua potable**, previo a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 16 del mes de marzo del año 2018**

**EL AUTOR**

---

**Eduardo Alfredo Haro Tamayo**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Eduardo Alfredo Haro Tamayo**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Propuesta metodológica simplificada de gestión de presiones para la recuperación de pérdidas reales en redes de distribución de agua potable**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

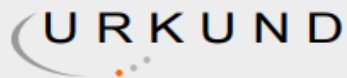
**Guayaquil, a los 16 del mes de marzo del año 2018**

**EL AUTOR:**

---

**Eduardo Alfredo Haro Tamayo**

## REPORTE URKUND



### Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** TRABAJO DE TITULO EDUARDO HARO.docx (D35935819)  
**Submitted:** 2/26/2018 5:48:00 PM  
**Submitted By:** claglas@hotmail.com  
**Significance:** 2 %

#### Sources included in the report:

PEDRO SALINAS MITE2017Nov27.pdf (D33707445)  
TESIS VRGG.pdf (D16213259)  
tesisUPV3388.pdf (D32259975)  
[https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/2698/1/TESIS280-130429\(R\).pdf](https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/2698/1/TESIS280-130429(R).pdf)

#### Instances where selected sources appear:

12

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco primeramente a Dios, por darme la fortaleza necesaria y suficiente para permitirme superar todos los obstáculos que se me presentaron en el desarrollo de este trabajo de tesis.

A mis padres, que siempre confiaron en mí y que son el pilar incondicional en mi vida. No hay manera de expresar tanto agradecimiento hacia ellos. Solo sé que jamás estaré solo, y los tendré siempre a ellos, incluso después de la muerte. Gracias por su absoluto apoyo y paciencia.

A mi hermana Mariela, por su manera de aconsejarme, no solo en lo académico, sino en mi vida entera. Le agradezco infinitamente la fuerza de voluntad que me transmitió para culminar este camino.

A mi hermana Gabriela, por su ejemplo de lucha y constancia en los estudios.

Al Ingeniero Xavier Molina, por darme las pautas necesarias para el desarrollo de este proyecto. También por inculcarme una nueva perspectiva de trabajo y estudio para posteriores oportunidades en mi vida académica y profesional.

A mi familia paterna y materna, por todo su apoyo, sus consejos, guías y reproches. Fueron parte fundamental en el camino de convertirme en profesional.

Al Sr. Anthony Araujo, amigo de vida, por su incondicional colaboración en los momentos más necesarios y su inmensa humildad.

Eduardo Haro Tamayo.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo es dedicado a todas aquellas personas que me acompañaron en este largo y extenuante camino.

Eduardo Haro Tamayo



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Stephenson Xavier Molina Arce**  
TUTOR

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Stefany Alcívar Bastidas**  
DIRECTORA DE LA CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Clara Glas Cevallos**  
COORDINADORA DE AREA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Miguel Cabrera Santos**  
OPONENTE



# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>XV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XVI</b>
<b>1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES</b> .....	<b>2</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	5
1.4. OBJETIVOS.....	6
1.4.1 OBJETIVO GENERAL .....	6
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
1.5. HIPÓTESIS.....	7
1.6. BASE METODOLÓGICA.....	7
<b>2. CAPÍTULO 2: MARCOS DE REFERENCIA</b> .....	<b>8</b>
2.1. PÉRDIDAS DE AGUA .....	8
2.1.1. BALANCE HÍDRICO .....	10
2.1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE AGUA .....	13
2.2. PÉRDIDAS REALES.....	14
2.2.1. GESTIÓN DE FUGAS.....	16
2.2.2. GESTIÓN DE LA PRESIÓN.....	20
2.2.2.1 PROPÓSITO DE UNA GESTIÓN DE PRESIONES .....	21
2.2.2.2. BENEFICIOS DE LA GESTIÓN DE LA PRESIÓN.....	23
2.2.2.3. VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN .....	25
2.2.2.4. TIPOS DE MODULACIÓN.....	29
2.3. EL CAUDAL MINIMO NOCTURNO EN LA GESTIÓN DE PRESIONES.....	38
2.3.1 CONSIDERACIONES .....	41
2.3.2 EL CAUDAL DE USO NOCTURNO .....	43
2.3.2.1 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO .....	43
2.3.2.2 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO NO DOMÉSTICO .....	44
2.3.3 EJEMPLO DE APLICACIÓN .....	45
2.4 PUNTO DE PRESIÓN PROMEDIO (AZP – AVERAGE ZONE POINT) .....	48
2.4.1 PROCEDIMIENTO BASE PARA LA SELECCIÓN DEL AZP.....	49
2.4.2 CÁLCULO DEL AZP: VALOR ESTIMADO Y UBICACIÓN.....	51
2.5 MODELACIÓN DE FUGAS .....	52

2.5.1 ECUACIÓN FAVAD (FIXED A AND VARIABLE AREA DISCHARGE PATHS).....	53
2.5.2 EXPONENTE DE FUGA (N1) .....	54
2.5.2.1 Prueba de paso de presión (Pressure Step Test) .....	55
2.5.3 FACTOR HORA-DÍA.....	57
2.5.4 CAUDALES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES DE LA PRESIÓN.....	58
<b>3. CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....</b>	<b>63</b>
3.1.DATOS GENERALES DE CÁLCULO.....	64
3.1. FACTOR DE FRICCIÓN DE RED “K” .....	66
3.2. PROCESO DE MODULACION DE PRESIONES.....	70
3.2.1. ANÁLISIS POR REGULACIÓN FIJA.....	71
3.2.2 ANÁLISIS POR REGULACIÓN ACTIVA DE PRESIONES.....	78
<b>4. CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO. ....</b>	<b>83</b>
4.1. INFORMACION TÉCNICA Y COMPONENTES.....	84
4.2. PROCESO DE ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE USO NOCTURNO.....	95
4.3. ESTIMACIÓN DEL VALOR N1 SEGÚN PRESSURE STEP TEST.....	96
4.4. ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE FUGAS Y VALORES K INICIALES (SECTOR SIN REGULACIÓN) .....	99
4.5 GESTIÓN DE PRESIONES POR REGULACIÓN FIJA .....	103
4.6 GESTIÓN DE PRESIONES POR REGULACIÓN ACTIVA.....	107
<b>5. CAPÍTULO 5: COMPARATIVA DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES. ....</b>	<b>110</b>

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1:</b> Pérdidas de facturación de volúmenes procesados – año 2015.....	4
<b>Gráfico 2:</b> Pérdidas de facturación por tamaño de la muestra.....	5
<b>Gráfico 3:</b> Estrategias definidas por la IWA para una eficiente gestión de fugas....	17
<b>Gráfico 4:</b> Tipos de modulación y minimización de presiones excesivas .....	30
<b>Gráfico 5:</b> Diferentes tipos de modulación y efectos de la reducción de presión ....	32
<b>Gráfico 6:</b> Modulación de la presión en un periodo de 24 horas .....	34
<b>Gráfico 7:</b> Modulación de la presión basada en el flujo de la red .....	35
<b>Gráfico 8:</b> División del caudal ingresado en una red .....	39
<b>Gráfico 9:</b> Medición diaria del flujo de entrada en una red sectorizada .....	40
<b>Gráfico 10:</b> Componentes del caudal mínimo nocturno.....	41
<b>Gráfico A:</b> Detalle del comportamiento de parámetros.....	91
<b>Gráfico B:</b> Comportamiento gráfico de la presión de ingreso para las 24 horas.....	93
<b>Gráfico C:</b> Mediciones de caudal vs presión – Pressure Step Test.....	97
<b>Gráfico D:</b> Gráfica del comportamiento hidráulico del sector.....	101
<b>Gráfico E:</b> Comparación de resultados referente al estado actual de la red.....	102
<b>Gráfico F:</b> Comparación entre los diferentes parámetros.....	106
<b>Gráfico G:</b> Comparación entre los diferentes parámetros .....	109

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1:</b> Escasez de agua a nivel mundial.....	9
<b>Ilustración 2:</b> Tipos de fugas según su tamaño y tiempo.....	15
<b>Ilustración 3:</b> Visualización de las presiones dentro de un sistema de distribución de agua. ....	22
<b>Ilustración 4:</b> Ejemplo de un sistema de bypass con su respectiva válvula reguladora de presión y medidor de flujo. ....	25
<b>Ilustración 5:</b> Partes de una válvula de diafragma.....	26
<b>Ilustración 6:</b> Partes de una válvula de émbolo.....	28

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Balance Hídrico según el I.W.A (International Wáter Association) .....	10
<b>Tabla 2:</b> Caudales de fuga para un agujero de diámetro 6 mm, sometido a distintas presiones .....	21
<b>Tabla 3:</b> Factores que componen un sistema óptimo de reducción de presiones ...	23
<b>Tabla 4:</b> La gestión de presión y sus beneficios .....	23
<b>Tabla 5:</b> Ejemplo - Caudal mínimo nocturno con mayor presión crítica .....	42
<b>Tabla 6:</b> Valores promedio de consumo nocturno de acuerdo a su tipo de uso.....	44
<b>Tabla E1:</b> Ejemplo de Lecturas y mediciones establecidas .....	45
<b>Tabla E2:</b> Valores estimados de pérdidas. ....	46
<b>Tabla E3:</b> Caudal de uso nocturno total. ....	46
<b>Tabla E4:</b> Uso nocturno corregido.....	47
<b>Tabla 7:</b> Modelo de análisis PST (pressure step test) .....	55
<b>Tabla 8:</b> Tabla de resultados .....	56
<b>Tabla 9:</b> Valores de N1 para la relación presión - caudal .....	57
<b>Tabla 10:</b> Estimación del caudal independiente de la presión en la hora del mínimo caudal nocturno .....	61
<b>Tabla E5:</b> Ejemplo de estimaciones .....	62
<b>Tabla E6:</b> Factores K en el punto de presión promedio y punto crítico. ....	68
<b>Tabla E7:</b> Estimación de valores K en AZP y punto crítico. ....	68
<b>Tabla E8:</b> Valores de red medidos en la primera hora.....	73
<b>Tabla E9:</b> Nueva presión de entrada, diferenciales de presión y nuevos valores de presión.....	73
<b>Tabla E10:</b> Orden de cálculos para la estimación de caudales de fugas .....	74
<b>Tabla E11:</b> Comportamiento de la presión crítica de acuerdo con la variación de la válvula reguladora de presión.....	75
<b>Tabla E12:</b> Ahorro de agua diario para una regulación de presión fija.....	76

<b>Tabla E13:</b> Parámetros de la red en condiciones iniciales para las primeras horas del día. ....	79
<b>Tabla E14:</b> Estimación de nuevas presiones de entrada y cálculo de sus componentes resultantes. ....	80
<b>Tabla E15:</b> Estimación del caudal de fugas. ....	81
<b>Tabla E16:</b> Valores ajustados $\Delta p$ y $\Delta c$ ....	82
<b>Tabla CE1:</b> Datos generales ....	85
<b>Tabla CE2:</b> Mediciones horarias en parámetros esenciales ....	86
<b>Tabla CE3:</b> Depuración de valores obtenidos de presión de ingreso. ....	92
<b>Tabla CE4:</b> Valores horarios para cada parámetro. ....	94
<b>Tabla CE5:</b> Consumos anuales para el sector en estudio ....	95
<b>Tabla CE6:</b> Consumos anuales para el sector en estudio ....	95
<b>Tabla CE7:</b> Valor estimado de uso nocturno corregido. ....	96
<b>Tabla CE8:</b> Períodos de medición y cálculo final del valor N1 ....	98
<b>Tabla CE9:</b> Comportamiento hidráulico del sector. ....	100
<b>Tabla CE10:</b> Primera estimación de la presión de entrada. ....	104
<b>Tabla CE11:</b> Cálculo definitivo de presión fija de ingreso y parámetros de comportamiento de red. ....	105
<b>Tabla CE12:</b> Primera estimación de variación de presiones de entrada. ....	107
<b>Tabla CE13:</b> Cálculo definitivo de presiones variables y parámetros de comportamiento de red. ....	108

## RESUMEN

Este trabajo de título consiste en la implementación de una metodología simplificada de gestión de presiones, para la reducción de volúmenes de fugas en sistemas de abastecimiento de agua potable. Los pocos datos empleados para su desarrollo, fueron medidos dentro el sector en estudio, representado por la ciudadela “La Atarazana” perteneciente a la zona urbana de la ciudad de Guayaquil.

Las mediciones realizadas se ejecutaron en un período de siete días consecutivos, los cuales entraron en un proceso de depuración, dando como consiguiente una tabla representativa de 24 horas.

Gracias a la aplicabilidad de la ecuación FAVAD, se consiguió determinar el comportamiento hidráulico real de la red, con un nivel de proximidad presión-caudal bastante acertado, al momento de ejecutar regulaciones de presión fija y activa en la entrada del sistema de abastecimiento.

Una vez obtenidos los resultados de los análisis, se determinaron ciertas diferencias y conclusiones importantes entre estos tipos de regulación en mención.

**Palabras claves:** metodología, abastecimiento, fugas, comportamiento, caudal, presión, regulación.

## **ABSTRACT**

This graduation project consists about an implementation of a simplified pressure management methodology for the reduction of leakage volumes in drinking water supplies systems. The few data used for this development were measured within the sector under study, represented by the zone named “La Atarazana” belonging to the city of Guayaquil.

The measurements made were executed in a period of seven consecutive days, which entered a debugging process, giving as a result a representative 24-hour table.

With the applicability of the FAVAD equation, it was possible to determine the real hydraulic behavior of the network, with a fairly accurate pressure-flow proximity level, when executing fixed and active pressure regulations at the input of the supply system.

Once the results of the analyzes were obtained, certain important differences and conclusions were determined between these types of regulation in mention.

**Keywords:** methodology, supply, leakage, behavior, flow, pressure, regulation.



## **1. CAPÍTULO 1: GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

El agua es un elemento importante para la vida de los seres vivos, porque la utilizamos diariamente y por tal motivo es fundamental preservarla.

En redes de distribución, cuando existen pérdidas de este líquido, uno de los procedimientos fundamentales es el de detectar las fugas existentes, su desperdicio provoca grandes pérdidas económicas, pero no solo eso, el impacto trasciende hacia la sociedad y el medio ambiente. Es urgente reflexionar sobre cómo podemos cuidar de ella, y el papel que representa el agua en nuestras vidas y en la vida del planeta.

Este trabajo de investigación implementa una propuesta metodológica simplificada de gestión de presiones, para la recuperación de pérdidas reales en redes de distribución de agua potable. Es imprescindible que se inviertan recursos que solucionen el problema a corto o mediano plazo, y se logre una mejora económica para las empresas distribuidoras de agua y exista un mayor aprovechamiento de ella.

Para su estudio se tomará como referencia un sector delimitado en las ciudadelas La Atarazana y FAE de la ciudad de Guayaquil. Se aplicarán mediciones correspondientes al caso de estudio y se procederá a comparar los registros obtenidos, alcanzando la información real de ahorro de agua mediante tablas generadas por software y gráficos.

Es importante también considerar los aspectos relacionados como los impactos externos que produce el problema de fugas de agua, es decir, los efectos en las acciones de la empresa encargada de suministrarla.

Cabe resaltar que este método aplicado al sector en mención, y luego de haber verificado su eficacia, puede fácilmente adecuarse a las necesidades de futuros sectores de estudio a nivel mundial.

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El suministro y distribución de agua dulce en los países del mundo es cada vez más limitado, situación que motiva a investigar nuevos métodos para su gestión y aprovechamiento de este líquido vital. Las redes de agua potable existentes con el pasar del tiempo tienden a presentar fugas en sus conexiones, accesorios o tramos de las tuberías que las componen; esto representa pérdidas que no se pueden recuperar. Dichas fugas pueden ser producto de roturas en algún punto del sistema por las altas presiones que se manejan, o por deterioro de los elementos, pero no es solo eso, entre el desperdicio de agua también existen volúmenes que se distribuyen sin ningún control, o también hurtos que se dan muy a menudo.

Es necesario y de suma importancia controlar dichas pérdidas que no son evaluadas por las entidades responsables, llegando a dos objetivos principales: disminuir el desperdicio de agua tratada y aumentar la eficiencia de las redes de distribución de agua potable. Consecuentemente existirá un mayor ahorro de suministro de agua y a su vez un mayor ahorro económico. Según la *Asociación Internacional de Agua (IWA)*, los componentes a considerar en un análisis de pérdidas reales en redes de tuberías de agua potable son las siguientes:

- ▲ Fugas en las tuberías de aducción y distribución
- ▲ Fugas en las conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente

Las pérdidas reales están relacionadas con las fugas existentes en una red, tanto en tuberías de distribución como en las conexiones domiciliarias. Al resolver dicho problema existirá un ahorro considerable en recursos que, según estudios del banco mundial, podrían abarcar hasta un 50% de la dotación de agua total para un sector.

Existen varios métodos para el control de pérdidas reales en una red de abastecimiento:

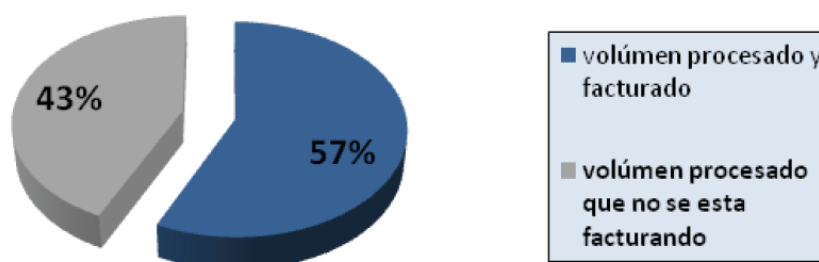
- ▲ Gestión de la infraestructura
- ▲ Velocidad y calidad de las reparaciones en la red
- ▲ Control activo de fugas
- ▲ Gestión de la presión

El método en estudio conlleva a una gestión de presiones para una red convencional de tubería de suministro de agua potable, con el objeto de disminuir su volumen de fugas.

Empresas encargadas de la dotación de agua y saneamiento alrededor del mundo han desarrollado varios métodos para el control de las pérdidas, pero en nuestro país Ecuador, ninguna entidad los aplica de una manera sostenible, a excepción de las ciudades principales como Guayaquil, Quito y Cuenca, en donde sí se realizan estudios de control de pérdidas que pueden ser implementados.

La Agencia de Regulación y control del Agua (ARCA), entidad encargada de regular el consumo de los recursos hídricos en nuestro país, ha contabilizado en base a muestreos e indicadores de consumo de agua potable, que en el año 2015 existió una pérdida del 43% de volumen de agua no facturada, es decir que de cada 10 litros procesados, al menos 4,3 litros de agua no se consideran al momento del planillaje. Este análisis fue obtenido con una muestra de 31 cantones con una representación del 24% de la población total del país.

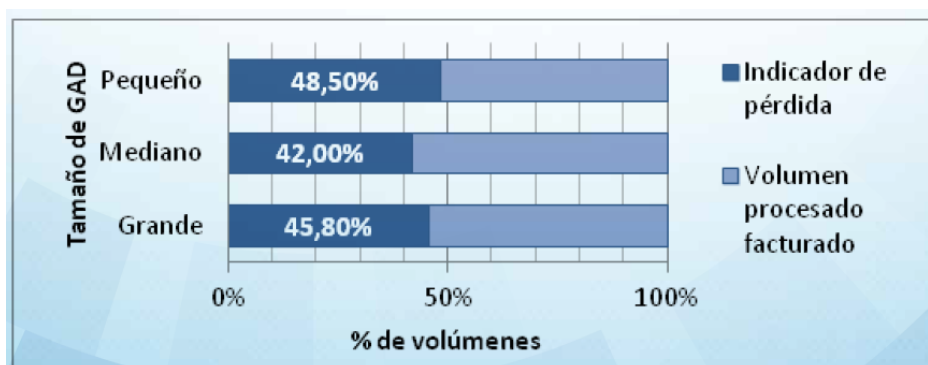
**Gráfico 1:** Pérdidas de facturación de volúmenes procesados – año 2015



**Fuente:** Base de datos del Plan de Control A.R.C.A.

Al realizar un microanálisis evaluando el agua no facturada para cada cantón, se ha dividido en tres partes de acuerdo a su tamaño poblacional: grande, mediano y pequeño. Según los indicadores mostrados en la tabla a continuación, el mayor nivel de pérdidas se reconoce en los cantones pequeños, mientras que el menor valor se da para los cantones medianos y grandes con ligeras diferencias.

**Gráfico 2:** Pérdidas de facturación por tamaño de la muestra.



**Fuente:** Base de datos del Plan de Control A.R.C.A.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto tiene como finalidad proponer y demostrar la efectividad de un método simplificado de gestión de presiones, para control de fugas existentes en sistemas de distribución de agua potable.

Es importante tener en cuenta dicha propuesta metodológica pues, actualmente existe un organismo de regulación y control del agua (A.R.C.A.) que exige a las empresas y municipios el control de las pérdidas de agua potable en sus redes de distribución, teniendo los resultados a corto y mediano plazo, cuyo objetivo es el de emplear proyectos o actividades que ayuden a preservar este líquido vital, mejorando o aumentando la eficiencia de estas redes para un mayor aprovechamiento de este recurso.

Existe la preocupación de que el agua se está desaprovechando por la presencia de fugas, no se está utilizando en su totalidad, y se pierde la posibilidad de que más personas se beneficien de una mejor calidad de vida.

Según datos históricos proporcionados por el IWA (internacional Wáter Association) el Método de Gestión de Presiones ya se ha implementado en algunas partes del mundo como es Brasil, Sudáfrica y el continente asiático, obteniendo satisfactorios resultados de ahorros significativos de agua. Se ha logrado un aprovechamiento salvando la cantidad de agua suministrada en un 50%, manteniendo un volumen necesario para abastecer a los consumidores de la zona.

Su viabilidad es evidente, existirá un ahorro de agua, pero para ello es necesario una inversión que se recuperará en un corto o mediano plazo. Con la reducción de líquido desperdiciado se podrá minorar gastos técnicos y operativos en las empresas que la suministran.

La gestión de presiones es un tema novedoso y muy útil, que no se ha tratado a profundidad en nuestro país, y será de mucha ayuda para el desarrollo de pequeñas y grandes poblaciones.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Proponer un método simplificado de gestión de presiones en una red de tuberías de agua potable, tomando como caso de estudio un sector de la ciudadela La Atarazana y FAE de la Ciudad de Guayaquil, basándose en el principio de recuperación de pérdidas reales para evitar el desperdicio de agua.

### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Proponer la metodología que utilice los datos básicos en la hidráulica sin utilizar modelos hidráulicos

- Verificar que los resultados de la implementación de la metodología sean válidos.
- Demostrar la eficacia del método ante las proyecciones de recuperación de agua aplicadas al caso de estudio.

### **1.5. HIPÓTESIS**

A partir de pocos datos hidráulicos se podrá lograr una recuperación significativa de fugas en las redes de abastecimiento de agua potable del sector en estudio. Estos parámetros son los siguientes:

- ▲ *Parámetros físicos:* longitud de red y número de conexiones
- ▲ *Datos comerciales:* caudales contabilizados
- ▲ *Variables hidráulicas:* caudal de ingreso, presión de ingreso, presión en el punto promedio, presión en el punto crítico, exponente de fugas N1.

### **1.6. BASE METODOLÓGICA**

Al establecer el *control o gestión de presiones* como uno de los métodos aplicables para lograr un gran ahorro de suministro de agua, es necesario conocer los componentes esenciales para un análisis preciso y efectivo, tomando como referencia ciertos principios hidráulicos que serán descritos posteriormente.

Este trabajo investigativo contiene un análisis general empezando por el reconocimiento de pérdidas de agua en una red de abastecimiento, seguido por los métodos de análisis y toma de datos exclusivamente para pérdidas reales. Dicha información puede ser determinada bajo dos procedimientos: medidas de campo, obteniendo información actual de la zona en estudio; y el uso de ciertos procedimientos utilizando una hoja de cálculo.

Se expondrán los datos encontrados de acuerdo a los requerimientos, y se gestionará la presión de tal manera que se pueda evaluar el ahorro de agua suministrado frente a las fugas existentes en el sistema. Existirá un caudal inyectado a la red que será medido, al igual que el caudal de consumo representado por los medidores o conexiones domiciliarias. Finalmente se

tendrá un caudal de pérdidas, siendo este el primer nivel de un balance hídrico.

Entre los principios hidráulicos se toma como referencia el teorema de Bernoulli y el de Torricelli, que incorpora una velocidad teórica para un orificio (*fuga*) bajo un volumen de agua, teniendo como componentes la gravedad y la altura del líquido (*presión*). A partir de ahí se podrán calcular valores de presión en términos de altura bajo una constante  $K$ , y con el desarrollo esencial de la ecuación F.A.V.A.D (Fixed And Variable Área Discharge paths) que será expuesto más adelante.

Para el proceso de estimación de las pérdidas reales (fugas en la red), se debe tener en cuenta la cantidad de agua usada durante las 24 horas del día y las presiones que esto conlleva; por lo general en el día se consume más agua que en la noche, por consiguiente, las presiones generadas a tempranas horas serán de pequeña escala comparándolo con las presiones nocturnas. Al haber más presión, una red de tuberías esta propensa a experimentar mayor caudal de fugas. Posteriormente los análisis de gestión de presiones empiezan su desarrollo y buscarán reducir las presiones de una manera precisa y efectiva.

Como conocimiento general se detallarán ciertos instrumentos para el control de pérdidas y sus diferentes formas de uso. Estos dispositivos por lo general son ubicados en la entrada de suministro de agua, el objetivo de este estudio es afectar el comportamiento de toda una red.

## **2. CAPÍTULO 2: MARCOS DE REFERENCIA**

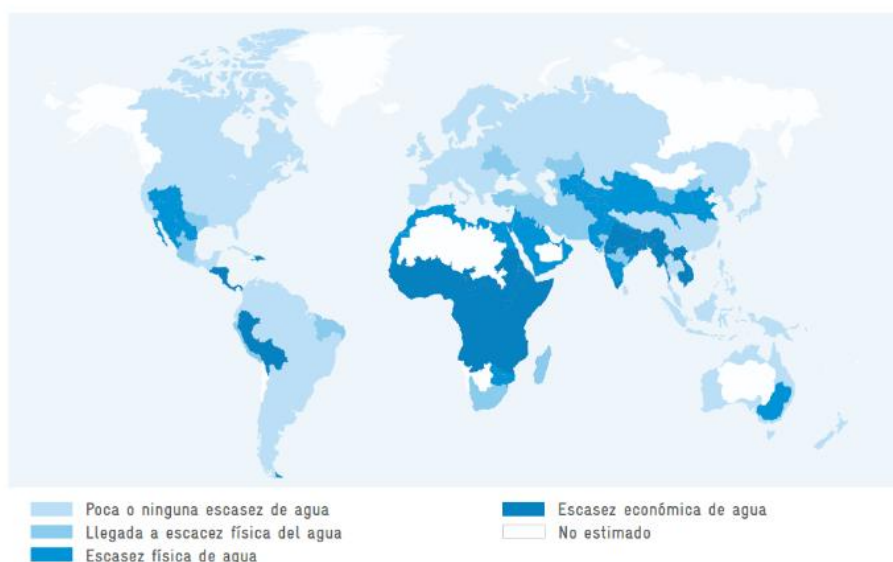
### **2.1. PÉRDIDAS DE AGUA**

En estos primeros años del siglo XXI, 900 millones de personas alrededor de la séptima parte de la población mundial, carecen de suficiente agua potable.

La escasez de agua y la mala calidad de este recurso son causas principales de la pobreza, la mala salud y la degradación ambiental. (GIZ & VAG, 2011)

El agua dulce es esencial para el ser humano, es utilizada para el desarrollo de muchas actividades que nos generan sostenibilidad y prosperidad. Pero con los cambios mundiales que ocurren con el pasar el tiempo, este recurso se ha vuelto escaso en ciertas zonas, por tanto, es de vital importancia aprender a administrar y aprovechar este bien de la mejor manera, evitando el desperdicio.

**Ilustración 1:** Escasez de agua a nivel mundial



**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

La figura mostrada representa la escasez de agua que hay en el mundo, entre las zonas más afectadas están: África, Medio Oriente y Sur de Asia.

La pérdida de agua por *fugas* en una red de abastecimiento logra que se efectúen ciertos estudios globales, en donde se compara el consumo de agua contra las pérdidas generadas, y se ha concluido que dichas pérdidas pueden llegar al 50% del suministro (volumen) total de agua. Esto en términos monetarios, se estiman grandes cantidades de dinero que pueden ser aprovechados en nuevas formas de suministro de agua o también abasteciendo a otras poblaciones en vías de desarrollo.



El crear nuevas alternativas para la reducción de pérdidas de agua, ayudaría significativamente en el ámbito técnico, político, económico y ambiental. Además, las empresas públicas o privadas encargadas del suministro de este líquido vital, ahorrarían recursos para el tratamiento de agua y su posterior suministro.

### 2.1.1. BALANCE HÍDRICO

**Tabla 1:** Balance Hídrico según el I.W.A (International Wáter Association)

Volumen de entrada al Sistema	Consumo Autorizado	Consumo autorizado facturado	Agua facturada exportada	AGUA FACTURADA
			Consumo facturado medido	
			Consumo facturado no medido	
		Consumo autorizado no facturado	Consumo no facturado medido	AGUA NO FACTURADA
			Consumo no facturado no medido	
			Pérdidas Aparentes	
	Pérdidas Reales	Inexactitudes de los medidores y errores de manejo de datos		
		Fugas en las tuberías de aducción y distribución		
		Fugas y reboses en tanques de almacenamiento		
				Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente

**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

La Asociación Internacional del Agua (IWA) ha desarrollado métodos estándar para ayudar a las empresas que dan el servicio de agua potable, a rastrear las pérdidas en sus sistemas de distribución en los últimos años. Estos métodos son la base para la implementación de estrategias de auditoría y conservación del agua que ahora se utiliza con mucho éxito alrededor del mundo.

Una de esas bases mencionadas es el Balance Hídrico. La auditoría que esta realiza, determina el tipo y la cantidad de pérdida de agua existente en un

sistema de abastecimiento con ayuda de indicadores de rendimiento, que pueden calcularse para medir el nivel y el volumen de las pérdidas de agua. La terminología y las definiciones estandarizadas en el Balance Hídrico son cruciales para una medición consistente. Estos estándares son necesarios para realizar un seguimiento preciso tanto del rendimiento como de las mejoras o reparaciones que se le haga al sistema. Según la clasificación mostrada en la tabla del Balance Hídrico, toda el agua que ingresa y sale del sistema de distribución se puede clasificar en una de esas categorías definidas posteriormente.

Cabe recalcar que esta tabla está totalmente balanceada porque representa la totalidad del agua utilizada en un sistema de abastecimiento de agua potable, por consiguiente, la suma de cualquiera de sus columnas dará como resultado el volumen de entrada total al sistema.

- ▲ **Volumen de entrada al sistema:** Definida como la cantidad de agua que se produce y se inyecta a un sistema de distribución de agua. También incluye el agua que ha sido comprada de otro proveedor para completar las necesidades del sistema. Es importante que este valor sea medido y validado; pues es el primer número y de mayor cuantía incluido en esta auditoría de consumo de agua.
  
- ▲ **Consumo autorizado:** Catalogada como el agua utilizada por los clientes incluidos en el sistema de distribución de agua. El consumo autorizado es la suma del consumo autorizado facturado y el no facturado, siendo estos dos parámetros cantidades conocidas. También incluye agua suministrada a otros sistemas de distribución (agua exportada).

**Consumo autorizado facturado:** Medida correspondiente a toda el agua *contabilizada y facturada*. Considerada como la fuente principal de ingresos en una empresa distribuidora de agua potable.

- ⤴ **Consumo facturado medido:** Es un consumo autorizado medido de una manera directa. Es la cantidad de agua que genera ingreso a través de la facturación periódica del consumidor.
- ⤴ **Consumo facturado no medido:** Es un consumo autorizado que se basa en un presupuesto o tarifa fija. Este método de facturación se utiliza en clientes que no cuentan con medidores de consumo de agua. El uso estimado se basa generalmente en datos históricos o un uso promedio. La tarifa puede variar de acuerdo al tipo de clientes (comerciales, residenciales o industriales).

**Consumo autorizado no facturado:** Consiste en usos conocidos del agua tolerados por la misma empresa para los cuales no se reciben ingresos. Este valor puede ser medido o no. Como ejemplo se puede mencionar el agua utilizada para limpiar las calles de la ciudad, el llenado de piscinas públicas, o el agua utilizada por el departamento de bomberos. Todos son usos legítimos del agua con pleno conocimiento de utilidad.

- ⤴ **Consumo no facturado medido:** Es la cantidad de agua que no genera ingresos, pero se contabiliza y no se pierde en el sistema. El agua utilizada en el proceso de su tratamiento o el agua suministrada sin cargos, son claros ejemplos de estas cantidades.
- ⤴ **Consumo no facturado no medido:** Cantidad de agua autorizada como parte del uso en el sistema, pero no se mide directamente y no genera ingresos. La evacuación de agua desde la red y su consumo contra incendios son ejemplos que entran en esta categoría.

Es necesario recordar que algunas veces la información más básica como el volumen de entrada a la red, la presión promedio, el tiempo de suministro, la longitud de red, y el número de conexiones domiciliarias, no estarán inicialmente disponibles para un profundo análisis del estado de la red. Los procesos de cálculo de cada uno de los componentes del Balance Hídrico y sus indicadores de rendimiento son capaces de revelar tales deficiencias en

el sistema, siendo importante tomar medidas correctivas a estos procesos principalmente en el sector administrativo de las entidades públicas o privadas.

### **2.1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE AGUA**

Continuado con la aclaración de conceptos de la tabla N2, se explicará en más detalle las diferentes maneras en las que el agua suministrada a una red, puede ser desperdiciada.

La pérdida de este líquido es un componente del *agua no facturada*, es decir, que no está controlada por el factor monetario y causa pérdidas significativas a las empresas públicas o privadas que proveen este servicio de suministro. Según estudios muchas entidades pierden millones de dólares al no controlar esta situación, y malgastan la posibilidad de tener mayor rentabilidad en sus proyectos e incursionar en unos nuevos para un mayor desarrollo.

Las pérdidas se subdividen en: *aparentes* y *reales*.

#### **▲ Pérdidas aparentes:**

En muchos casos se consideran a las pérdidas aparentes como pérdidas comerciales. Estas reflejan errores, producto de la estimación de los siguientes procedimientos: cuantificación de agua utilizada, falla de transferencias, mediciones de datos, y así como también el uso ilegal de agua (uso no autorizado/hurtos), generalmente el agua llega a su destino final pero no puede ser medida con exactitud.

Tratar estos componentes mencionados de una manera coordinada, tendrá como resultado la reducción periódica de pérdidas aparentes también a un nivel económico.

En ciertos casos puede ser certero comenzar con la reducción de estas pérdidas, como una estrategia de reducción de agua no facturada.

▲ **Pérdidas reales:**

Abarca todo lo concerniente a fugas desde el punto inicial de suministro de agua (tanques de almacenamiento), hasta los medidores de los usuarios en una red de abastecimiento. Generalizando estas abarcan un escape físico del sistema, ya sean fugas o desbordes que se generan por el continuo aumento de la demanda de agua.

Estas pérdidas pueden ser medidas y contabilizadas por ciertos métodos, estarán directamente relacionadas con la presión del sistema, el cual será regulado mediante un control (disminución) de presiones en base a parámetros críticos.

## **2.2. PÉRDIDAS REALES**

Como pérdidas reales se considera al agua perdida en una red de tuberías bajo un periodo determinado por medio de fugas, reboses o explosiones dentro de ella. Estas pérdidas se clasifican según su ubicación, tamaño y tiempo.

### ***Según su ubicación***

▲ *Fugas desde los puntos de transmisión y distribución:*

- ▲ Puede ocurrir a lo largo de la tubería por acción de cambios geológicos o por corrosión del material, también en uniones por casos como rotura de empaques o desconexiones, y por último están las fugas en válvulas que hayan cumplido su ciclo útil o por falta de mantenimiento.

Por lo general estas pérdidas tienen flujos medianos/altos y son desde corta a mediana duración.

▲ *Fugas en las conexiones domiciliarias:*

Estas conexiones de servicio llegan hasta el medidor del cliente y son consideradas el punto más vulnerable de una red, las conexiones

empleadas tienen un porcentaje de fallas considerablemente alto. Estas fugas son difíciles de detectar por el bajo flujo que presentan y su larga duración.

▲ *Fugas por rebose en tanques de almacenamiento:*

Estas son causadas por falla en los controladores del nivel de agua o también por fisuras en las paredes impermeables del tanque. Dichas fugas son subestimadas, pero son muy fáciles de detectar y con un costo de reparación considerablemente alto.

**Según su tamaño y tiempo de fuga:**

▲ *Fugas reportadas:*

Se producen por estallidos inmediatos en redes de tubería o entradas de distribución, el agua derramada irá directamente a la superficie dependiendo de la presión existente, el tamaño de la rotura y el tipo de suelo. Este tipo de fugas son fáciles de detectar porque se encuentran en la superficie y existe una notificación a la empresa gestora del agua por parte del cliente.

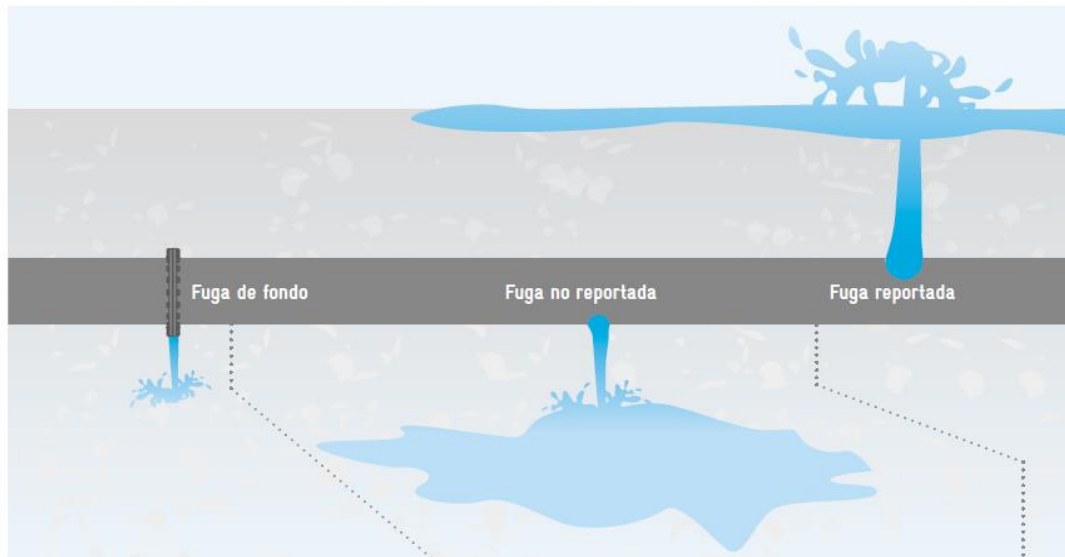
▲ *Fugas no reportadas:*

Estas tienen altas presiones y caudales, pero por situaciones no favorables, no emergen y la única manera de poder detectarlas es mediante instrumentos de medición acústicos o por un análisis zonal, comparando el suministro de agua en la red con el consumo.

▲ *Fugas de fondo:*

Esta genera pérdidas de agua con caudales menores y pequeñas presiones. Son consideradas las fugas provenientes de goteos y filtraciones en accesorios o válvulas. Estas representan una gran parte de las pérdidas reales, pues no son detectables por métodos acústicos y por su acción continua.

**Ilustración 2:** Tipos de fugas según su tamaño y tiempo



**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

En los países en desarrollo, generalmente las redes de abastecimiento de agua potable funcionan de manera constante, y pese a no haber una pausa en su distribución, las fugas existentes en ella generan permanentemente pérdidas de agua. Por las noches el consumo de agua es mínimo, en consecuencia, la presión de la red no se distribuye a las conexiones domiciliarias (no se alivia dicha presión). Esto lleva a un apartado, en el que la red está con una presión máxima, la cual hará que las fugas emergentes expulsen una mayor cantidad de agua.

### 2.2.1. GESTIÓN DE FUGAS

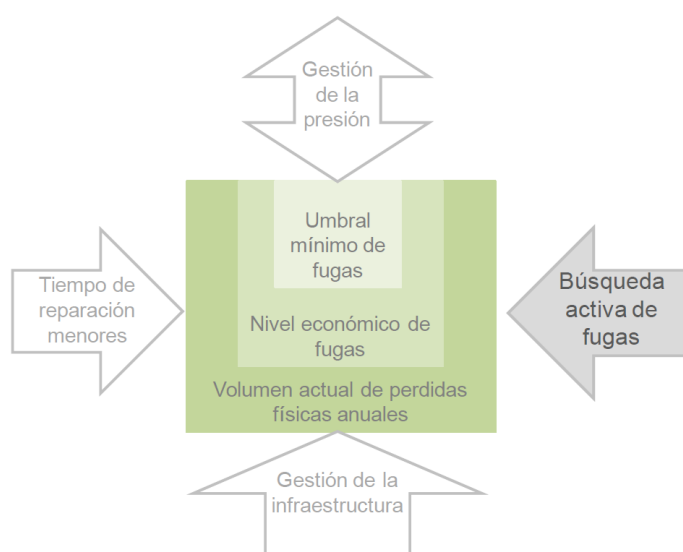
Las gestiones de fugas se definen como las actividades o procedimientos técnicos que realiza la empresa de abastecimiento de agua, para lograr la reducción de la cantidad de fugas existentes y los efectos que estas tienen hasta niveles que sean aceptables, manteniendo las condiciones físicas, económicas y sociales en la red bajo un estado ideal.

- ✦ El primer paso para una gestión de fugas consiste en la contabilización de las pérdidas, determinando el nivel de fugas actual evaluando el estado de la red.
- ✦ Se realiza un análisis costo – beneficio para evaluar los procedimientos de reducción del caudal de fugas registrado, considerando que existen

ciertos procedimientos que son rentables hasta cierto punto y que pueden existir implementaciones con altos costos operativos y una baja eficiencia.

- ⤴ Se ponen en práctica las estrategias de reducción de fugas establecidas por la IWA, dando como recomendación su aplicabilidad en redes sectorizadas permitiendo un mejor control del caudal suministrado.

**Gráfico 3:** Estrategias definidas por la IWA para una eficiente gestión de fugas.



**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

**Búsqueda activa de fugas:** Este aplica técnicas de localización y reparación de fugas no reportadas en una red, conociendo por cierta metodología el caudal fugado y las zonas en la que estas existen. El objetivo es el de reducir el tiempo de desperdicio de las fugas para una disminución considerable de las pérdidas reales. Se mencionan algunas técnicas para control activo de fugas, como:

- ⤴ Sondeos en conexiones y accesorios de las tuberías.
- ⤴ Mediciones zonales o por distrito, calculando el total de flujo de entrada a la red en un periodo determinado.
- ⤴ Mediciones continuas o intermitentes de los caudales nocturnos.



- ▲ Aplicación de detectores acústicos de fugas.

Dichas estrategias son de gran importancia. En ocasiones las fugas no reportadas, al tener un caudal bajo pero continuo, pueden lograr el desperdicio de grandes cantidades de agua debido a que su tiempo de localización es largo, comparado con las fugas reportadas que son rápidamente detectables.

Según Pearson (2007), durante el control activo de fugas, es recomendable tomar medidas de control al momento de reparar varias fugas al mismo tiempo, esto puede provocar nuevas fugas como consiguiente de la mala práctica en las reparaciones, o también el incremento del caudal fugado existente. Esto da la pauta para concluir que existe una posible relación entre el control activo de fugas y la frecuencia con que aparecen las roturas.

**Gestión de la presión:** Considerada como una estrategia fundamental aplicada en la reducción de caudales de fugas. Tiene como objetivo calibrar de alguna manera las presiones en toda la red, obteniendo un manejo eficiente. Esto es aplicable para las fugas detectables como para las no detectables (fugas de fondo). Al variar los valores de presión también existirá un cambio en la velocidad de las fugas, las presiones disminuyen a tal punto que alcanzan un valor ideal el cual deberá ser mantenido durante todo el día, sobre todo en la noche donde el consumo de agua es menor y la red experimenta incrementos de presión.

**Gestión de la infraestructura:** Es una actividad que se encarga del mantenimiento y renovación de los elementos defectuosos en una red de abastecimiento de agua potable.

Respecto al mantenimiento están del tipo correctivo y preventivo, en el primero se ejecutan cuando los usuarios reportan las fugas y estas son reparadas de manera inmediata. Para el segundo caso se realiza cierta planificación de acciones de control, como la inspección general de los componentes de la red, para la prevención de futuras fugas. Ambos casos

ayudan de una manera significativa a mantener óptimamente las condiciones de la red.

Con relación a la renovación, este procedimiento se refiere al reemplazo de los componentes de la red en función de los daños encontrados, estos pueden presentarse por fugas de agua constante o porque el elemento ya alcanzó su vida útil de servicio.

Todos estos procedimientos dependerán netamente del tamaño de la red y de los recursos disponibles que la empresa tenga para invertir en ello. Hay que tomar en cuenta que, al realizar dichas actividades se aumentará la vida útil de la red y se mejorará el servicio de suministro de agua, reduciendo en gran parte las fugas.

**Tiempo de reparación:** Concerniente a las reparaciones de fugas, al ser reportadas de una manera rápida y segura, se podrán reducir en parte los volúmenes de pérdida de agua. Es necesario valorar el agua desperdiciada desde el momento de la aparición de la fuga hasta su reparación completa, y para ello se distinguen tres etapas:

1. Cálculo del tiempo desde que aparece la fuga hasta su reporte con la empresa.
2. Lapso entre el conocimiento de la fuga y su localización en sitio.
3. Período entre su localización física y la reparación completa.

Si se desea tener un mejor manejo y ahorro de caudales fugados, es necesario entender que la velocidad y la calidad de las reparaciones son parte fundamental de este propósito. Al actuar de manera súbita, existirá un decremento de los potenciales desperdicios de agua, aunque es probable que estas acciones rápidas generen gastos adicionales a la empresa y mucho más si el control no es el adecuado. En este de caso es fundamental, que intervenga personal calificado con el suficiente conocimiento y práctica en el tema, cumpliendo las siguientes normas de seguridad:

- ▲ Equipo de seguridad idóneo para el personal.
- ▲ Seguridad estructural del pozo excavado para reparaciones profundas.
- ▲ Señalización y desvíos de tráfico.
- ▲ Iluminación en caso de que se ejecuten trabajos nocturnos.
- ▲ Bombeo de agua excedente para un lugar de trabajo relativamente seco.
- ▲ Información de los clientes afectados (zona de impacto de la fuga).

Al realizar las reparaciones aplicando las estrategias explicadas, esta alternativa de gestión de fugas culmina con el control y mantenimiento del sistema, asegurándose la preservación del agua suministrada en la red de distribución.

### **2.2.2. GESTIÓN DE LA PRESIÓN**

Se define a la gestión de la presión como la práctica de manipulación de las presiones en un sistema de tuberías, conduciendo a niveles de operación óptimos y eficientes asegurando un suministro de agua suficiente y eficaz. Este método es el único utilizable para los 3 tipos de fugas antes mencionadas, reduciendo las pérdidas reales de agua y eliminando en gran parte las presiones excesivas, causantes de nuevas roturas en las tuberías dentro de las redes de distribución de agua.

Para una correcta evaluación de las fugas es necesario apoyarse en el teorema de Torricelli; como también determinando la forma y material con el cual se está trabajando. Este procedimiento se simplifica en el siguiente ejemplo, que analiza el caudal de fuga para un agujero de 6 mm en distintas presiones y materiales de tuberías.

**Tabla 2:** Caudales de fuga para un agujero de diámetro 6 mm, sometido a distintas presiones

Φ agujero	Material de tubería	Exponente de fuga	Caudal de fuga según presión		
			50 m	40 m	30 m
6mm	Rigido (acero, hierro forjado...)	0.5	1800 m <sup>3</sup> /h	1610 m <sup>3</sup> /h	1394 m <sup>3</sup> /h
6mm	Flexible (PE, PVC...)	1.5	1800 m <sup>3</sup> /h	1288 m <sup>3</sup> /h	837m <sup>3</sup> /h

**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

Como aclaración breve, el exponente de fuga dependerá del material de tubería el cual será explicado más adelante. Al variar la presión de 50 m a 30 m, existe un decline considerable de caudal, tanto para la tubería rígida como la flexible, y más para esta última disminuyendo el caudal de fuga un poco más del 40%.

Estas comparaciones resultan muy útiles para entender el beneficio que se tendría al efectuar este método de gestión de presiones, que puede ser aplicable a poblaciones grandes que manejan altas presiones en los sistemas, y a pequeñas comunidades con presiones bajas aprovechando el agua de una mejor manera.

### 2.2.2.1 PROPÓSITO DE UNA GESTIÓN DE PRESIONES

Como ya se conoce, las grandes presiones de agua en redes de tubería pueden lograr ciertas roturas agravando la vida útil del sistema. Si se evalúa una relación entre la presión ejercida y la fuga; a mayor presión, mayor será el caudal generado por la fuga, y lo mismo ocurre si se evalúa de manera inversa. Al realizar una gestión de presiones, se logra una optimización de la red, regulando el suministro de agua y evitando desperdicios excesivos, siendo no solo aplicable en redes existentes, sino también en proyectos futuros.

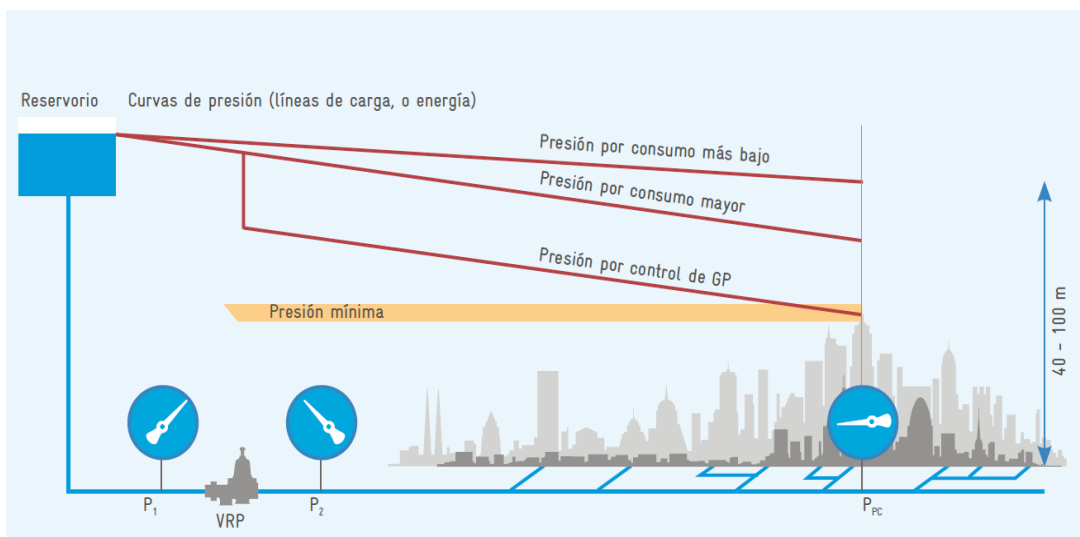
Thornton et al. ha definido generalmente la gestión de la presión como la práctica de manejar presiones del sistema a niveles óptimos de servicio, asegurando suministro suficiente y eficiente para usos y consumidores legítimos, a la vez que se reduce las presiones excesivas innecesarias, y se

elimina las transiciones y los controles de nivel defectuosos, todo esto hace que el sistema de distribución fugue innecesariamente. (GIZ & VAG, 2011)

Al reducir los valores de presión, se toma como base la presión requerida mínima en el punto crítico del sistema determinado por las empresas que dan el servicio de abastecimiento de agua, pero su ubicación no siempre será la misma todo el tiempo, esto dependerá de las variaciones de consumo, convirtiendo el sistema en una red heterogénea. Adicionalmente es necesario evitar las presiones negativas, como por ejemplo; cuando se está usando redes contra incendio en donde las presiones requeridas son muy elevadas, o en la hora de máximo consumo de agua.

En ciertas ciudades de Alemania, durante el día se requiere en las redes de abastecimiento, una presión mínima de 15 metros, como en la noche existe un consumo de agua bajo, las presiones ascienden hasta 60 metros, convirtiendo en un buen sector para validar la aplicabilidad de la gestión de presiones, regulando y disminuyendo pérdidas de agua importantes.

**Ilustración 3:** Visualización de las presiones dentro de un sistema de distribución de agua.



**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

En el gráfico mostrado, se explica de una manera simple un sistema de gestión de presiones, en donde la presión se distribuye a lo largo de la red

desde  $P_1$  (entrada),  $P_2$  (salida), hasta su punto crítico  $P_{PC}$ . Si no se aplicara este método, la presión crítica tendría variantes considerables durante el día, porque los consumos generados no son los mismos. Para este procedimiento se puede mantener dicho valor  $P_{PC}$  cercana a la presión mínima, empleando variantes en la válvula reguladora de presión (VRP).

Existen diversas soluciones técnicas únicas para cada tipo de red, es por eso que estos tipos de análisis e implementación, tienen que ejecutarse según los valores arrojados en los estudios de consumo. Las válvulas reguladoras de presión no son las únicas herramientas para la aplicación del método en un sistema, es posible utilizar también bombas de velocidad controlada, registrando la presión y sustituyendo directamente a la bomba alimentadora de agua principal.

Existen varios factores que componen una reducción óptima de la presión, clasificados de la siguiente manera:

**Tabla 3:** Factores que componen un sistema óptimo de reducción de presiones

Ubicación de la modulación	Tipo de modulación	Tipo de válvula	Tipo de ingreso
Punto local	Presión de salida fija	Válvula de diafragma	Único
Punto crítico	Presión basada en el tiempo	Válvula de paso anular	Múltiple
			Dinámico
			Micro y macro

**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

## 2.2.2.2. BENEFICIOS DE LA GESTIÓN DE LA PRESIÓN

**Tabla 4:** La gestión de presión y sus beneficios

Beneficios para la conservación		Beneficios para la empresa de agua			Beneficios para el cliente	
Fugas reducidas		Frecuencia reducida de estallidos y fugas				
Consumo reducido	Caudales reducidos de fugas y estallidos	Costos de reparación reducidos en las troncales y servicios	Renovaciones diferidas y mayor vida de activos	Costo reducido de control activo de fugas	Menos reportes de clientes	Menos problemas en las tuberías y aparatos de los clientes

**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

La reducción de la presión en una red de abastecimiento de agua potable, es la solución más rápida para lograr la reducción de pérdidas reales, con una relación inversión/recuperación bastante corta (menor a un año).

Al reducir las presiones, los consumos de agua en ciertos sectores decrecerán, el agua suministrada no será tan acelerada y estará regulada. Según un estudio de pérdida de agua de la entidad IWA (International Water Association), descubrió que la reducción de la presión disminuye potenciales estallidos y roturas en las tuberías, otorgándoles una mayor vida útil tanto en uniones y accesorios.

Al reducir en parte las pérdidas reales en un sistema será posible; la adición de más conexiones domiciliarias, una equidad en el suministro de agua, y para las empresas, una reducción de costos operativos como es el costo de producción y de energía.

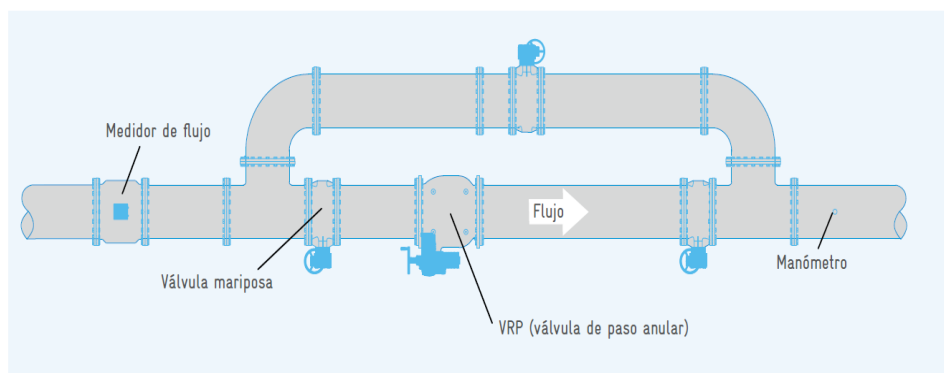
Es necesario recordar y recalcar que la gestión de presiones no suprime en la totalidad las pérdidas de agua, solo reduce los impactos que pueda tener la red y disminuye en gran parte su desperdicio. Es por eso que dicho método debe catalogarse como uno de los componentes para una exitosa reducción de pérdidas, siendo este un buen punto de partida para empresas que brindan este servicio de suministro de agua, y que la inversión que realicen sea recuperable a corto plazo.

### 2.2.2.3. VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN

Uno de los componentes de mayor importancia para una óptima gestión de presiones es la inclusión de válvulas reguladoras de presión o PRV (Pressure regulating valve). Estos instrumentos son los encargados de modular el caudal y la presión en la localidad más importante de la red, considerado como el punto de entrada donde empieza el respectivo suministro de agua.

En este apartado se muestra una imagen de una válvula reductora de presión con algunos componentes, incluyendo un bypass y medidor de flujo.

**Ilustración 4:** Ejemplo de un sistema de bypass con su respectiva válvula reguladora de presión y medidor de flujo.



**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

Hay ciertas variables que se deben tomar en cuenta para seleccionar el tipo de válvula que se utilizará para la gestión de la presión. Al elegir qué válvula usar, se deben incluir los siguientes factores en el proceso de selección:

- ▲ Confiabilidad
- ▲ Calidad
- ▲ Idoneidad,
- ▲ Mantenimiento
- ▲ Estandarización



## ▲ Soporte

Los dos tipos de PRV más comunes en el mercado son las válvulas de diafragma y las válvulas de émbolo.

### **Válvulas de diafragma:**

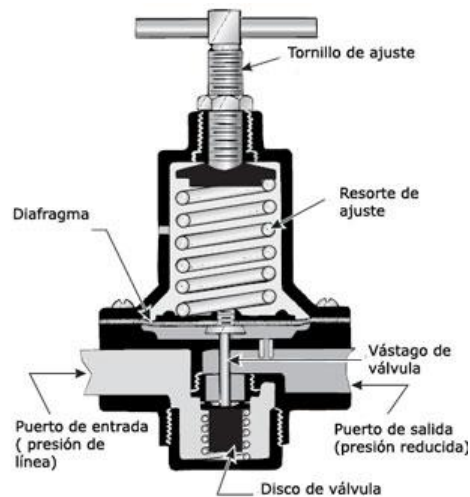
También llamadas válvulas de membrana, generalmente consisten en una válvula principal accionada hidráulicamente y un circuito automatizado. Se encuentran disponibles diferentes subtipos de válvulas de diafragma, como son las del tipo globo, tipo Y o válvulas de sellado directo, que varían en forma, características de flujo y mecanismos.

La válvula principal consta de tres partes principales: el cuerpo, la tapa y el conjunto del diafragma. El conjunto de diafragma es la única pieza móvil en la válvula principal. El diafragma, generalmente hecho de caucho sintético, se sujeta entre el cuerpo y la cubierta para separar la presión de control de la presión de la línea. Cuando la abertura del orificio de la válvula disminuye, se introduce más agua en el espacio entre la cubierta y el diafragma, por consiguiente, la válvula se modula a su posición cerrada, y viceversa.

La presión de salida de la válvula se puede ajustar simplemente girando un tornillo hasta alcanzar la presión fija deseada. Este tipo es netamente operado hidráulicamente y no se requiere una fuente de alimentación externa ni baterías.

Las válvulas de diafragma son típicamente de apertura rápida y ofrecen un gran aporte bajo condiciones de bajo flujo. Los pequeños recorridos de la válvula causan grandes aumentos de flujo al comienzo de su apertura; por lo tanto, las válvulas de diafragma pueden estar sujetas a inestabilidad en condiciones de bajo flujo. Estas inestabilidades de regulación pueden causar oscilaciones y fluctuaciones de presión no deseadas dentro del sistema.

### **Ilustración 5: Partes de una válvula de diafragma**



**Fuente:** <http://www.sapiensman.com/neumatica/images/valvula-manorreductora.jpg>

### Válvulas de émbolo:

También conocidas como válvulas de pistón o válvulas de aguja, son igualmente adecuadas para reducir y controlar las presiones y caudales de manera segura y confiable.

A diferencia de las válvulas de diafragma, que se accionan hidráulicamente, las válvulas de émbolo requieren actuadores externos accionados de manera manual, neumática o eléctrica. Las presiones y caudales se controlan variando la sección transversal interna de la válvula. Por lo tanto, las válvulas de émbolo consisten habitualmente en el cuerpo de válvula y un émbolo deslizante guiado axialmente, el movimiento lineal del émbolo resulta de la conversión del movimiento giratorio del actuador externo.

Se utilizan diferentes cilindros montados en el émbolo y diferentes secciones de salida para adaptar la válvula de émbolo de manera óptima a su uso previsto. Los cilindros dividen el flujo en chorros de agua individuales que chocan entre sí, con una dirección corriente abajo de la línea central de la tubería, para disipar la energía sin riesgo de cavitación.

Las válvulas de émbolo tienen características de control casi lineales debido a su gran carrera, por esta razón, las válvulas de émbolo demuestran características de regulación muy precisas, incluso a caudales bajos, y están menos sujetas a la oscilación. En la práctica, esto significa que es posible una adaptación más precisa a las condiciones de presión considerando las variaciones de caudales.

**Ilustración 6:** Partes de una válvula de émbolo



**Fuente:** <http://www.directindustry.com/prod/vag-group/product-26045-1885082.html>

*Comparación entre la válvula de diafragma y la de émbolo:*

En las válvulas de émbolo, la sección transversal permite un perfil de flujo simétrico y que el chorro de agua se ubique aguas abajo justamente en el centro de la tubería. Esto permite un intercambio de impulso intenso con el agua circundante y también protege las paredes de la tubería, las burbujas de gas se concentran en su centro. Por lo tanto, el riesgo de cavitación en las válvulas de émbolo se puede minimizar mediante el uso de cilindros

adecuados, incluso si existen diferencias significativas entre la presión de entrada y la de salida. Por el contrario, las válvulas de diafragma están limitadas a una presión diferencial relativamente pequeña. En consecuencia, las válvulas de émbolo facilitan mayores reducciones en la presión.

Se debe considerar la mejor elección de válvula para asegurar la estabilidad de la regulación de presión para una amplia gama de caudales. El factor más importante a considerar en cada válvula es la pendiente de su curva característica, definida como la relación entre el cambio en el flujo y el cambio en el recorrido de la válvula. Las características de flujo típicas de las válvulas reguladoras de presión se pueden categorizar en; apertura rápida, lineal y porcentual.

Las válvulas de diafragma son generalmente de apertura rápida y ofrecen una gran ventaja en condiciones de bajo flujo. Los pequeños recorridos de la válvula causan grandes aumentos de flujo al comienzo de su apertura. Por lo tanto, las válvulas de diafragma pueden estar sujetas a inestabilidad en condiciones de bajo flujo. Estas inestabilidades de regulación pueden causar oscilaciones y fluctuaciones de presión no deseadas dentro del sistema. Las válvulas de émbolo tienen características de control casi lineales debido a su gran carrera. Por esta razón, las válvulas de émbolo demuestran características de regulación muy precisas, incluso en tasas de flujo bajas, y están menos sujetas a la oscilación.

#### **2.2.2.4. TIPOS DE MODULACIÓN**

La modulación establece las diferentes formas de control en válvulas reguladoras en sistemas de gestión de presión, en el cual se añaden ciertos conceptos como la ubicación y tipos existentes, combinando estos factores para dar solución, según parámetros establecidos en diferentes sistemas de abastecimiento.

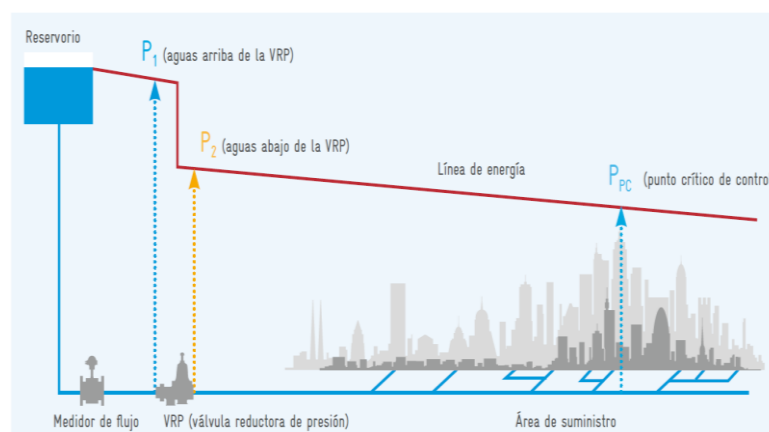
Existen cuatro maneras de operar o controlar una válvula reductora de presión:

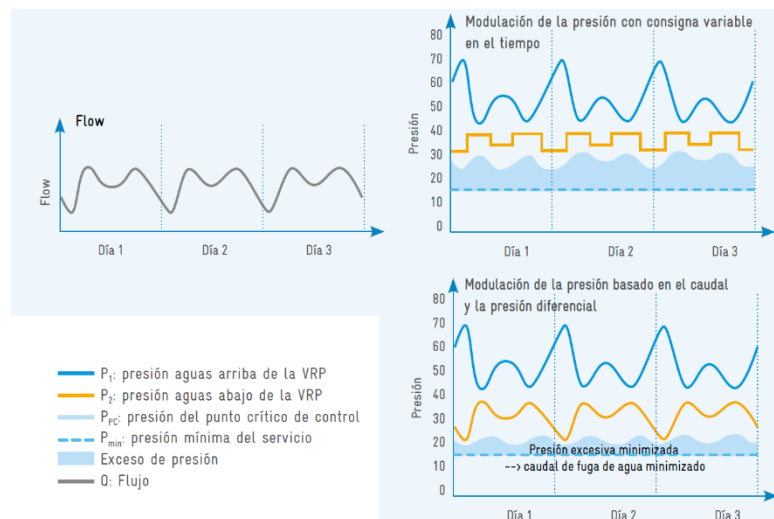
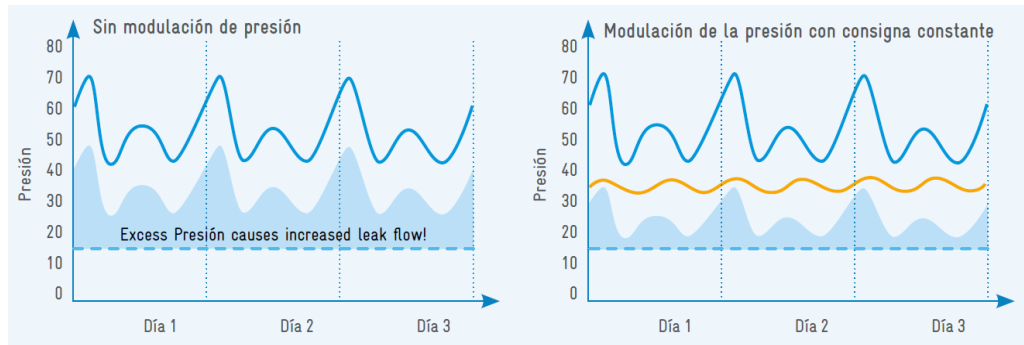
1. *Por salida fija:* Es la operación más básica, manteniendo la presión del sistema de una manera constante durante las 24hrs.
2. *Modulación de la presión con base en el tiempo:* Esto opera según presiones en el día y en la noche, considerando que en la noche se incrementa la presión cuando el consumo de agua es mínimo en el sistema.
3. *Modulación de la presión con base en el flujo en el sistema:* Se establecen distintas presiones de salida para ciertos valores de caudal y así tener un mejor control.
4. *Modulación de la presión automatizada:* Es la manera más avanzada de controlar la presión, ajustándose continuamente de acuerdo al comportamiento de la red según el caudal y presiones emergentes.

Según el método utilizado existirá una mayor o menor reducción de desperdicio de agua, siendo la modulación automatizada la que mayor eficiencia brinda para este fin.

A continuación, se muestra de manera gráfica el comportamiento de las presiones según el modo de operación de la válvula reductora de presión:

**Gráfico 4:** Tipos de modulación y minimización de presiones excesivas





**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

Determinar el punto crítico en una red de abastecimiento de agua es de vital importancia, nos indica dónde la presión es más baja, permitiendo comparar con la presión mínima de operación, y en caso de que el punto crítico lo supere, se podrá reducir sin riesgo a perturbar al sistema entero. La existencia de una presión excesiva en el punto crítico, indica que la gestión de la presión evitaría cierto desperdicio de agua.

### 2.2.2.4.1. MODULACIÓN SEGÚN SU UBICACIÓN

#### ▲ Modulación de la presión del punto local

Consiste en la regulación tanto de la presión de entrada como la de la red, que según el gráfico anterior representan a  $P_1$  y  $P_2$ , considerada la técnica más simple, incluyendo una comunicación entre sensores ubicados en los puntos establecidos conectados a la válvula reguladora de presión. Este procedimiento requiere una baja inversión, pero la limitante es, que las presiones no podrán llegar a un nivel óptimo por los altos factores de seguridad que se incluyen, asegurando la presión mínima de servicio sin lograr un alto ahorro en el caudal de fugas.

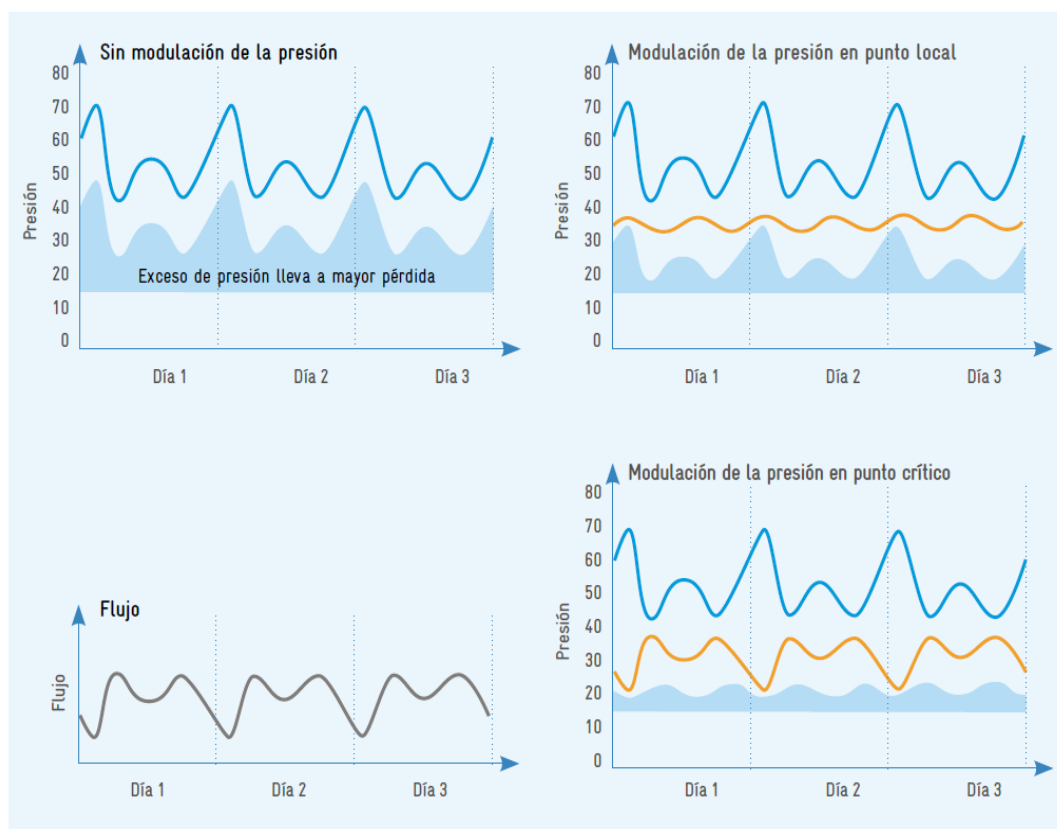
#### ▲ **Modulación de la presión en el punto crítico**

También llamado como modulación remota basada en un nodo, en donde existe un sensor de presión que monitorea estrictamente el punto crítico (donde la presión es más baja), enviando dicha información de su comportamiento a la válvula reguladora encontrada en el ingreso de la red. Esta herramienta de control ajusta de tal manera, que la presión generada en el sistema llegue a la mínima requerida en ese instante.

Esta metodología requiere un poco más de inversión por el sensor a instalarse en el punto crítico de la red, consiguiendo una mayor ventaja al tener mejores resultados en el control de fugas.

La ubicación del punto crítico no siempre será el mismo por diversos factores: puntos de ingreso adicionales, clausura de secciones de tubería o por variantes en el consumo de agua. A continuación, se muestran gráficas modelo, que determinan el comportamiento de la gestión de presiones mediante distintos tipos de modulación.

**Gráfico 5:** Diferentes tipos de modulación y efectos de la reducción de presión



**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

En la ilustración se observa que, en la modulación por punto local, la presión de salida en la válvula reguladora de presión (VRP) se mantiene constante, reduciendo de cierta manera la presión en el punto crítico. Al aplicar el segundo método, la presión arrojada se adapta al comportamiento de la red, manteniendo las presiones en el punto crítico de una manera constante, logrando tener menores excesos.

#### 2.2.2.4.2. MODULACIÓN SEGÚN SU TIPO

En este apartado se conceptualiza en detalle la clasificación explicada al inicio del subcapítulo.

##### ▲ Por salida fija

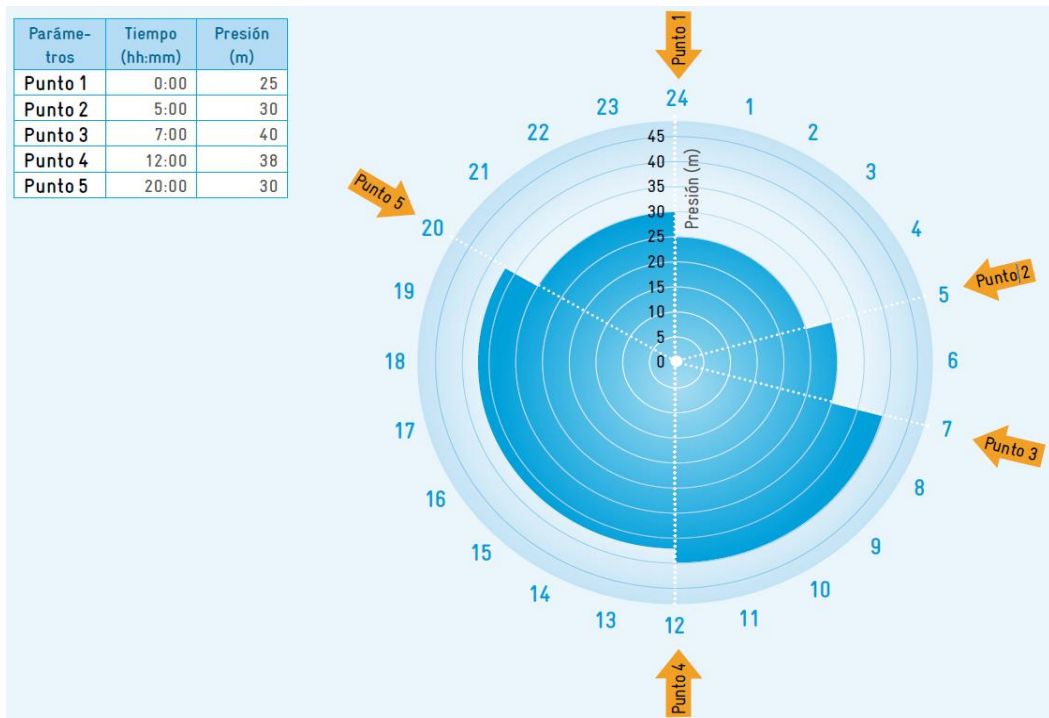


Se determina una presión fija de salida en la válvula reguladora de presión (VRP), asegurándose de que el punto crítico de la red, pueda operar a un nivel mínimo de servicio en una demanda máxima de agua. Esta modulación experimenta un declive cuando las demandas de agua son mínimas y la presión de la red aumenta, lo cual conduce a un descontrol. La modulación por salida fija es muy eficaz en sistemas, en donde se manejan bajos niveles de presiones y con consumos de agua con ligeras variaciones.

#### ▲ **Modulación con base en el Tiempo**

Se establece una medida de presión en la salida la VRP a ciertas horas, siendo el valor más alto en horas del día, y más bajo en la noche en donde los consumos de agua son ínfimos. Este método puede tener cierto grado de complejidad, por tanto, es necesario establecer un patrón de presión para cierto período, y así indicar qué presión de salida deberá adoptar la válvula reguladora mediante un controlador. La siguiente ilustración complementa lo explicado en este tipo de modulación.

**Gráfico 6:** Modulación de la presión en un periodo de 24 horas



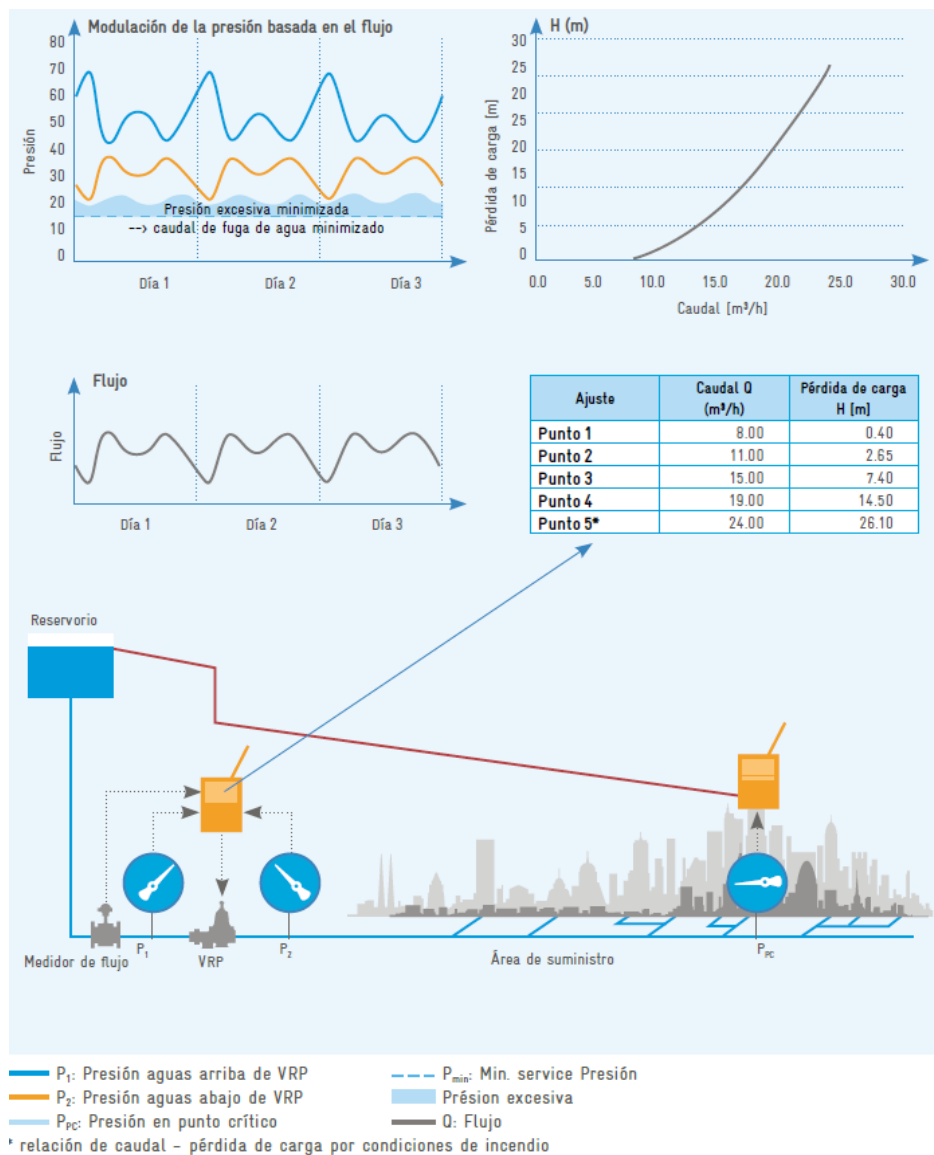
**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

La ilustración explica incrementos y decrementos de presión a manera gradual en la válvula, haciendo que su compuerta no tenga cierres bruscos, evitando posibles daños en la red.

#### ▲ **Modulación con base en el Flujo**

La apertura de la válvula reguladora de presión dependerá de un medidor de flujo instalado en la salida de agua, siendo este el responsable de maniobrar dicho elemento con ayuda de un controlador. El controlador de la VRP compara caudales medios con la relación específica entre la pérdida de carga y el flujo.

**Gráfico 7:** Modulación de la presión basada en el flujo de la red



**Fuente:** Guía para la reducción de las pérdidas de agua, enero 2011

### 2.2.2.4.3. CASOS ESTRATÉGICOS DE OPERACIÓN

Los diferentes tipos de modulación se pueden combinar con otros puntos de ubicaciones y áreas de administración de presión para obtener variados esquemas estratégicos de operación.

*Caso 1: Modulación de punto local con presión de salida fija.*

Esta es la solución de administración de presión más básica y adecuada para áreas sin suministro de energía (ubicaciones remotas). La instalación de válvulas de diafragma con presión de salida fija es relativamente económica y ofrece tiempos de amortización rápidos. Puede ser el primer paso en el establecimiento de áreas de manejo de presión y siempre debe ir acompañado de monitoreo de presión y flujo.

*Caso 2: Modulación puntual local con modulación de tiempo o flujo.*

Este esquema combina la modulación puntual local con el tiempo, por ejemplo, reduciendo la presión en horas de la noche. Es recomendable medir la presión de entrada y la velocidad de flujo durante un período de tiempo significativo para obtener información de la red antes de la implementación del proyecto. La fuente de alimentación (o batería) es necesaria para la válvula reguladora de presión. El diferencial de presión entre las presiones del punto de entrada y salida no debe ser demasiado alto para evitar problemas de cavitación.

*Caso 3: Modulación puntual local con modulación de flujo.*

Este esquema combina la modulación puntual local con la modulación basada en flujo. La presión se reducirá como resultado de un medidor de flujo en la entrada al área de administración de presión que monitorea continuamente el flujo en la zona. Luego, el controlador PRV compara las tasas de flujo medidas con la relación de presión/caudal predefinida permitiendo la entrada de agua estimada.

*Caso 4: Modulación del punto crítico con base en el tiempo*

Este esquema requiere comunicación entre un sensor de presión instalado en el punto crítico del área de administración de presión, y la válvula reguladora de presión. La solución más rentable es trabajar con la red móvil GSM local. La modulación de puntos críticos ofrece mejores opciones para la optimización, por lo tanto, estos sistemas son más rentables que la modulación local de puntos. Es necesario un suministro de energía continuo y estable tanto en el punto crítico como en la ubicación de la válvula reguladora de presión.

### 2.3. EL CAUDAL MINIMO NOCTURNO EN LA GESTIÓN DE PRESIONES

Determinar el caudal mínimo nocturno es de suma importancia, y se ha implementado gracias a ciertos procedimientos propuestos por la Asociación Internacional de agua (IWA) en el proceso del control activo de fugas, cuyo propósito, es el de reducir el tiempo de acción de fugas no visibles (o fugas de fondo) en las tuberías de una red de abastecimiento de agua potable.

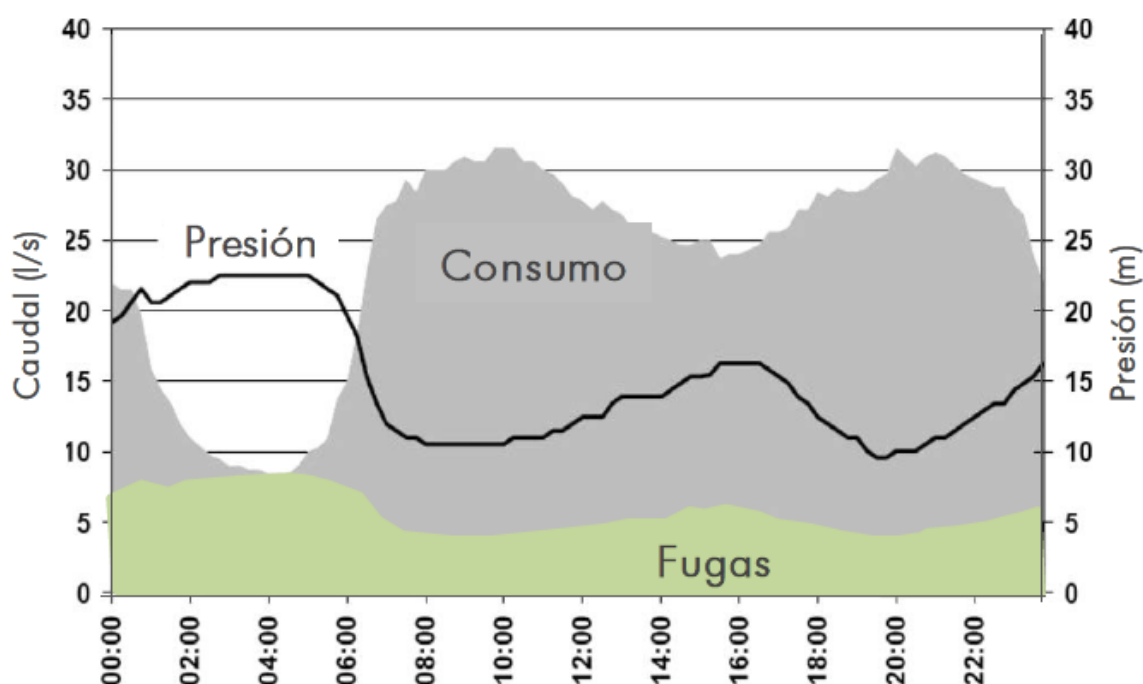
Es importante el conocimiento del caudal fugado en la red a *una hora establecida*, pudiéndose estimar su comportamiento durante ciertos periodos propuestos. Para ello es preciso determinar una diferencia entre el caudal suministrado a la red y el consumo generado, y así obtener el resultado deseado para el mismo periodo en estudio.

$$Q_{fugado} = Q_{ingreso} - Q_{uso\ nocturno}$$

Esta hora establecida, por facilidad y seguridad, corresponde al momento en donde el caudal de consumo es mínimo ( $Q_{uso\ nocturno}$ ), y no solo eso, también cuando la presión crítica en la red sea la máxima posible, llegando a la hipótesis de que en ese momento existirá una mejor precisión en las mediciones y en la estimación del consumo; la presión en la red será la máxima obteniendo un mayor volumen de agua fugado.

Debido a lo establecido, el caudal inyectado se puede dividir en componentes de presión, consumo y fugas como lo indica la siguiente gráfica:

**Gráfico 8:** División del caudal ingresado en una red

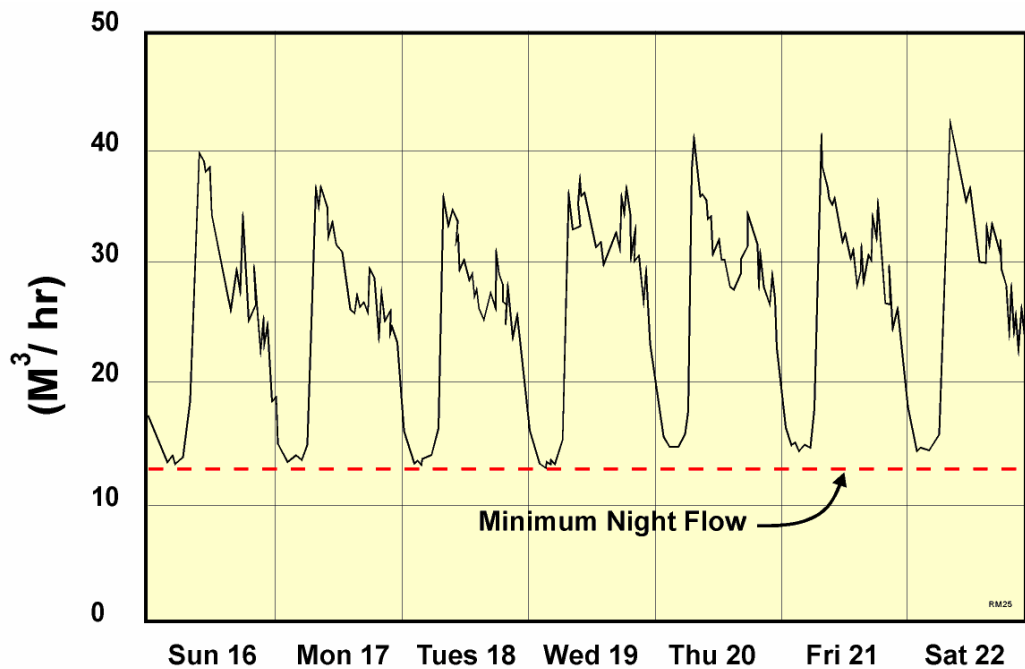


**Fuente:** Método de los caudales mínimos nocturnos, José Escobar - Julio 2011

Según varios estudios realizados por Lambert, Mackenzie, Thornton, entre otros, se concluyó que la mejor hora para efectuar ese tipo de análisis está entre las 2 y 4 de la mañana, donde la mayoría de las personas se encuentran dormidas, sin actividad, y el consumo neto está enfocado al uso de cisternas y consumos relacionados con actividades específicas. No hay que olvidar los establecimientos comerciales, los cuales serán pocos, y su consumo será fácilmente medible. Sin embargo, pueden existir excepciones en donde el consumo mínimo de agua ocurre durante el día y su máximo consumo se da en las noches como es el caso de la ciudad de Las Vegas – Estados Unidos, pero esto no impide la aplicación del análisis.

La medición de caudales nocturnos y la estimación del consumo o uso nocturno, son una de las acciones más importantes, son pautas para la identificación de problemas de fugas en redes de agua potable. Es posible identificar complicaciones significativas simplemente determinando el caudal mínimo de la noche y sus componentes:

**Gráfico 9:** Medición diaria del flujo de entrada en una red sectorizada

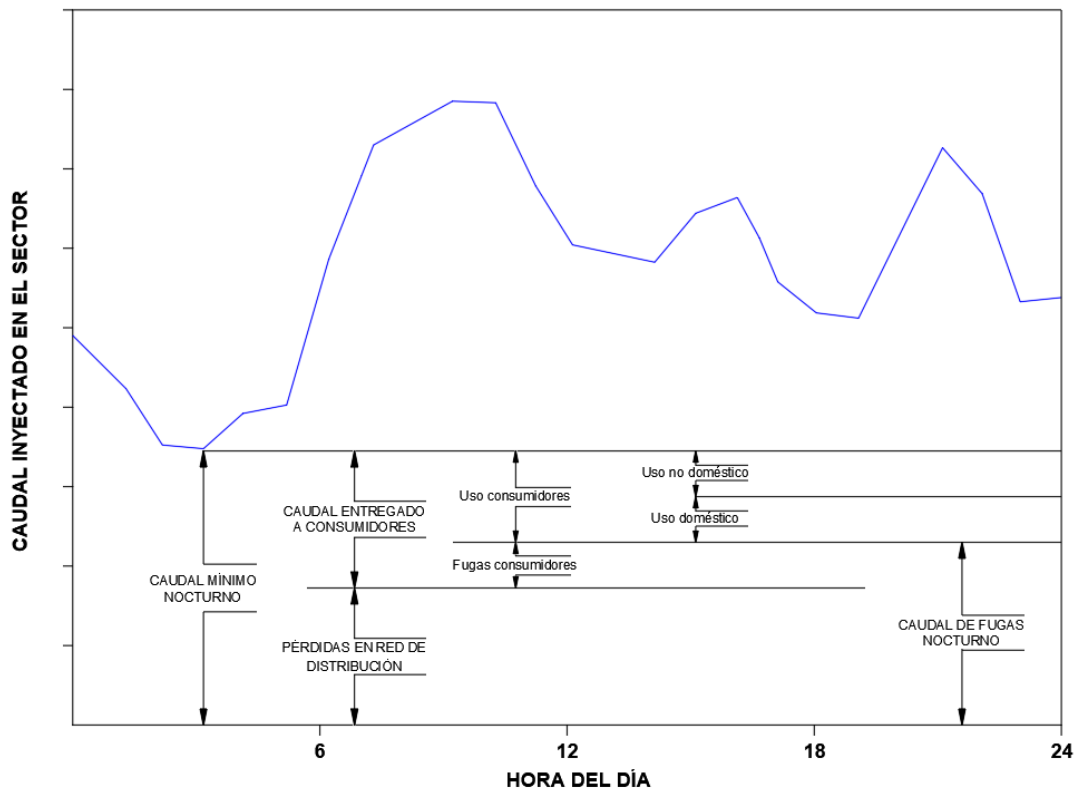


**Fuente:** SANFLOW User Guide – McKenzie 1999

La ilustración 11 muestra un reporte de mediciones de caudal de ingreso a una red de abastecimiento, realizado en 7 días consecutivos, en donde el mínimo caudal suministrado ocurre en las primeras horas del día (al inicio de cada recuadro) generándose un patrón de consumos.

El análisis del caudal mínimo nocturno, metodología desarrollada y establecida en el Reino Unido por la UKWIR (United Kingdom Water Industry Research), está formada por una serie de términos :

**Gráfico 10:** Componentes del caudal mínimo nocturno



**Fuente:** Interpretación de los caudales mínimos nocturnos, Francisco Arregui de la Cruz – Universidad Politécnica de Valencia.

Estos componentes fueron desarrollados de tal manera que puedan ser aplicados internacionalmente con cualquier nivel de detalle, y desde entonces han sido aplicados con éxito tanto en el Reino Unido como en otros países tales como Estado Unidos, Canadá, Bolivia, Sudáfrica, etc.

### 2.3.1 CONSIDERACIONES

- Al identificar el intervalo de medición de caudales de entrada (de 1:00 am a 4:00 am) se recopilarán valores de caudal horario, conjuntamente con mediciones de presión horaria promedio y crítica. El caudal mínimo nocturno en la hora de mínima demanda, será el que presente la mayor presión crítica en el sistema, en donde el caudal de fugas será significativamente grande.



**Tabla 5:** Ejemplo - Caudal mínimo nocturno con mayor presión crítica

Hora	Caudal de entrada (l/s)	Presión de entrada (mca)	Presión promedio (mca)	Presión crítica (mca)
0	112.80	36.80	31.10	28.30
1	106.70	37.30	32.00	29.50
2	108.10	39.50	34.00	31.40
3	107.50	39.80	34.40	31.10
4	109.20	40.00	34.50	31.10
5	111.30	39.90	33.60	30.20

**Fuente:** Autor

▲ Es necesario también tomar en consideración el caudal entregado a los consumidores independientemente de su clasificación (doméstico, comercial o industrial), el cual puede dividirse en dos términos esenciales:

1. Correspondiente a las *fugas en las instalaciones internas*, propiedad de los consumidores, compuesto por consumos con duraciones temporales elevadas y con caudales constantes.
2. Correspondiente al *consumo neto de agua* (Caudal de uso nocturno), con consumos de menor duración y caudales variables.

El componente principal a determinar, el caudal perdido o fugado en la red de tuberías, también denominado como caudal de fugas nocturno, se podrá descomponer en factores más específicos según la ubicación de las fugas, los cuales no se entrará en detalle para este análisis.

Para el desarrollo de la metodología a proponerse en este tema, existirá un enfoque más profundo y detallado en el caudal de uso nocturno. El caudal inyectado a la red en horas nocturnas puede ser fácilmente medido por cierto tipo de dispositivos, mientras que el caudal consumido no es fácilmente cuantificable en ciertas etapas, requiriéndose ciertos procedimientos y consideraciones en base a estudios previos, para su estimación.

### **2.3.2 EL CAUDAL DE USO NOCTURNO**

El consumo de agua en horas de la noche, por lo general se encuentra enfocado a usos en viviendas (consumo doméstico) e industrias (consumo no doméstico). Los consumos domésticos generalmente representan valores de poca magnitud, que por ciertos métodos estadísticos y procesos estimativos, se pueden obtener valores aceptables. Los consumos no domésticos se pueden determinar, e incluso conocer, con cierta precisión mediante mediciones de campo o ciertos procesos con estimaciones planteadas.

#### **2.3.2.1 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DOMÉSTICO**

El consumo doméstico representa el agua usada durante la noche en las residencias que componen la red de abastecimiento en estudio, cuyo caudal predomina en el uso de los sanitarios y llenado de cisternas. El uso del agua para la preparación de ciertas bebidas, como café o té, representa una muy pequeña porción del consumo total de la residencia y es prácticamente descartada. Para las zonas en donde se hacen mantenimientos de jardinería y piscinas, es indispensable considerarlos para una estimación más precisa, por lo que requiere consumos de agua elevados.

Es necesario señalar que el periodo de estudio para la estimación del uso nocturno esta entre la hora 01:00 y 04:00 donde los valores de consumo de agua son mínimos. En algunas partes del mundo, ciertos estudios muestran que aproximadamente un 6% de la población es activa durante dicho periodo, en donde el uso de agua está en 10 litros/habitante-hora. La población activa es representada como un porcentaje de la población total y no deberá ser confundida por el número de propiedades existentes. El valor del uso de agua está basado en la dimensión estándar del tanque de un inodoro (10 litros) y puede variar de acuerdo a la región donde se haga el estudio. Con todo esto se puede definir que para determinar el *caudal de consumo domiciliario* se puede aplicar esta simple formula.

$$Q_{ca} = (\text{poblacion activa} * \text{poblacion total}) * \text{uso de agua promedio}$$

Según la WRC, varios estudios en diferentes partes del mundo, sugiere un consumo domiciliario horario de 1.7 litros o también un consumo de 0.6 litros por persona-hora.

### 2.3.2.2 ESTIMACIÓN DEL CONSUMO NO DOMÉSTICO

El consumo no doméstico es más difícil de evaluar y depende del tipo de edificación localizada en el área en estudio. No es recomendable realizar las mediciones de consumo no domestico por usuario, estos se encuentran agrupados en varias categorías bajo un caudal de consumo asumido para cada una de ellas. Por ejemplo, existen algunos garajes y cafés en donde su atención al público son las 24 horas del día, el consumo por unidad es relativamente pequeño, pero si se las agrupan, el uso total de agua será significativo.

Según el WRC, se ha establecido un rango de uso nocturno de agua para las edificaciones comerciales basado en extensos estudios a lo largo de los años. Todas las propiedades con un consumo de más de 500 l/h serán excluidas de este análisis, estos son considerados como consumidores independientes, por lo que son monitoreados individualmente. Algunos de los valores a considerar se muestran en la siguiente tabla modelo.

**Tabla 6:** Valores promedio de consumo nocturno de acuerdo a su tipo de uso.

GRUPO	TAMAÑO DE MUESTRA	PROPIEDADES ACTIVAS	CONSUMO ESTIMADO POR PROPIEDAD (l/prop-h)	CONSUMO ESTIMADO TOTAL (l/prop-h)
A. Estaciones de policía y bomberos, bancos, telefonía, iglesias/capillas, jardines.	123	16	7,00	0,90
B. Tiendas, oficinas, depósitos, grandes propiedades domésticas, granjas.	2013	606	20,50	6,20
C. Hoteles, escuelas/colegios, cafeterías/restaurantes, casas públicas, áreas sociales, conjuntos residenciales.	505	244	26,00	12,60
D. Hospitales, Fábricas (comida y manufactura), baños públicos, áreas de trabajo en general.	205	79	53,00	20,50
E. Casas para ancianos, minas pequeñas. Un valor posible para casas de enfermería y hospitales: 2.5l/prop-h	33	25	80,00	60,60

**Fuente:** South African Night Flow Analysis Model (SANFLOW), Ronnie Mckenzie – diciembre 1998

Es necesario añadir el consumo nocturno de agua para los que son considerados grandes consumidores como, por ejemplo, los aeropuertos, grandes hoteles, piscinas, etc. Para ello se los debe considerar independientemente, midiendo la cantidad de agua usada en horas nocturnas.

### 2.3.3 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para un mayor entendimiento de la metodología para la estimación del uso nocturno, será muy simple explicarlo con el siguiente ejemplo.

**Tabla E1:** Ejemplo de Lecturas y mediciones establecidas

DESCRIPCIÓN	VALORES
Longitud de tuberías (m)	9300,00
Número de conexiones	600
Número de propiedades	672
Población actual estimada	3000
Caudal mínimo nocturno (CMN) m	50,00
Presión promedio nocturno (AZPn) m <sup>3</sup> /l	14,40

Luego de que el caudal nocturno haya sido determinado, es necesario estimar los valores de pérdidas, considerados como parámetros a usarse en este análisis.

**Tabla E2:** Valores estimados de pérdidas.

DESCRIPCIÓN	VALORES
% población activa	6%
Cantidad de agua usada en tanque de inodoro	10 lts
Número de propiedades no domésticas	30
Consumo promedio de propiedades no domésticas	50 lts/h
Uso de grandes consumidores no domésticos	1.2 m <sup>3</sup> /h

Una vez establecidos los parámetros, ahora es posible estimar el uso nocturno en la hora donde ocurre mínimo caudal nocturno:

**Tabla E3:** Caudal de uso nocturno total.

DESCRIPCIÓN	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	RESULTADO
Uso nocturno doméstico	$3000 * 6\% * 10 \text{ lts}$	1.8 m <sup>3</sup> /h
Uso nocturno no doméstico	$30 * 50 \text{ lts/h}$	1.5 m <sup>3</sup> /h
Uso nocturno de grandes consumidores	$1 * 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$	1.2 m <sup>3</sup> /h
<b>TOTAL DE USO NOCTURNO</b>		<b>4.5 m<sup>3</sup>/h</b>

Es necesario añadir que el valor estimado de uso nocturno deberá estar sujeto a un factor numérico de error por micromediciones, realizadas en los puntos de estudio, el cual será determinado por el mismo abastecimiento o entidad

encargada del suministro de agua potable. A todo esto, el factor a utilizarse, tomando como referencia la ciudad de Guayaquil, será del 10%, por tanto, el caudal de uso nocturno a utilizarse será:

$$\text{Caudal de uso nocturno} = 4.50 \times 1.10 = 4.95 \frac{m^3}{h}$$

Una vez obtenido el valor final de uso nocturno, y el valor de caudal de entrada o caudal mínimo nocturno, es posible obtener el caudal de pérdidas para la hora donde ocurre la máxima presión crítica en la red en estudio:

- ▲ Tomando el ejemplo empleado en el apartado del caudal mínimo nocturno, se conoce en la hora 3 el caudal mínimo nocturno ocurre con un valor de 107.50 lts/seg que se traduce a 387 m<sup>3</sup>/h

$$\text{Caudal de fugas} = \left(387 \frac{m^3}{h}\right) - \left(4.95 \frac{m^3}{h}\right) = 382.05 \frac{m^3}{h}$$

En la ciudad de Guayaquil, la manera de obtener el caudal de uso nocturno es similar al procedimiento propuesto por el WRC, en donde, la empresa encargada del suministro de agua, que en este caso es la entidad INTERAGUA, se encarga directamente de la medición del caudal de consumo promedio diario, del sector en estudio, según su tipología: residencial, comercial, oficial, público e industrial. Evalúa un porcentaje de uso de agua para las horas nocturnas (de 01:00 a 04:00), obteniendo así un factor de uso nocturno que es multiplicado por el consumo diario registrado.

La tabla expuesta a continuación, muestra a manera de ejemplo, el procedimiento de este tipo de análisis para mejorar la mejor comprensión.

**Tabla E4:** Uso nocturno corregido.

Consumidores	No. Conexiones	Volumen medido anual (m3/año)	Caudal promedio diario (lts/s)	Factor de uso nocturno	Uso nocturno no industrial (lts/seg)
Residenciales	3,520	1,410,440.00	45.35	0.39	17.68
Comerciales	412	731,320.00	23.51	0.10	2.35
Oficiales	61	471,730.00	15.17	0.20	3.03
Públicos	0	0.00	0.00	0.00	0.00
TOTAL USO NO INDUSTRIAL (lts/seg)					23.07
USO INDUSTRIAL MEDIDO (lts/seg)					3.10
TOTA DE USO NOCTURNO (lts/seg)					26.17
% DE ERROR POR MICROMEDICIONES					10%
<b>USO NOCTURNO CORREGIDO (lts/seg)</b>					<b>28.79</b>

Estos procedimientos dictados, son la pauta inicial para su aplicabilidad en la metodología de gestión de presiones a proponer. A partir de la estimación del caudal de uso nocturno, el cálculo del potencial caudal de fugas generado y su correspondiente valor de presión promedio (AZP), hace posible determinar el caudal de fugas a diferentes horas del día según el caudal ingresado a la red, bajo el principio de los caudales dependientes e independientes de la presión.

## 2.4 PUNTO DE PRESIÓN PROMEDIO (AZP – AVERAGE ZONE POINT)

Como concepto general, el punto de presión promedio es un valor de presión representado por un nodo en la red de abastecimiento en estudio, y da una conceptualización del comportamiento hidráulico del sistema, dando como resultado una presión promedio. También llamado AZP por sus siglas en inglés (average zone point), es usado en el método de análisis de caudales mínimos nocturnos.

En este apartado se resumirá la manera de obtener dicho punto mediante una serie de pautas dadas en el “Managing Leakage” desarrollado por el UKWIR en 1994, con un enfoque en la gestión de presiones para los sistemas de agua potable.

En cualquier forma de cálculo empleada, se buscará una presión promedio en la red, para luego indagar de manera certera el punto donde ocurre dicha presión. Si se toma dicho planteamiento, parece fácil su resolución, pero hay

que tomar en cuenta que una red presurizada no tendrá presiones uniformes durante el día y la noche. La presión promedio a encontrar, variará de acuerdo al comportamiento del sistema, incluyendo sus variables hidráulicas y las condiciones físicas de esta, lo cual convierte su resultado en una búsqueda con una respuesta que no es sencilla de obtener, y a la vez con pocas posibilidades de exactitud. Es por eso que en el presente apartado se explicará la manera precisa para obtener dicho valor con la mayor certeza y seguridad posible basándose en estudios realizados en años anteriores.

#### **2.4.1 PROCEDIMIENTO BASE PARA LA SELECCIÓN DEL AZP**

Se expone, en resumen, los procedimientos propuestos en el Managing leakage, lo que permite seleccionar rápidamente el punto AZP:

- ▲ Por planos topográficos o curvas de nivel del sector, se calcula el nivel o altura media del sistema, bajo escalas establecidas por el procedimiento.
- ▲ Estudio del sector de acuerdo al tipo de infraestructuras que este tenga, cuantificando y realizando una zonificación de acuerdo al gasto hídrico que tenga cada una de ellas, ya sean casas, edificios, supermercados, hidrantes, etc. Se determinará una densidad de acuerdo con el análisis realizado.
- ▲ Seleccionar un *nodo* que se encuentre dentro de la zona con mayor densidad de acometidas, nivel o altura promedio de la red. Este punto será representado como el AZP.

La manera de seleccionar el punto promedio de presión ha sido fuertemente influenciada por los procedimientos descritos, a partir de ahí nacen diferentes propuestas de diversos autores para su obtención:



- ▲ McKenzie en el 2001, propone obtener el nudo AZP calculando la altura media de la red.
- ▲ La IWA recomienda de una forma simple, obtener el punto AZP calculando el valor medio de las acometidas bajo el nivel del suelo.
- ▲ Thorton en su libro “Water Loss Control”, establece el cálculo del punto AZP bajo un modelo matemático para la red en estudio, promediando la presión obtenida en los nudos por el número de acometidas existentes. Otra manera de obtenerlo es, asignando el número de acometidas o la longitud de la red existente dentro de las curvas de nivel de la zona en estudio, se obtiene un valor de presión por zona, y con dicha información se obtiene la presión media. Estas dos metodologías son consideradas como procedimientos clave en la aplicación de la gestión de pérdidas de agua a nivel mundial.

Al existir cierto error en la determinación del AZP en una red de abastecimiento de agua potable entre sus nudos, es necesario recalcar que la presión media del sistema, a ciencia cierta no es conocida, y depende de muchas variables hidráulicas como físicas de la red, por ende, solo se puede obtener de una red una aproximación de la misma por medio de ponderaciones de varias variables. (Escobar, Julio 2011)

Este análisis da a entender, que la presión media del sistema es un valor que representa las características medias de la red, sin llegar a los conceptos de cálculo de una media aritmética. Por ello esta presión solo se basó en ciertos parámetros específicos y no en todos, pues es relativamente imposible obtener todas las variables físicas e hidráulicas porque son innumerables.

Para la implementación de la metodología propuesta en este trabajo de tesis, es necesario y de suma importancia obtener el valor del nudo AZP, que se según se conoce, depende de muchos factores y variables de un sistema. El procedimiento propuesto para la obtención de este valor aplicable al método planteado de gestión de presiones, se basará en una media ponderada horaria, en donde se calcularán los valores AZP para cada hora del día durante las 24 horas. Esto dará un comportamiento más acertado del sistema,

simplificando su dependencia bajo los parámetros considerados como necesarios para estimar su valor más aproximado.

#### **2.4.2 CÁLCULO DEL AZP: VALOR ESTIMADO Y UBICACIÓN**

Esta sección describirá, de manera efectiva y simplificada, el cálculo del punto promedio de presión para un área de distribución de agua potable.

1. Como procedimiento inicial, es necesario tener una curva de comportamiento de presiones en la entrada de agua del sector, o en su caso en la válvula principal de distribución. Mientras menor sean los intervalos de las mediciones de presión, existirá una mayor precisión en los resultados.
2. Al obtener dicha curva, y en conjunto con los valores obtenidos, se procede a determinar el valor de presión promedio mediante un simple cálculo aritmético.
3. Se determina el horario o período en el que ocurre el valor de presión promedio medido en la entrada de agua del sistema. Por lo general el análisis se lo realiza de manera horaria.
4. Una vez determinado el período de ocurrencia, es necesario ir al campo, es decir, ir al sector hidráulico en estudio y realizar mediciones en todos los nudos de la red en la franja horaria establecida.
5. Con el levantamiento de campo obtenido, buscar entre todos los valores, alturas piezométricas similares, y zonificarlas de tal manera que sea posible realizar una cuantificación de valores por zonas de ocurrencia, definiendo sus ubicaciones.
6. Al recopilar estos valores, el último paso será ejecutar una media ponderada en función del número de conexiones. Este último valor calculado será denominado como el valor de la presión del punto promedio de presión (AZP), y su ubicación dependerá de la similitud que este tenga con algún punto o nodo en el proceso de zonificaciones del sistema.

En el procedimiento descrito, donde su análisis se establece de manera horaria, es importante determinar el valor de presión promedio en la hora de ocurrencia del caudal mínimo nocturno. Este es un componente esencial en el análisis de caudales nocturnos, considerándose como punto de partida para la posterior estimación de caudales de fugas en una red de abastecimiento de agua potable.

## 2.5 MODELACIÓN DE FUGAS

Para el desarrollo de un método simplificado de gestión de presiones en una red de abastecimiento de agua potable, es necesario conocer los componentes esenciales que la conforman.

Como componente inicial se encuentra el *caudal inyectado o caudal de entrada*, denominado  $Q_e$ , caracterizado como el suministro de agua total destinado a abastecer a la red en estudio. Por otra parte, se tiene el *caudal de consumo autorizado*  $Q_c$ , conformado por la suma de los consumos generados en todas las edificaciones que cuentan con un medidor de flujo proporcionado por la empresa encargada del suministro de agua, estos consumos pueden ser medidos o estimados.

Al diferenciar el caudal inyectado con el de consumo, se obtendrá un valor denominado *caudal de fugas o pérdidas*  $Q_p$ .

$$Q_p = Q_e - Q_c$$

La metodología simplificada de gestión de presiones, reduce el caudal de fugas presentando diferencias entre tres posibles estados en el que se puede encontrar la red del sector en estudio: sin regulación de presiones, con regulación fija y con una regulación horaria, siendo esta última una regulación activa de presiones y la más acertada para una mayor reducción de pérdidas de agua.

Para un estudio de 24 horas, si se obtiene el caudal de fugas en la hora de demanda mínima de agua, en donde la presión en la red es máxima, es posible calcular el volumen de fugas a lo largo del día para un sector en estudio por medio de una extrapolación del volumen de fugas en la hora de demanda mínima de agua, dando como resultado un componente conocido como el factor hora-día (Hour to Day Factor o HDF), el cual tiene valores variables dependiendo si se está realizando o no una gestión de presiones en el sector.

### **2.5.1 ECUACIÓN FAVAD (FIXED A AND VARIABLE AREA DISCHARGE PATHS)**

La pérdida de agua en una hora determinada también puede ser estimada mediante la representación de la presión elevada a un exponente, este principio es válido gracias a la demostración de May en octubre de 1994 en un artículo publicado, denominado como la teoría FAVAD (Fixed and Variable Area Discharge Paths) o en español; trayectos de descarga por áreas fijas y variables. Se demostró que el área transversal en los distintos tipos de roturas o rajaduras, ya sean en tuberías o accesorios, varían con la presión ejercida en ellas llegando a tener diferentes tipos de fugas en donde el caudal puede variar con la presión. Este principio se lo puede expresar matemáticamente con la siguiente ecuación:

$$Q_f = k_f \cdot P^{N1}$$

En donde:

Q<sub>f</sub>: Caudal fugado por las irregularidades de la red

k<sub>f</sub>: Coeficiente de fuga

P: Presión

N1: exponente de presión, varía según tipo de sección y material de la tubería.

Con base en la metodología FAVAD, The International Water Association (IWA) y la entidad UKWIR (United Kingdom Water Industry Research) desarrollaron una ecuación exponencial que relaciona el caudal de fuga y la presión de servicio en una red de tuberías:

$$\frac{Q_I}{Q_o} = \left(\frac{P_I}{P_o}\right)^{N1}$$

Q<sub>I</sub>: Caudal de fuga después de la reducción de presión empleada.

Q<sub>o</sub>: Caudal de fuga antes de la reducción de presión empleada.

P<sub>I</sub>: Presión después de su reducción

P<sub>o</sub>: Presión antes de su reducción

N1: exponente de presión

Se han desarrollado análisis con este principio en diferentes sistemas de distribución de agua potable como Japón, Brasil, Australia, Malasia, Brasil, Canadá, Nueva Zelanda, reino Unido y en los Estados Unidos, llegando a valores de N1 entre 0.5 y 1.5, aunque en ciertos casos puede alcanzar un valor de hasta 2.5. (Garzón y Thornton, 2006).

Realizaron otros estudios relacionados y se encontró que las fugas generadas por roturas longitudinales, tienen un mayor efecto en el incremento del caudal de fugas en una red de distribución. (Cassas et. al., 2005)

### **2.5.2 EXPONENTE DE FUGA (N1)**

El valor de N1 señalado en la ecuación anterior, representa el exponente para todas las pérdidas de agua influenciadas por la presión en un sistema. Este es un valor global, que abarca todo tipo de fugas existentes.

Los valores a utilizar para el exponente N1 varían normalmente entre 0.5 y 2.5 con un promedio de valor predeterminado de 1.0. Los sistemas con alto porcentaje de fugas de fondo (juntas y accesorios) desarrollarán valores superiores a 1.0 hasta un valor 1.5, en los sistemas donde las fugas son consideradas como áreas fijas, especialmente en tuberías metálicas, tendrán valores menores a 1.0. Finalmente, para las áreas que pueden variar a lo largo de dos ejes (tuberías plásticas), tendrán valores mayores a 1.5 hasta 2.5.

El valor de N1 para un sistema debería ser calculado directamente por mediciones resultantes de un análisis, en donde se realizan lecturas de presión durante el periodo de caudal mínimo nocturno. Este procedimiento puede tomar de dos a tres horas, dependiendo si el caudal mencionado permanece relativamente constante en ese lapso. Hay que tener en cuenta que el caudal mínimo nocturno normalmente comprende tres componentes fundamentales: el uso nocturno del cliente, las fugas de fondo y las fugas de ráfaga existentes en la red. (SANFLOW –WRC 1999)

### **2.5.2.1 Prueba de paso de presión (Pressure Step Test)**

Para realizar el cálculo de N1 en una red de abastecimiento, es necesario medir la presión en el punto de entrada de agua, simultáneamente medir la presión en el punto de zona promedio y en el punto crítico. En total se tendrán tres valores los cuales van a variar dependiendo de la reducción de la presión en el punto de entrada. Se podrán realizar dos o tres variaciones dependiendo el lapso estimado en las mediciones para el caudal mínimo nocturno de la red. Luego de que el consumo o la demanda de agua se incremente, no será posible continuar con la prueba, porque no será posible predecir con exactitud la influencia de la presión sobre la demanda del consumidor. El valor de N1 es estimado directamente a partir del cambio de flujo de la red a un caudal mínimo nocturno llegando a tres comparaciones posibles de pérdidas de carga:

- ▲ Entre el punto de presión promedio y el punto de entrada
- ▲ Entre el punto de entrada a la red y el punto de presión crítica
- ▲ Entre el punto de presión promedio y el punto de presión crítica

Una prueba t pica se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 7:** Modelo de análisis PST (pressure step test)

Descrip.	Inicio	Fin	Presión (m)			Caudal de entrada (m3/h)	Uso nocturno	Pérdidas de distribución	Valor estimado de N1		
			Entrada	Zona de presión media	Punto crítico				Inicial	Nivel1	Nivel 2
Condiciones iniciales	01:30		64.00	52.00	36.00	72.00	8.00	64.00			
Nivel 1	02:00	02:30	51.00	42.60	31.00	61.20	8.00	53.20	0.93		
Nivel 2	03:00	03:30	45.00	38.00	29.00	56.20	8.00	48.20	0.90	0.86	
Nivel 3	04:00	04:30	40.00	34.00	26.00	51.50	8.00	43.50	0.91	0.89	0.92

**Fuente:** PRESMAC user guide, McKenzie 2011

Este ejemplo involucra una evaluación conformada por tres mediciones de presión incluyendo un punto base de partida, logrando seis estimaciones numéricas para N1. Estos valores son calculados por la siguiente expresión que nace de la ecuación mencionada en la metodología FAVAD.

$$N1 = \frac{\log\left(\frac{Q_0}{Q_1}\right)}{\log\left(\frac{P_0}{P_1}\right)}$$

**Tabla 8:** Tabla de resultados

Nivel	Ecuación base FAVAD	Ecuación N1	N1
Nivel 1	$(64.0/53.2)=(52.0/42.6)^{N1}$	$N1=\log(1.2030)/\log(1.2207)$	0.93
Nivel 2	$(64.0/48.2)=(52.0/38.0)^{N1}$	$N1=\log(1.3278)/\log(1.3684)$	0.90
Nivel 3	$(64.0/43.5)=(52.0/34.0)^{N1}$	$N1=\log(1.4713)/\log(1.5294)$	0.91
Entre niveles 1 y 2	$(53.2/48.2)=(42.6/38.0)^{N1}$	$N1=\log(1.1037)/\log(1.1211)$	0.86
Entre niveles 1 y 3	$(53.2/43.5)=(42.6/34.0)^{N1}$	$N1=\log(1.2230)/\log(1.2529)$	0.89
Entre niveles 2 y 3	$(48.20/43.5)=(38.0/34.0)^{N1}$	$N1=\log(1.1080)/\log(1.1176)$	0.92

**Fuente:** PRESMAC user guide, McKenzie 2011

Según la aplicación de la ecuación mostrada, el valor de N1 se lo obtiene en la relación de los valores de pérdidas de distribución y la presión media.

Por los resultados de los análisis está claro que un valor apropiado para N1 está entre 0.86 y 0.93. En este caso, al tener varios valores de análisis, se obtiene una media dando como resultado un valor de 0.90.

Para simplificar un poco más los valores a los que puede llegar el exponente N1, se han hecho incontables pruebas de validación acortando un poco el

rango. La tabla mostrada a continuación presenta valores calculados en los países con mayor desarrollo en este campo de la hidráulica.

**Tabla 9:** Valores de N1 para la relación presión - caudal

País	Número de Zonas evaluadas	Rango exp N1	N1 Promedio
Reino Unido (1970)	17	0.70 a 1.68	1.13
Japón (1979)	20	0.63 a 2.12	1.15
Brasil (1998)	13	0.52 a 2.95	1.15
Reino Unido (2003)	75	0.64 a 2.83	1.01
Chipre (2005)	15	0.73 a 2.42	1.47
Brasil (2006)	17	0.36 a 2.95	1.40

**Fuente:** Metodología para reducción de pérdidas técnicas en el sistema de distribución de AA.PP. del suburbio oeste de la ciudad de Guayaquil, Stephenson Molina, 2009

### 2.5.3 FACTOR HORA-DÍA

El máximo beneficio que se obtiene de la reducción de presión es en la noche, cuando la demanda de agua está en su punto más bajo y las presiones del sistema generalmente son altas. Una pregunta muy frecuente es: ¿cuánta agua se ahorrará por la noche y cuánta durante el día? Los ahorros dependerán en gran medida analizando la relación de demanda de agua entre el componente dependiente de la presión (fugas) y el componente independiente de la presión (consumo).

Para proporcionar un valor significativo de la cantidad de agua que se logre ahorrar en el día, se puede usar un "factor hora-día" (o también hour-day factor por sus siglas en inglés HDF). El HDF es básicamente un multiplicador el cual influirá en el valor de pérdidas de agua en la hora de mínimo caudal nocturno, para dar como resultado las pérdidas para un periodo completo de 24 horas.

Por ejemplo, si las pérdidas se distribuyen de manera uniforme durante todo el día, entonces el HDF tendrá un valor de 24. Sin embargo, en la práctica, generalmente los ahorros no son distribuidos uniformemente, por tanto, el valor del HDF no será el mencionado. Valores de entre 10 y 40 son posibles,



aunque normalmente van desde un mínimo de aproximadamente 16 a un máximo de 30 unidades. Un valor menor a 16 indica que hay una diferencia significativa entre las pérdidas durante la hora del caudal mínimo nocturno y las demás horas del día.

Para una mayor comprensión del cálculo de dicho factor es necesario analizar el siguiente ejemplo: En cierta área, las fugas de agua durante todo el periodo de 24 horas se estimaron en 1438 m<sup>3</sup>. Si el consumo de agua durante la hora de caudal mínimo nocturno, se estimó en 64 m<sup>3</sup>, el factor hora-día será:

$$HDF = \frac{1438}{64} = 22.47$$

Si se incluye una regulación en el suministro de agua reduciendo el caudal mínimo nocturno en 30 m<sup>3</sup> a través de algún tipo de control de presión avanzado, el HDF aumentará a 47.90 constatando que existe una relación inversamente proporcional entre ambos valores. El factor hora-día es un indicador muy útil para saber si el flujo dependiente de la presión estimado es real o no a ciertas horas del día.

#### **2.5.4 CAUDALES DEPENDIENTES E INDEPENDIENTES DE LA PRESIÓN**

Para evaluar los impactos que genera la gestión de presiones en una zona, primero es necesario dividir el flujo total suministrado en dos componentes principales: las pérdidas de agua (fugas en la red) y el suministro general.

Estas fugas, ya sean de cualquier tipo dependen de la presión, mientras que el suministro de agua a la red representada por el consumo general, se puede asumir que no depende de ello, obteniendo así un mejor análisis del modelo hidráulico a establecer más adelante. Esta división se basa en ciertos supuestos básicos adoptando un enfoque conservador.

En resumen, existe el supuesto de que las pérdidas de agua por fugas dependen de la presión, mientras que el consumo es independiente de ella, esto implica que los tres componentes de las fugas (conexiones entre

tuberías, de conexiones en propiedades y red en general) también dependen de la presión, mientras que los tres componentes del consumo de agua (consumo poblacional, grandes consumidores y pequeños consumidores) son independientes de la presión.

Las suposiciones anteriores no son estrictamente correctas, puede haber ciertas situaciones en donde existan pérdidas de agua en cierto tipo de conexiones consideradas independientes de la presión como, por ejemplo, una cisterna de inodoro con fuga en donde dicha situación depende del nivel del agua en su contenedor y no a la presión de la red. Por otro lado, existen ciertos caudales considerados como independientes de la presión que, de hecho, pueden ser dependientes de la presión. Ejemplos claros de este tema es el agua consumida para lavarse las manos o cepillarse los dientes, estos caudales dependen de la presión en cierta medida al abrir el grifo y dejarlo constantemente funcionando durante dichas actividades, existiendo un desperdicio de agua. Entonces, una actividad catalogada como consumo neto de agua se puede considerar en cierta medida como fuga. El riego de jardines es otra actividad en donde el consumo de agua puede verse influenciado por la presión. Muchos sistemas de irrigación por lo general dejan sus rociadores bajo un cierto tiempo de duración, independientemente de la cantidad de agua aplicada en el lugar, obteniendo un consumo de agua excesivo para la actividad.

Al analizar estos ejemplos, se puede concluir que el consumo interno en una red de abastecimiento de agua potable, puede disminuir hasta cierto punto a medida que se reduce la presión en el sistema. En vista de esta consideración, y para tener resultados conservadores en futuros análisis, el flujo denominado como *independiente de la presión* se lo considera de la siguiente manera:

Consumo:

- ▲ Uso normal doméstico
- ▲ Pequeños consumidores no domésticos
- ▲ Grandes consumidores

*El componente influenciado por la presión no es tomado en cuenta en este grupo para proporcionar un estimado conservador de los ahorros potenciales.*

Fugas de fondo:

- ▲ Una parte de las pérdidas por conexiones.  
(Valor base 0.5 litros/conexión.hora =  $\pm 15\%$  de cada 3 litros/conexión.hora)
- ▲ Una parte de las pérdidas en propiedades.
- ▲ (valor base 0.5 litros/propiedad.hora =  $\pm 50\%$  de cada 1 litro/propiedad.hora)

Ejecutando un análisis para cada hora durante las 24 horas del día, y dividiendo el flujo total suministrado en caudales dependientes e independientes de la presión, se adopta el siguiente enfoque:

- ▲ Estimar el componente independiente de la presión durante la hora del caudal mínimo nocturno.
- ▲ Estimar el componente dependiente de la presión a la misma hora del caudal mínimo nocturno.
- ▲ Habiendo establecido las pérdidas dependientes de la presión durante la hora del caudal mínimo nocturno, y conociendo la zona promedio de presión, los demás valores dependientes de la presión para cada uno de las otras 23 horas, pueden estimarse usando la ecuación FAVAD dictada anteriormente.
- ▲ Una vez establecido las pérdidas dependientes de la presión, el valor de presión independiente para cada hora del día se puede estimar, simplemente restando las pérdidas dependientes de la presión con el flujo total de entrada.

El proceso de dividir el caudal total de entrada en dos componentes puede parecer inicialmente confuso. Es importante tener en cuenta que solo en el punto de caudal mínimo nocturno, el consumo se puede estimar a partir del siguiente concepto:

En el punto del caudal mínimo nocturno, el consumo se lo podrá estimar a partir de la población, mediante el uso de agua promedio por persona y por hora (generalmente 6% de cada 10 litros/hora). Se tendrá en cuenta el agua utilizada por los pequeños consumidores, y así como el de los grandes consumidores, para estimar el consumo real.

Una vez establecido el consumo, la diferencia entre este y el caudal mínimo nocturno, proporciona como resultado un indicador de la cantidad de agua perdida por fugas. Es importante tener en cuenta que los diferentes tipos de fugas se encuentran generalizadas o agrupadas, por tanto, el parámetro N1 se lo considera como un valor general, comparado con otros métodos que calculan dicho valor de acuerdo al tipo de fuga.

Para explicar el proceso de cálculo, se proporcionará un ejemplo simple utilizando un flujo inicial independiente de la presión de 8 m<sup>3</sup>/h (como se estima a continuación). Los cálculos se llevan a cabo de la siguiente manera:

**Tabla 10:** Estimación del caudal independiente de la presión en la hora del mínimo caudal nocturno

Descripción	Datos básicos	Caudal
Pérdidas por conexiones	641 conexiones * 0.5 lts/con.h	= 0.32 m <sup>3</sup> /h
Pérdidas por propiedades	2210 propiedades * 0.5 lts/prop.h	= 1.11 m <sup>3</sup> /h
Uso nocturno residencial	9945 habitantes * 6% * 10 lts/h	= 5.97 m <sup>3</sup> /h
No-residenciales (sin medidor)	7 cafeterías - 50 lts/h	= 0.35 m <sup>3</sup> /h
No-residenciales (con medidor)		= 0.26 m <sup>3</sup> /h
<b>TOTA - CAUDAL INDEPENDIENTE DE LA PRESIÓN EN EL CAUDAL MÍNIMO NOCTURNO</b>		<b>8.00 m<sup>3</sup>/h</b>

**Fuente:** PRESMAC user guide, McKenzie 2011

Se determina un caudal de entrada de 72 m<sup>3</sup>/h por tanto, el caudal dependiente de la presión se lo calcula de la siguiente manera.

Descripción	Datos básicos	Caudal de fugas
Diferencia entre el caudal de entrada a la red y caudal independiente de la presión	72.00 m <sup>3</sup> /h - 8 m <sup>3</sup> /h	64 m <sup>3</sup> /h

Habiendo establecido el caudal de la presión, tanto dependiente como independiente durante la hora del caudal mínimo nocturno, es posible estimar las pérdidas dependientes de la presión para las horas restantes. Un ejemplo del cálculo para la primera hora (0:00 a 1:00) se explica en la siguiente tabla:

Descripción	Cálculo base	Caudal
Ecuación FAVAD $Q_1 = Q_0 * (P_1/P_0)^{N_1}$	$Q_1 = 64\text{m}^3/\text{h} * (61\text{m}/64\text{m})^{1.0}$	61.53 m <sup>3</sup> /h

El cálculo del caudal dependiente de la presión se repite para cada hora restante hasta que las pérdidas dependientes de la presión se hayan calculado para todo el período de 24 horas.

Habiendo establecido los flujos dependientes de la presión para cada hora en el periodo de 24 horas, nos damos cuenta que es un procedimiento muy simple estimar los caudales independientes de la presión restante para cada hora del día, simplemente hay que restar los caudales dependientes de la presión, del caudal de entrada al sistema de distribución de agua.

**Tabla E5:** Ejemplo de estimaciones

Hora	Presión de entrada (m)	Caudal de entrada (m <sup>3</sup> /h)	Caudal dependiente de la presión	Orden de cálculos	Caudal independiente de la presión	Orden de cálculos
0 - 1	61	82.80	61.29	3	21.51	26
1 - 2	63	75.60	63.10	4	12.50	27
2 - 3	64	72.00	64.00	5	8.00	28
<b>3 - 4 *</b>	<b>64</b>	<b>72.00</b>	<b>64.00</b>	<b>2</b>	<b>8.00</b>	<b>1</b>
4 - 5	64	72.00	64.00	6	8.00	29
5 - 6	64	75.60	64.00	7	11.60	30
6 - 7	61	93.60	61.29	8	32.31	31
7 - 8	60	108.00	60.39	9	47.61	32
8 - 9	57	111.60	57.66	10	53.94	33
9 - 10	57	115.20	57.66	11	57.54	34
10 - 11	57	118.80	57.66	12	61.14	35
11 - 12	57	115.20	57.66	13	57.54	36
12 - 13	57	111.60	57.66	14	53.94	37
13 - 14	56	115.20	56.75	15	58.45	38
14 - 15	56	111.60	56.75	16	54.85	39
15 - 16	57	111.60	57.66	17	53.94	40
16 - 17	57	104.40	57.66	18	46.74	41
17 - 18	57	104.40	57.66	19	46.74	42
18 - 19	57	108.00	57.66	20	50.34	43
19 - 20	58	108.00	58.57	21	49.43	44
20 - 21	58	104.40	58.57	22	45.83	45
21 - 22	59	100.80	59.48	23	41.32	46
22 - 23	60	100.80	60.39	24	40.41	47
23 - 24	60	97.20	60.39	25	36.81	48

\* hora del caudal mínimo nocturno

valor de N1: 0.90

**Fuente:** Autor – referencia a PRESMAC user guide, McKenzie 2011

El resultado de este ejemplo conduce a uno de los procedimientos fundamentales a aplicarse en la metodología descrita a continuación. La estimación de caudales promedio de consumo, en este caso denominados como caudales independientes de la presión, determina el comportamiento de la red durante un lapso de 24 horas, encontrando su valor de máximo consumo estableciendo límites importantes para la gestión de presiones.

### 3. CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.

Con el conocimiento obtenido en los dos anteriores capítulos respecto a la gestión o modulación integral de presiones y caudales en una red de abastecimiento de agua potable, se propone un detallado procedimiento para

este fin, aplicando los conceptos generales y ecuaciones antes mencionados, obteniendo resultados comparables para los tipos de modulaciones.

Procedimiento general para un análisis de 24 horas:

1. Selección de la red de abastecimiento de agua en donde se ejecutará una posible gestión de presiones, transformándose en un distrito de medición (DMA) mediante válvulas de aislamiento, convirtiéndose en una red cerrada.
2. Implementación de medidores de caudal para la determinación del flujo en el punto de inyección de agua (entrada).
3. Recopilación de información referente al caudal de consumo por medio de medidores de agua domiciliarios, y estimación del consumo de uso nocturno.
4. Ubicación de puntos para medición de presiones, tanto en nodos como en el punto de entrada a la red, obteniendo una presión de entrada, presión promedio y presión crítica para cada hora contabilizada.
5. Análisis y depuración de datos medidos en campo.
6. Análisis de gestión de presiones con aplicación de la metodología propuesta. Definir el efecto de la gestión de presiones por salida fija y por regulación activa de presiones.
7. Dimensionamiento de la válvula reductora de presión a utilizarse en el punto principal de entrada de la red.

### **3.1. DATOS GENERALES DE CÁLCULO**

Una vez realizadas las mediciones respectivas, se ejecutará una depuración de resultados obteniendo los siguientes datos:

- ▲ Caudal de entrada ( $Q_e$ ): Determinada en metros cúbicos por hora ( $m^3/h$ ) para cada hora del día. Esto se refiere a que si se realizan mediciones en dos o tres días, los caudales finales serán resultado de un promedio, obteniéndose un valor representativo desde la hora 0 hasta la hora 23.

- ▲ Caudal de uso nocturno ( $Q_n$ ): Valor único estimado en  $m^3/h$  obtenido en base a la metodología de caudales mínimos nocturnos. En caso de no poder calcular mediante este método, se deberá realizar una estimación.
- ▲ Presión de entrada ( $P_e$ ): Estos valores tienen relación directa con el caudal que entra en la red, medidos en metros de columna de agua (m.c.a), y también promediándose los valores obtenidos en caso de que las mediciones se realicen en varios días.
- ▲ Presión promedio ( $\bar{P}$ ): Valor promedio en metros de columna de agua representada por las presiones medidas en todos los nodos de la red. Este valor se lo deberá obtener para cada hora del día.
- ▲ Presión crítica ( $P_c$ ): Presión en el nodo donde se registra la menor presión manométrica en toda la red.
- ▲ Exponente de fugas (N1): Obtenido mediante un “*pressure step test*” o por valores predeterminados según tablas.

Con estos datos base se ejecutará el proceso de estimación, obteniendo los caudales de fugas y de consumo para cada hora del día, aplicando los conceptos de caudales dependientes e independientes de la presión. Posteriormente se determinará un factor de fricción denominado “K”, el cual representa un coeficiente de resistencia al movimiento del agua a lo largo de las tuberías, y que será calculado tanto para la presión promedio ( $\Delta K_{prom.}$ ) como para la presión crítica del sistema ( $\Delta K_{crit.}$ ). Este procedimiento será explicado con más detalle en el posterior subcapítulo.



### 3.1. FACTOR DE FRICCIÓN DE RED “K”

Una vez definidos los diferentes parámetros, y el respectivo cálculo para determinar los caudales de consumo y los caudales de fugas, es decir, los caudales independientes y dependientes de la presión respectivamente, el siguiente paso es entender como estimar los factores K. Este factor representa efectivamente la pérdida de carga de presión, para el sistema de distribución de agua en una hora del día determinada. Existen dos tipos de factores K para este análisis:

- ▲ *K Δp promedio*: Representa las pérdidas de carga por fricción desde el punto de entrada al punto de presión promedio.
- ▲ *K Δp crítico*: Representa las pérdidas de carga por fricción desde el punto de entrada al punto crítico.

Al realizar el análisis respectivo, por cada hora existirá un factor general para el sistema, y aunque los factores variarán de hora a hora, estos permanecerán aproximadamente iguales para cada día. Es decir, el mismo factor "K" que será utilizado para la hora 4 a 5 del día 1, será la misma para la hora de 4 a 5 en el día 2, día 3, día 4, etc.

El origen del factor K se basa en la ecuación de pérdida de carga desarrollado por Darcy-Weishbach:

$$hf = \frac{8 \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5}$$

En donde:

*hf*: pérdida de carga debido a la fricción de la tubería. (m)

*f*: factor de fricción de Darcy. (adimensional)

*L*: longitud de la tubería. (m)

*Q*: Caudal. ( $m^3/s$ )

*g*: aceleración de la gravedad. ( $m/s^2$ )

*D*: diámetro interno de la tubería. (m)

Al simplificar esta ecuación de pérdida de carga en función de dos factores, según *Darcy* se dice que:

$$K = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5}$$

Siendo K en unidades de ( $s^2/m^5$ ) Por tanto, la ecuación finalmente queda:

$$hf = K \cdot Q^2$$

En donde  $hf$  se lo puede expresar como  $\Delta P$  siendo este el resultado de la diferencia de presiones en metros, entre dos extremos de tubería bajo una longitud determinada. Finalmente la ecuación queda de esta manera:

$$\Delta P = K \cdot Q^2$$

Al hacer una conceptualización más aproximada, el factor K en un sistema de distribución de agua, se lo puede comparar con el patrón de flujo de tráfico vehicular en una carretera. Los patrones de flujo de tráfico tienden a ser similares día a día, aunque puede variar considerablemente de hora a hora, a lo largo del día incluyendo el lapso de la hora pico. Bajo dicha consideración, existe la suposición de que el patrón de flujo de agua varía de la misma manera que el ejemplo descrito, por lo tanto, se concluye que al evaluar un factor K independiente para cada hora del día, se podrá obtener un detalle más preciso de su comportamiento. Este simple enfoque proporcionará resultados realistas en la mayoría de los casos, particularmente en el punto crítico de la red y en el punto de presión promedio. En estos puntos mencionados (los más importantes), el valor K llega a tener valores con tolerancias aceptables.

El factor K puede ser calculado de la siguiente manera:

$$K_{PROM} = \frac{\Delta P_{PROM}}{Q^2} \quad \text{Para el punto de presión promedio}$$

o también,

$$K_{CRIT} = \frac{\Delta P_{CRIT}}{Q^2} \quad \text{Para el punto crítico}$$

En donde:

$K$ : factor de fricción de la red

$\Delta P_{PROM}$ : diferencia de presiones entre el punto de entrada y el punto de presión promedio

$\Delta P_{CRIT}$ : diferencia de presiones entre el punto de entrada y el punto crítico

$Q$ : caudal de entrada a la red

Aquí un ejemplo de cálculo de los factores  $K$ , detallado para la primera hora del día y horas posteriores:

**Tabla E6:** Factores  $K$  en el punto de presión promedio y punto crítico.

Descripción	Cálculo	Factor K
Factor K en el punto de presión promedio	$K=11/(82.8^2)$	0.00160447
$\Delta P= 11 \text{ m}$		
$Q = 82.8 \text{ m}^3/\text{h}$		
Factor K en el punto crítico	$K=31/(82.8^2)$	0.00452169
$\Delta P= 31 \text{ m}$		
$Q = 82.8 \text{ m}^3/\text{h}$		

**Fuente:** Autor – referencia a PRESMAC user guide, McKenzie 2011

**Tabla E7:** Estimación de valores  $K$  en AZP y punto crítico.

Hora	Presiones (m)			$\Delta P$ entrada (m)		Flujo (m <sup>3</sup> /h)	Factor K para:	
	Entrada	AZP	Crítica	AZP	Crítica		AZP	Crítica
0 - 1	61	50	30	11	31	82.80	0.00160	0.00452
1 - 2	63	51	34	12	29	75.60	0.00210	0.00507
2 - 3	64	52	36	12	28	72.00	0.00231	0.00540
3 - 4	64	52	36	12	28	72.00	0.00231	0.00540
4 - 5	64	52	36	12	28	72.00	0.00231	0.00540
5 - 6	64	52	36	12	28	75.60	0.00210	0.00490
6 - 7	61	51	25	10	36	93.60	0.00114	0.00411
7 - 8	60	50	18	10	42	108.00	0.00086	0.00360
8 - 9	57	47	17	10	40	111.60	0.00080	0.00321
9 - 10	57	47	17	10	40	115.20	0.00075	0.00301
10 - 11	57	47	17	10	40	118.80	0.00071	0.00283
11 - 12	57	47	17	10	40	115.20	0.00075	0.00301
12 - 13	57	47	17	10	40	111.60	0.00080	0.00321
13 - 14	56	46	16	10	40	115.20	0.00075	0.00301
14 - 15	56	46	16	10	40	111.60	0.00080	0.00321
15 - 16	57	47	17	10	40	111.60	0.00080	0.00321
16 - 17	57	46	19	11	38	104.40	0.00101	0.00349
17 - 18	57	47	19	10	38	104.40	0.00092	0.00349
18 - 19	57	47	20	10	37	108.00	0.00086	0.00317
19 - 20	58	48	20	10	38	108.00	0.00086	0.00326
20 - 21	58	48	22	10	36	104.40	0.00092	0.00330
21 - 22	59	49	25	10	34	100.80	0.00098	0.00335
22 - 23	60	50	26	10	34	100.80	0.00098	0.00335
23 - 24	60	50	28	10	32	97.20	0.00106	0.00339

**Fuente:** Autor – referencia a PRESMAC user guide, McKenzie 2011

Como se puede observar en la tabla general de cálculo de factores K para cada hora del día, los valores obtenidos para la trayectoria hacia el punto crítico tienen variaciones pequeñas y consistentes. Sin embargo, para la trayectoria hacia el punto de presión promedio o AZP (Average Zone Point), los valores obtenidos tienden a variar considerablemente y dan un comportamiento de la red poco realista en algunos casos, esto también es algo muy normal en este tipo de estimaciones, debido a que la posición del AZP a menudo no se conoce con exactitud y termina siendo un valor aproximado.

Habiendo establecido los caudales de consumo y de fugas, así como los factores K para un periodo de 24 horas, ahora es posible probar el impacto

que se produce en una red de abastecimiento de agua potable, al variar las presiones del sistema bajo dos modulaciones distintas.

La primera opción de modulación a considerar es con la instalación de una válvula de presión estándar bajo un nivel de presión fijo, y la segunda opción bajo un nivel de presión horaria.

### **3.2. PROCESO DE MODULACION DE PRESIONES**

Obtenidos los factores de resistencia de la red de abastecimiento, es posible estimar su comportamiento de presiones respecto a la variación de la presión de entrada, principal proceso concerniente a la gestión de presiones para la recuperación de pérdidas reales.

Con los valores " $\Delta P$ " y "K" calculados, se realizarán dos tipos de modulación de la presión de entrada: la primera con una regulación de presiones fija y la segunda con una regulación activa de presiones. Es necesario recalcar que se parte de la hipótesis de que los valores K no se alterarán bajo los diferentes tipos de modulaciones, los factores de resistencia de la red serán los mismos, solo dependen de la longitud de la tubería y de su diámetro, los cuales no van a variar en la aplicación de esta metodología y serán pieza clave para la obtener los valores de ahorro de agua.

- ▲ Para la regulación fija se impondrá un *valor de presión inamovible* en el punto de entrada a la red, estimándose nuevas presiones promedio y presiones críticas, además de un nuevo caudal de entrada para cada hora del día. Al estimar las nuevas presiones en el proceso de modulación, hay que tener en cuenta que para todo el periodo de 24 horas, la presión en el punto crítico, siempre debe ser superior al valor mínimo fijado por el abastecimiento o a un ente regulador del servicio de agua potable.

- ▲ Para la regulación activa de presiones, y siguiendo un proceso similar de estimaciones, se determinan *presiones para cada hora del día*, consiguiendo que la presión crítica obtenida se acerque lo más posible a la presión mínima de servicio. Con este tipo de modulación las pérdidas en el sistema de agua potable se reducirán considerablemente, en comparación con el procedimiento de regulación fija gracias a un mejor control de las presiones en la red.

### **3.2.1. ANÁLISIS POR REGULACIÓN FIJA**

La opción de una VRP con presión de salida fija es la opción más básica y simple, frente a las diversas opciones que presenta este elemento para manejo o modulación de presiones. Instalada en la entrada principal de agua y que abastece la zona en estudio, esta mantendrá un nivel de presión constante en la salida de la estación reguladora de presión durante todas las 24 horas del día.

El objetivo de instalar una PRV en el punto de entrada al sector (o zona de red de distribución) es el disminuir la presión en la red y disminuir las pérdidas físicas, garantizando que, en punto de presión crítica, la presión siempre sea superior o igual a la mínima de servicio.

A continuación, se describirá paso a paso la aplicabilidad de esta primera forma de análisis:

1. Realizar una estimación inicial de la presión de salida fija que producirá la mínima presión aceptable en el punto crítico durante la hora de presión mínima (es decir, en el período de mínima demanda). Por ejemplo, si la presión mínima en el punto crítico es de 25 metros y el nivel mínimo de servicio es de 20 m, la presión de entrada puede reducirse al menos 5 metros. Esta estimación de 5 m se resta de la presión real en el punto de entrada durante la hora crítica y luego se

aplica durante todo el período de 24 horas, lo cual representa una presión de salida estática en la válvula reguladora de presión.

2. Después de establecer una presión constante durante todo el período de 24 horas, es necesario volver a estimación las nuevas presiones en el punto de presión promedio (AZP) y el punto crítico. Este es un procedimiento iterativo, descrito en detalle más adelante.
3. La nueva presión en el punto crítico se comparará con la presión mínima establecida por la red, y si es posible, la presión de entrada se podrá reducir aún más hasta que la presión en el AZP llegue hasta los límites establecidos. Este procedimiento puede ser repetido hasta que la presión en el punto crítico esté en línea con el mínimo.

*Por ejemplo.*

*Según lecturas realizadas en una red de abastecimiento, la mínima presión crítica registrada es de 16 m entre las horas 13 y 15, en donde la presión de entrada medida es de 56 m. En este caso, el mínimo nivel de servicio del sistema es solo de 10 m, por tanto, la presión de entrada puede ser reducida al menos 6 m.*

Desarrollo:

*1. Estimación de la nueva presión de entrada:*

La estimación inicial de la presión de salida fija se establecerá en 50 metros (59 m - 6 m). En la práctica, probablemente se comience con una reducción de 10 m o 12 m. Sin embargo, para demostración de los procedimientos, se utilizará una reducción inicial de 6 m con el conocimiento de que el ejercicio tendrá que repetirse varias veces hasta que se obtenga una presión de 10 m en el punto crítico. Ahora dicha presión de entrada de 50 m será usada para cada hora.

## 2. Cálculo de las presiones resultantes (AZP y punto crítico):

Usando la nueva presión de salida fija, las presiones resultantes, tanto para el AZP como para el punto crítico, se calcularán inicialmente para la primera hora. Luego, si el resultado es satisfactorio, para las 23 horas restantes. En esta etapa iterativa de análisis, solo es necesario examinar la hora de máxima demanda cuando la presión en el punto crítico es mínima.

Los procesos de cálculo en las iteraciones tendrán como componente esencial el factor K calculado en un principio.

Durante la primera hora, el caudal de entrada se estimó en 82.80 m<sup>3</sup> para una presión de entrada de 61 m. La presión promedio calculada (AZP) es de 50 m (es decir, una caída  $\Delta_p$  de 11 m), por lo que se utiliza la primera caída de 11 m en un nuevo AZP consiguiéndose 39 m (es decir, 50 m - 11 m), en donde el cálculo consta de la presión de entrada establecida, menos el diferencial de presión. El mismo procedimiento se realiza entre la presión de entrada y la del punto crítico obteniéndose el diferencial de presión  $\Delta_c$ , y un nuevo valor de presión crítica.

**Tabla E8:** Valores de red medidos en la primera hora

Hora	Q (m <sup>3</sup> /h)	Pe (m)	AZP m	Pc (m)
0-1	82.8	61	50	30

**Fuente:** Autor

**Tabla E9:** Nueva presión de entrada, diferenciales de presión y nuevos valores de presión



Hora	Pe (m)	$\Delta_p$	$\Delta_c$	nuevo AZP	nuevo Pc
0-1	50	61-50=11	61-30=31	50-11=39	50-31=19

**Fuente:** Autor

Posteriormente se tendrá que calcular la cantidad de agua fugada para la primera hora, y para ello es necesario determinar la potencial cantidad de agua fugada para la hora de mínimo consumo (situación desfavorable de la red) bajo el cambio de presión de entrada de 30 m.

*Según los datos contabilizados, las lecturas a utilizarse en la hora de mínimo consumo (horas 3-4) son las siguientes:*

AZP contabilizado: 52 m

$Q_{fuga}$  contabilizado: 64 m<sup>3</sup>/h

AZP bajo la variación de presión en la entrada: 38 m

Con estos datos esenciales será posible encontrar el nuevo caudal fugado para la hora del mínimo consumo, siendo este el valor base para el cálculo del resto de valores, con la aplicación de la metodología FAVAD en el procedimiento general de obtención de caudales dependientes e independientes de la presión.

**Tabla E10:** Orden de cálculos para la estimación de caudales de fugas

Hora	P. salida PRV	AZP (m)	Pc (m)	Q fuga (l/s)	Q fuga (m3/h)	orden de cálculo
0-1	50	39	19	$48.26 * ((39/38)^{0.9}) = 49.75$	$49.75 * 3.6 = 179.10$	2
1-2	50	38	21	$48.26 * ((38/38)^{0.9}) = 48.60$	$48.60 * 3.6 = 174.96$	3
2-3	50	38	22	$48.26 * ((38/38)^{0.9}) = 48.60$	$48.60 * 3.6 = 174.96$	4
3-4*	50	38	22	$64 * ((38/52)^{0.9}) = 48.26$	$48.26 * 3.6 = 173.74$	1

Valor de N1 a utilizar : 0.90

**Fuente:** Autor

Una vez obtenidos los resultados correspondientes a las 12 horas, el siguiente paso es calcular el nuevo caudal de entrada para cada hora bajo un simple proceso, que consta de la suma del caudal fugado y el caudal de consumo estimado. Al tener nuevos caudales de entrada es necesario recalcular las presiones que se generan en la red, entrando en un proceso de ajuste de valores. Esto es posible gracias los factores K, que en conjunto con los caudales de entrada, se podrán obtener los valores ajustados  $\Delta_p$  y  $\Delta_c$ .

3. *Revisar la nueva presión crítica en la hora de máximo consumo, y ajustar la presión de entrada si es necesario.*

Una vez obtenidos los nuevos valores de presión, tanto para el AZP como para el punto de presión crítico, bajo una regulación constante de presión de entrada de 50 m. Es recomendable revisar la presión crítica en la hora de máximo consumo, donde la presión es la más baja posible en la red. Si dicha presión no se acerca a la mínima de servicio, es necesario realizar un nuevo análisis variando nuevamente la presión de entrada. El objetivo de estas iteraciones es el de reducir la brecha entre estos dos valores, manteniendo una presión constante en la entrada.

Aquí un resumen de las diferentes iteraciones que se pueden realizar para alcanzar una mínima presión crítica en el sistema.

**Tabla E11:** Comportamiento de la presión crítica de acuerdo con la variación de la válvula reguladora de presión.

Iteración	Presion fija en PRV (50)	Menor presión en el punto crítico (m)
Sin regulación	Sin regulación	16,00
1	50	14,10
2	46	12,80
3	43	11,70
4	39	10,20
5	38,5	10,00

**Fuente:** Autor

La tabla muestra el proceso de iteraciones realizadas y el acercamiento que se tiene en el punto crítico hacia la presión mínima del sistema. Se puede concluir que, para el presente ejemplo, la presión ideal de entrada a la red será de 38.50 m.

Existe una incógnita más a ser resuelta, es la cantidad de agua total recuperada al reducir la presión de entrada. Ese valor se obtiene de la diferencia entre el caudal de entrada, bajo condiciones normales, y el caudal de entrada bajo este primer método de gestión de presiones. Los resultados se los puede presentar de la siguiente manera:

**Tabla E12:** Ahorro de agua diario para una regulación de presión fija.

Hora	Caudales de entrada (m3/h)		Ahorro horario calculado (m3/h)
	Condicion inicial	Reg. fija PRV 38.5 m	
0-1	82.80	61.20	21.60
1-2	75.60	53.00	22.60
2-3	72.00	48.70	23.30
3-4	72.00	48.70	23.30
4-5	72.00	48.70	23.30
5-6	75.60	52.00	23.60
6-7	93.60	71.10	22.50
7-8	108.00	86.00	22.00
8-9	111.60	92.70	18.90
9-10	115.20	96.20	19.00
10-11	118.80	99.70	19.10
11-12	115.20	96.20	19.00
12-13	111.60	92.70	18.90
13-14	115.20	97.20	18.00
14-15	111.60	93.70	17.90
15-16	111.60	92.70	18.90
16-17	104.40	86.70	17.70
17-18	104.40	85.70	18.70
18-19	108.00	89.20	18.80
19-20	108.00	88.10	19.90
20-21	104.40	84.60	19.80
21-22	100.80	80.10	20.70
22-23	100.80	79.10	21.70
23-24	97.20	75.60	21.60
<b>Totales diarios</b>	2390.40	1899.60	490.80

**Fuente:** Autor

Cabe señalar que los ahorros totales indicados en la tabla son conservadores y es probable que sean más altos, ya que no se ha hecho ninguna concesión para una reducción en el consumo de agua o la reducción de fugas debido al número de tuberías reparadas. Este simple ejemplo demuestra que la empresa encargada del suministro de agua puede tener ahorros en su suministro, simplemente reduciendo la presión en un punto específico de su red.

### 3.2.2 ANÁLISIS POR REGULACIÓN ACTIVA DE PRESIONES

Este segundo tipo de análisis propuesto, requiere de un análisis más riguroso y preciso al momento de modular las presiones junto al mecanismo de la VRP. De igual manera este dispositivo está ubicado en la entrada principal, donde se efectúa el suministro de agua a la red en estudio, esto mantendrá un nivel de presión (generalmente variable) que, para cada hora, la presión crítica resultante generada debe ser ligeramente mayor o igual a la presión mínima de servicio de la red.

Al realizar este tipo de modulación, se podrá tener un mayor control sobre el caudal fugado, disminuyendo no solo la presión crítica, o equiparando el valor al nivel mínimo de servicio, sino que también existirá una disminución de presiones global y muy considerable en todos los puntos o nodos de la red.

A continuación, se describirá paso a paso la aplicabilidad de esta segunda forma de análisis, se lo hará mediante tres pasos como la forma anterior:

1. Tener en consideración la presión mínima de servicio de la red, para posteriormente estimar, para cada hora, la presión de entrada que genere una presión crítica cercana a la de servicio. Por ejemplo, si la presión mínima de servicio es de 20 m y en la primera hora del día se tiene una presión crítica de 25 m, es necesario bajar dicha presión 5 m o cercano a ese valor. Para ello habrá que estimar una presión de entrada tal, que restado su valor  $\Delta P_{crit}$  bajo condiciones iniciales, dé como resultado la presión requerida mínima o cercano a ella.
2. Después de establecer las presiones, promedio y crítica para cada hora, se ejecutará el respectivo cálculo de caudales de fugas y caudales de entrada en base a la metodología descrita de caudales dependientes e independientes de la presión, obteniendo así un nuevo

$\Delta P_{prom}$  y un nuevo factor  $\Delta P_{crit}$ . Esto ayudara a ajustar la red en función del tipo de modulación.

3. Con estos nuevos valores obtenidos, se procede a realizar una segunda estimación de presiones de entrada, repitiendo el paso número 1, hasta llegar a la presión mínima de servicio establecida. Con ello se tendrán diferentes presiones de entrada que la VRP y deberá modular para así conseguir los resultados propuestos.

Se tomará el mismo ejemplo anterior para una mejor explicación de los procedimientos descritos:

*Según lecturas realizadas en una red de abastecimiento, la mínima presión crítica registrada es de 16 m entre las horas 13 y 15, en donde la presión de entrada medida es de 56 m. En este caso, el mínimo nivel de servicio del sistema es solo de 10 m, por tanto, la presión de entrada puede ser reducida al menos 6 m.*

1. *Estimación de las nuevas presiones de entrada para cada hora del día.*

Al tener los factores indicadores del comportamiento inicial de la red para cada hora del día, sin la implementación de algún tipo de regulación, como son: el caudal y presión de entrada, presión promedio, presión en el punto crítico,  $\Delta_{prom}$   $\Delta_{crit}$  y sus respectivos factores de resistencia K.

Se realizará la estimación de las nuevas presiones, en donde la presión crítica del sistema llegue a la mínima de servicio como se muestra a continuación.

**Tabla E13:** Parámetros de la red en condiciones iniciales para las primeras horas del día.

Hora	Q. Entrada (m <sup>3</sup> /h)	Presiones iniciales			$\Delta_p$	$\Delta_c$	Valores K para:	
		Pe. (m)	AZP (m)	Pc (m)			$\Delta_p$	$\Delta_c$
0 - 1	82,80	61,00	50,00	30,00	11,00	31,00	0,0016	0,00452
1 - 2	75,60	63,00	51,00	34,00	12,00	29,00	0,0021	0,00507
2 - 3	72,00	64,00	52,00	36,00	12,00	28,00	0,00231	0,0054
3 - 4*	72,00	64,00	52,00	36,00	12,00	28,00	0,00231	0,0054

\* . Hora de mínimo consumo en la red.

**Fuente:** Autor

**Tabla E14:** Estimación de nuevas presiones de entrada y cálculo de sus componentes resultantes.

Hora	Q. Entrada (m <sup>3</sup> /h)	Presiones resultantes segun estimacion de Pe		
		Pe. (m)	AZP (m)	Pc (m)
0 - 1	82.80	41.25	41.25 - 11.00 = 30.25	41.25 - 31.00 = 10.25
1 - 2	75.60	39.30	27.30	10.30
2 - 3	72.00	38.20	26.20	10.20
3 - 4*	72.00	38.20	26.20	10.20

**Fuente:** Autor

En este caso, para la primera hora del día, se estima una presión de entrada que da como resultado una presión crítica cercana a la mínima disponible de 10.25 m. Se puede hacer un proceso de tanteo para logra una presión critica de 10 m, pero no es recomendable, este primer proceso de cálculo solo es una estimación de valores, y es necesario realizar cierto ajuste, el cual puede elevar o disminuir un poco las presiones resultantes AZP y Pc.

Este primer paso se aplicará para todas las horas del día, desde la hora 1 hasta la hora 24, y posteriormente se realizará el proceso de cálculo, en base al análisis de caudales dependientes e independientes

de la presión, para determinar el nuevo caudal de fugas generado y posteriormente el caudal de consumo.

2. *Cálculo del nuevo  $\Delta P_{prom}$  y  $\Delta P_{crit}$  en base a los procedimientos descritos de caudales dependientes e independientes de la presión.*

Como siguiente paso, y repitiendo la primera metodología propuesta, se tendrá que calcular la cantidad de agua fugada en la primera hora y posteriores. Para ello es necesario determinar la potencial cantidad de agua fugada para la hora de mínimo consumo (situación más desfavorable de la red) bajo el cambio de presión de entrada, que en este caso se la considerará con un valor de 38.20 m.

*Según los datos contabilizados, las lecturas a utilizarse en la hora de mínimo consumo (horas 3-4) son las siguientes:*

AZP contabilizado inicial: 52 m

$Q_{fuga}$  contabilizado inicial: 64 m<sup>3</sup>/h

AZP bajo la variación de presión en la entrada: 26.20 m

Con estos datos esenciales será posible encontrar el nuevo caudal fugado para la hora del mínimo consumo, siendo este el valor base para el cálculo del resto valores con la aplicación de la metodología FAVAD en el procedimiento general de cálculo de caudales dependientes e independientes de la presión.

**Tabla E15:** Estimación del caudal de fugas



Hora	P. salida PRV	AZP (m)	Pc (m)	Q fuga (l/s)	Q fuga (m3/h)	orden de cálculo
0-1	41.25	30.25	10.25	$34.53 * ((30.25/26.20)^{0.9}) = 39.30$	$39.30 * 3.6 = 141.48$	2
1-2	39.30	27.30	10.30	$34.53 * ((27.30/26.20)^{0.9}) = 35.83$	$35.83 * 3.6 = 129.00$	3
2-3	38.20	26.20	10.20	$34.53 * ((26.20/26.20)^{0.9}) = 34.53$	$34.53 * 3.6 = 124.31$	4
3-4*	38.20	26.20	10.20	$64 * ((26.20/52)^{0.9}) = 34.53$	$34.53 * 3.6 = 124.31$	1

Valor de N1 a utilizar : 0.90

**Fuente:** Autor

Una vez obtenidos los resultados correspondientes a las 12 horas, el siguiente paso es calcular el nuevo caudal de entrada para cada hora bajo un simple proceso, que consta de la suma del caudal fugado y el caudal de consumo estimado inicialmente. Al tener nuevos caudales de entrada es necesario recalcular las presiones que se generan en la red, entrando en un proceso de ajuste de valores. Esto es posible gracias los factores K, que en conjunto con los caudales de entrada, se podrán obtener los valores ajustados  $\Delta_p$  y  $\Delta_c$ .

**Tabla E16:** Valores ajustados  $\Delta_p$  y  $\Delta_c$

Hora	Q fuga (l/s)	Q consumo (l/s)	Q entrada (l/s)	K $\Delta_p$	K $\Delta_c$	Nuevos valores	
						$\Delta_p$	$\Delta_c$
0-1	39.30	21.80	61.10	0.0016	0.0045	5.97	16.80
1-2	35.83	12.60	48.43	0.0021	0.0051	4.93	11.96
2-3	34.53	8.00	42.53	0.0023	0.0054	4.16	9.77
3-4*	34.53	8.00	42.53	0.0023	0.0054	4.16	9.77

**Fuente:** Autor

### 3. Ajuste de presiones de salida y cálculo definitivo.

Una vez obtenidos los nuevos valores de presión, tanto para el AZP como para el punto de presión crítica, se podrá ejecutar el paso 1 reduciendo nuevamente la presión de entrada para cada hora, hasta que las presiones críticas resultantes se acerquen a la mínima presión de servicio, establecida por la red de abastecimiento en estudio (10 m). Luego de dicho proceso, se obtendrán los valores definitivos de presión de entrada y fugas mediante los análisis establecidos en el paso 2, y finalmente se podrá realizar una

comparación entre los caudales de entrada iniciales (sin regulación) y los caudales de entrada, resultantes del análisis con regulación activa de presiones, tal como se realizó en la metodología con regulación fija.

#### **4. CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO.**

En el presente capítulo se demostrará la aplicabilidad efectiva de los métodos descritos mediante un caso real de estudio, realizándose varios análisis en uno de los distritos del sistema de distribución de agua potable del sector llamado “La Atarazana”, ubicado en la ciudad de Guayaquil. Dicha red de

abastecimiento es gestionada por la empresa International Water Services (Interagua C. Ltda), en donde se realizaron un número considerable de mediciones y análisis para determinar su comportamiento real. Estas gestiones fueron solicitadas por la misma empresa al ver que los reportes de fugas del sector eran numerosos, por tanto, se presumió que las presiones en el sistema eran muy elevadas, generando constantes roturas tanto visibles como no visibles, denominadas también como fugas superficiales y de fondo respectivamente.

Respecto a los reportes de fugas, la empresa Interagua ha contabilizado y determinado, bajo mediciones anuales, índices de pérdidas para el sector, representadas por dos indicadores que describen el estado de fugas:

35.5 fugas cada mil conexiones de servicio por año

241.3 fugas cada 100 kilómetros por año

Según estudios de la entidad IWA, los valores admisibles de fugas para redes de abastecimiento están representados por:

22.5 fugas cada mil conexiones de servicio anuales.

12 fugas cada 100 kilómetros por año.

Al realizar, una comparación de los indicadores obtenidos en la red con los indicadores admisibles, existe una gran diferencia, sobre todo con las fugas reportadas cada 100 kilómetros de red. El índice de fugas del sector es muy elevado, requiriéndose una intervención en su sistema de abastecimiento de agua potable.

#### **4.1. INFORMACION TÉCNICA Y COMPONENTES**

El distrito de medición mencionado, denominado N50, está compuesto con más de 3000 conexiones, de las cuales para este estudio se han elegido ciertos puntos de monitoreo esenciales descritos a continuación, bajo cierta nomenclatura la cual es dada por la empresa responsable:

- ▲ M31: punto de entrada a la red en donde ejecutarán mediciones de presión y caudal de acuerdo al período establecido.
- ▲ N50-313: Primer punto de ubicación AZP, se medirá el comportamiento de presiones.
- ▲ N50-309: Segundo punto de ubicación AZP en donde se medirá el comportamiento de presiones.
- ▲ N50-305: Presión crítica global del sistema ubicada en la red.

Para este caso, la red en estudio presenta dos ubicaciones posibles para el punto de presión promedio o AZP, por tal motivo, se necesitará promediar los valores medidos y así tener un valor general para el sistema.

*Como datos generales, este sistema de distribución de agua potable cuenta con 3590 conexiones, una longitud total de red de 39.70 km, bajo un diámetro nominal de 400 mm.*

Una vez definido los puntos de estudio, se procede a realizar las respectivas mediciones. La empresa encargada del abastecimiento determinó mediciones para un período de 7 días y estos fueron los resultados:

**Tabla CE1: Datos generales**

Presión Prueba de 02:00 a 04:00	
Caudal Prueba de 02:00 a 04:00	
SECTOR HIDRAÚLICO	N50-305-306-308-309-311-312-313-314-315

TIPO DE PRUEBA	Caudal Mínimo Nocturno
PUNTO DE MEDICIÓN	M-31
	Avenida 5 N-E y 7 Callejón 11 N-E
EQUIPO DE MEDICIÓN	Caudalímetro ultrasónico Siemens de sonda externa
INICIO DE PRUEBA	Jueves 10 de Mayo del 2012 (16h00)
FIN DE PRUEBA	Jueves 17 de Mayo del 2012 (16h20)

**Tabla CE2:** Mediciones horarias en parámetros esenciales

Fecha - Hora	Presión M-31 (mca)	Presión Promedio Global #1 (mca) N50-313	Presión Promedio Global #2 (mca) N50-309	Presión Crítico Global (mca) N50-305	Caudal M-31 (l/s)	Presión Promedio Global #1 y # 2 (mca)
5/10/2012 16:00	36.83	25.92	27.17	23.04	150.92	26.54
5/10/2012 17:00	37.00	26.96	28.17	24.13	146.25	27.56
5/10/2012 18:00	36.88	26.54	27.83	23.54	143.92	27.19
5/10/2012 19:00	36.96	27.46	28.67	24.67	140.58	28.06
5/10/2012 20:00	37.54	28.08	29.00	25.21	141.67	28.54
5/10/2012 21:00	39.46	30.00	30.92	27.21	141.08	30.46
5/10/2012 22:00	39.67	30.38	31.13	27.33	140.92	30.75
5/10/2012 23:00	40.38	31.92	32.50	29.29	133.17	32.21
5/11/2012 0:00	37.50	30.88	31.21	28.63	116.75	31.04
5/11/2012 1:00	40.25	33.54	33.88	31.25	118.08	33.71
5/11/2012 2:00	42.46	35.54	35.92	33.25	118.50	35.73
5/11/2012 3:00	42.50	36.00	36.38	33.88	116.58	36.19
5/11/2012 4:00	42.83	36.13	36.38	33.83	117.42	36.25
5/11/2012 5:00	42.50	34.96	35.17	32.46	126.25	35.06
5/11/2012 6:00	41.25	31.54	32.25	28.58	144.33	31.90
5/11/2012 7:00	40.79	30.50	31.21	28.04	148.50	30.85
5/11/2012 8:00	38.71	28.21	29.25	25.83	148.75	28.73
5/11/2012 9:00	38.46	27.13	28.29	24.63	151.58	27.71
5/11/2012 10:00	38.17	26.67	27.58	24.29	153.92	27.13
5/11/2012 11:00	37.79	25.88	27.17	23.21	153.75	26.52
5/11/2012 12:00	38.00	26.08	27.25	23.00	155.08	26.67
5/11/2012 13:00	38.00	26.13	27.17	23.08	154.50	26.65
5/11/2012 14:00	37.96	26.29	27.71	23.29	152.83	27.00
5/11/2012 15:00	37.50	26.04	27.79	23.17	151.33	26.92
5/11/2012 16:00	37.96	26.96	28.38	24.13	149.58	27.67
5/11/2012 17:00	37.96	27.04	28.17	24.25	147.42	27.60
5/11/2012 18:00	37.71	26.88	28.08	23.83	146.00	27.48
5/11/2012 19:00	38.83	28.13	29.54	25.08	145.92	28.83
5/11/2012 20:00	41.17	30.71	31.58	28.08	145.50	31.15
5/11/2012 21:00	42.00	32.00	32.96	29.42	139.83	32.48
5/11/2012 22:00	42.58	32.75	33.79	30.13	139.25	33.27
5/11/2012 23:00	43.46	34.25	34.96	31.54	134.50	34.60

5/12/2012 0:00	41.50	33.79	34.46	31.50	121.00	34.13
5/12/2012 1:00	37.63	31.46	31.88	29.33	110.17	31.67
5/12/2012 2:00	43.71	36.50	37.08	34.33	119.17	36.79
5/12/2012 3:00	45.50	38.04	38.63	35.96	120.08	38.33
5/12/2012 4:00	45.50	38.00	38.58	35.92	122.17	38.29
5/12/2012 5:00	45.50	37.50	38.13	35.29	123.67	37.81
5/12/2012 6:00	44.42	35.38	36.38	32.88	133.50	35.88
5/12/2012 7:00	40.88	31.00	31.92	28.58	139.75	31.46
5/12/2012 8:00	38.04	26.83	28.38	24.54	146.08	27.60
5/12/2012 9:00	36.79	24.71	26.63	22.42	152.25	25.67
5/12/2012 10:00	36.50	23.83	26.00	21.38	154.00	24.92
5/12/2012 11:00	36.00	23.29	25.71	20.83	154.58	24.50
5/12/2012 12:00	36.17	23.75	25.83	21.42	154.25	24.79
5/12/2012 13:00	36.50	24.71	26.63	22.29	152.25	25.67
5/12/2012 14:00	36.71	24.92	27.13	22.21	151.33	26.02
5/12/2012 15:00	36.79	25.46	27.38	23.13	147.33	26.42
5/12/2012 16:00	37.04	26.46	28.21	24.17	143.17	27.33
5/12/2012 17:00	36.71	26.79	28.25	24.75	137.92	27.52
5/12/2012 18:00	36.63	27.13	28.42	24.83	137.17	27.77
5/12/2012 19:00	37.21	27.71	29.00	25.38	134.17	28.35
5/12/2012 20:00	37.33	28.25	29.50	25.83	130.42	28.88
5/12/2012 21:00	37.33	28.58	29.58	26.13	128.75	29.08
5/12/2012 22:00	37.08	28.92	30.00	26.42	125.42	29.46
5/12/2012 23:00	37.54	29.96	30.92	27.88	120.17	30.44
5/13/2012 0:00	38.25	31.08	31.92	29.04	114.25	31.50
5/13/2012 1:00	37.96	31.50	32.25	29.67	108.17	31.88
5/13/2012 2:00	37.33	31.33	32.08	29.67	104.08	31.71
5/13/2012 3:00	42.04	35.08	35.92	33.04	112.33	35.50
5/13/2012 4:00	42.50	35.50	36.33	33.54	113.83	35.92
5/13/2012 5:00	42.50	35.54	36.25	33.58	115.92	35.90
5/13/2012 6:00	41.83	34.13	34.79	31.88	121.92	34.46
5/13/2012 7:00	38.08	30.25	31.00	28.00	125.58	30.63
5/13/2012 8:00	37.50	28.29	29.29	25.96	138.17	28.79
5/13/2012 9:00	37.50	27.08	28.63	25.04	148.17	27.85
5/13/2012 10:00	37.25	26.42	27.79	24.21	151.83	27.10
5/13/2012 11:00	37.38	25.92	27.42	23.67	150.58	26.67
5/13/2012 12:00	39.25	27.83	29.58	25.42	150.67	28.71
5/13/2012 13:00	39.67	28.88	30.54	26.42	146.42	29.71
5/13/2012 14:00	40.46	29.42	30.79	26.79	147.33	30.10
5/13/2012 15:00	40.50	30.42	31.83	28.29	141.25	31.13
5/13/2012 16:00	40.50	30.75	31.88	28.58	139.58	31.31
5/13/2012 17:00	39.88	30.33	31.29	27.58	136.08	30.81
5/13/2012 18:00	39.50	30.00	31.17	27.79	133.17	30.58
5/13/2012 19:00	40.54	30.67	32.00	28.42	135.92	31.33
5/13/2012 20:00	42.21	32.21	33.50	29.38	136.25	32.85
5/13/2012 21:00	43.88	33.67	35.08	31.25	137.00	34.38
5/13/2012 22:00	44.42	34.42	35.58	32.13	138.17	35.00
5/13/2012 23:00	44.04	34.92	36.08	32.79	128.83	35.50

5/14/2012 0:00	39.67	32.92	33.54	31.04	111.00	33.23
5/14/2012 1:00	40.83	34.58	35.33	32.67	109.58	34.96
5/14/2012 2:00	45.33	38.00	38.75	36.04	114.75	38.38
5/14/2012 3:00	44.08	37.21	37.88	35.25	114.92	37.54
5/14/2012 4:00	44.25	37.33	37.83	35.17	116.42	37.58
5/14/2012 5:00	42.50	34.96	35.42	32.75	123.75	35.19
5/14/2012 6:00	37.71	28.63	29.42	26.00	135.50	29.02
5/14/2012 7:00	40.79	29.67	30.83	27.21	148.67	30.25
5/14/2012 8:00	38.13	26.63	28.08	24.13	150.67	27.35
5/14/2012 9:00	36.46	24.92	26.33	22.54	150.42	25.63
5/14/2012 10:00	35.92	23.92	25.75	21.75	150.25	24.83
5/14/2012 11:00	35.50	23.79	25.42	21.25	151.08	24.60
5/14/2012 12:00	35.50	23.75	25.29	21.33	149.50	24.52
5/14/2012 13:00	35.46	23.88	25.42	20.96	149.08	24.65
5/14/2012 14:00	35.46	24.04	25.38	21.00	149.25	24.71
5/14/2012 15:00	35.50	24.08	25.54	21.42	147.33	24.81
5/14/2012 16:00	35.50	24.38	25.67	21.67	146.00	25.02
5/14/2012 17:00	35.79	24.71	25.71	21.92	148.83	25.21
5/14/2012 18:00	36.38	25.63	26.83	23.17	145.25	26.23
5/14/2012 19:00	36.58	26.21	27.46	23.38	142.17	26.83
5/14/2012 20:00	36.63	27.63	28.46	24.50	135.83	28.04
5/14/2012 21:00	36.88	28.13	29.04	25.17	132.92	28.58
5/14/2012 22:00	35.63	27.58	28.21	24.92	126.25	27.90
5/14/2012 23:00	35.13	28.13	28.71	25.75	118.25	28.42
5/15/2012 0:00	35.58	29.58	29.88	27.21	110.00	29.73
5/15/2012 1:00	36.25	30.58	30.92	28.42	104.25	30.75
5/15/2012 2:00	38.54	32.79	33.04	30.50	105.58	32.92
5/15/2012 3:00	39.00	33.00	33.38	30.92	105.08	33.19
5/15/2012 4:00	39.04	33.29	33.50	31.08	106.67	33.40
5/15/2012 5:00	38.96	32.33	32.54	29.88	117.58	32.44
5/14/2012 6:00	38.00	28.79	29.58	25.67	137.83	29.19
5/15/2012 7:00	37.04	26.54	27.83	23.33	145.42	27.19
5/15/2012 8:00	36.79	25.50	26.92	22.50	151.00	26.21
5/15/2012 9:00	35.46	23.79	24.96	21.13	153.17	24.38
5/15/2012 10:00	34.96	23.38	24.75	20.67	152.25	24.06
5/15/2012 11:00	35.00	23.54	24.75	20.96	151.67	24.15
5/15/2012 12:00	34.96	24.17	25.13	21.67	148.75	24.65
5/15/2012 13:00	34.88	23.92	25.13	21.67	148.33	24.52
5/15/2012 14:00	34.67	23.63	24.83	20.75	148.50	24.23
5/15/2012 15:00	34.63	23.83	25.33	20.83	145.25	24.58
5/15/2012 16:00	34.63	24.29	25.83	21.46	142.67	25.06
5/15/2012 17:00	34.71	24.92	25.92	22.04	139.92	25.42
5/15/2012 18:00	34.54	24.88	26.00	21.79	138.83	25.44
5/15/2012 19:00	34.58	25.17	26.42	21.96	138.08	25.79
5/15/2012 20:00	34.83	26.00	27.00	22.79	133.67	26.50
5/15/2012 21:00	35.00	26.63	27.63	23.79	129.08	27.13
5/15/2012 22:00	35.17	27.33	28.25	24.71	127.33	27.79
5/15/2012 23:00	35.50	28.29	28.96	25.83	121.33	28.63
5/16/2012 0:00	35.79	29.67	30.21	27.21	112.92	29.94
5/16/2012 1:00	36.13	30.71	31.13	28.33	106.92	30.92
5/16/2012 2:00	38.17	32.42	32.88	30.13	108.33	32.65

5/16/2012 3:00	38.88	33.08	33.50	30.88	107.75	33.29
5/16/2012 4:00	39.00	33.04	33.46	30.67	110.92	33.25
5/16/2012 5:00	38.92	32.17	32.58	29.83	118.75	32.38
5/16/2012 6:00	38.17	28.96	29.63	26.21	140.25	29.29
5/16/2012 7:00	37.46	27.29	28.46	24.33	144.67	27.88
5/16/2012 8:00	36.29	25.67	27.29	23.00	145.25	26.48
5/16/2012 9:00	35.54	24.75	25.92	22.13	146.83	25.33
5/16/2012 10:00	35.50	24.67	25.79	21.88	147.58	25.23
5/16/2012 11:00	35.38	23.96	25.21	21.33	148.67	24.58
5/16/2012 12:00	35.46	24.71	25.88	21.92	143.92	25.29
5/16/2012 13:00	35.21	24.75	25.92	22.08	147.42	25.33
5/16/2012 14:00	35.17	24.13	25.38	21.29	150.75	24.75
5/16/2012 15:00	35.08	24.54	25.63	21.75	146.50	25.08
5/16/2012 16:00	35.21	24.88	26.08	22.46	142.75	25.48
5/16/2012 17:00	35.63	25.83	26.79	22.79	139.50	26.31
5/16/2012 18:00	35.79	26.08	27.42	23.17	138.58	26.75
5/16/2012 19:00	35.92	26.42	27.75	23.42	137.67	27.08
5/16/2012 20:00	37.04	27.46	28.67	24.25	136.92	28.06
5/16/2012 21:00	38.00	29.17	30.33	25.92	132.33	29.75
5/16/2012 22:00	38.38	29.54	30.88	26.88	130.17	30.21
5/16/2012 23:00	36.33	29.08	30.00	26.79	119.58	29.54
5/17/2012 0:00	37.13	30.83	31.54	28.63	112.33	31.19
5/17/2012 1:00	39.42	33.08	33.58	30.83	111.25	33.33
5/17/2012 2:00	39.79	33.75	34.29	31.54	108.75	34.02
5/17/2012 3:00	40.92	34.46	34.88	32.29	110.75	34.67
5/17/2012 4:00	46.83	39.04	39.67	36.79	124.00	39.35
5/17/2012 5:00	46.33	37.83	38.33	35.21	132.50	38.08
5/17/2012 6:00	44.13	33.79	34.75	31.13	146.42	34.27
5/17/2012 7:00	40.54	30.04	31.42	27.63	145.33	30.73
5/17/2012 8:00	39.79	28.54	29.96	25.67	151.17	29.25
5/17/2012 9:00	38.54	26.79	28.29	23.96	153.58	27.54
5/17/2012 10:00	38.79	25.71	27.67	22.83	158.25	26.69
5/17/2012 11:00	37.96	25.42	27.54	22.50	154.50	26.48
5/17/2012 12:00	38.29	26.25	28.00	23.42	153.67	27.13
5/17/2012 13:00	38.17	26.54	28.13	23.58	153.83	27.33
5/17/2012 14:00	38.04	26.04	27.75	23.25	153.92	26.90
5/17/2012 15:00	37.88	25.75	27.58	22.71	152.67	26.67
5/17/2012 16:00	37.70	26.10	27.90	23.50	149.60	27.00

**Fuente:** Medición de macrosector -N50 – del 10 al 17 de mayo de 2012, proporcionado por el Tutor de Tesis.

Como se puede apreciar, la tabla de mediciones es muy extensa y es necesario depurar toda la información para tener un concepto más general del estado de la red. Es necesario mencionar que existen ciertos valores marcados con dos colores diferentes en determinado período, los cuales representan mediciones bajo el período estimado de estudio en la metodología de los caudales mínimos nocturnos (de 2 am a 4 am). Los valores tomados, representan al caudal de entrada a la red y la presión promedio (AZP

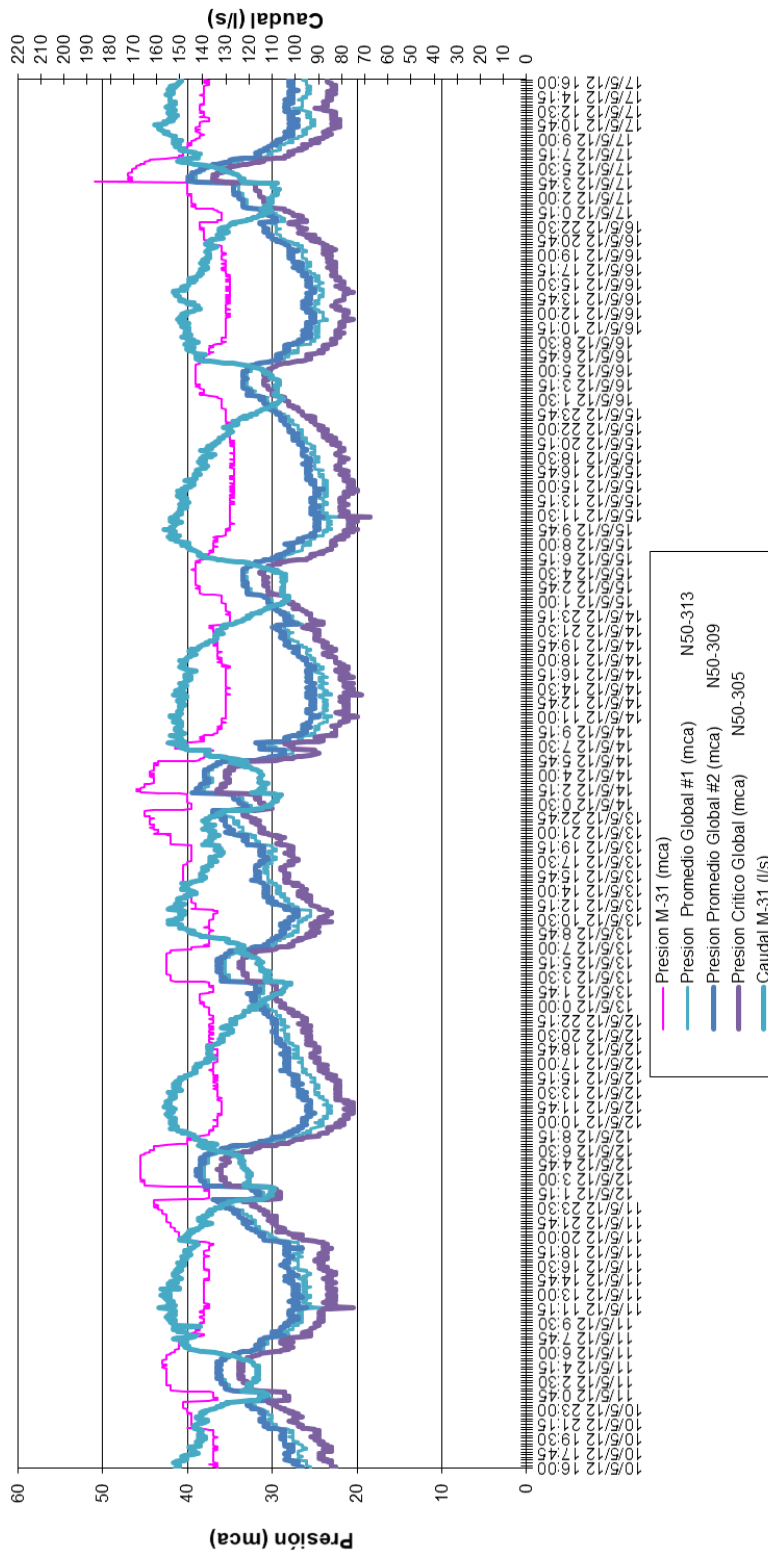


nocturno) respectivamente. Esto ayudará en la aplicabilidad de la metodología para la obtención del caudal mínimo nocturno y el potencial caudal de fugas estimado.

Para una mejor comprensión de las mediciones tomadas, se presenta la siguiente gráfica, y se detallan las variaciones de la red para cada parámetro, obteniéndose un resultado real tanto en las horas del día como en horas nocturnas. Se podrá observar que las presiones y los caudales, generan cierto patrón de comportamiento a determinadas horas.

**Gráfico A:** Detalle del comportamiento de parámetros

**MACROSECTOR -N50 - 10 AL 17 DE MAYO DEL 2012**  
**SECTOR HIDRÁULICO N50 -305-306-308-309-311-312-313-314-315**  
PUNTO DE MEDICIÓN DIRECTA  
AVENIDA 5 N-E Y CALLEJON 11 N-E (M-31)  
CAUDALÍMETRO ULTRASONICO SIEMENS DE SONDA EXTERNA



**Fuente:** Autor

Como se mencionó anteriormente, es necesario realizar una depuración de datos para facilitar el análisis, se comenzará con el comportamiento -horario de las presiones de entrada.

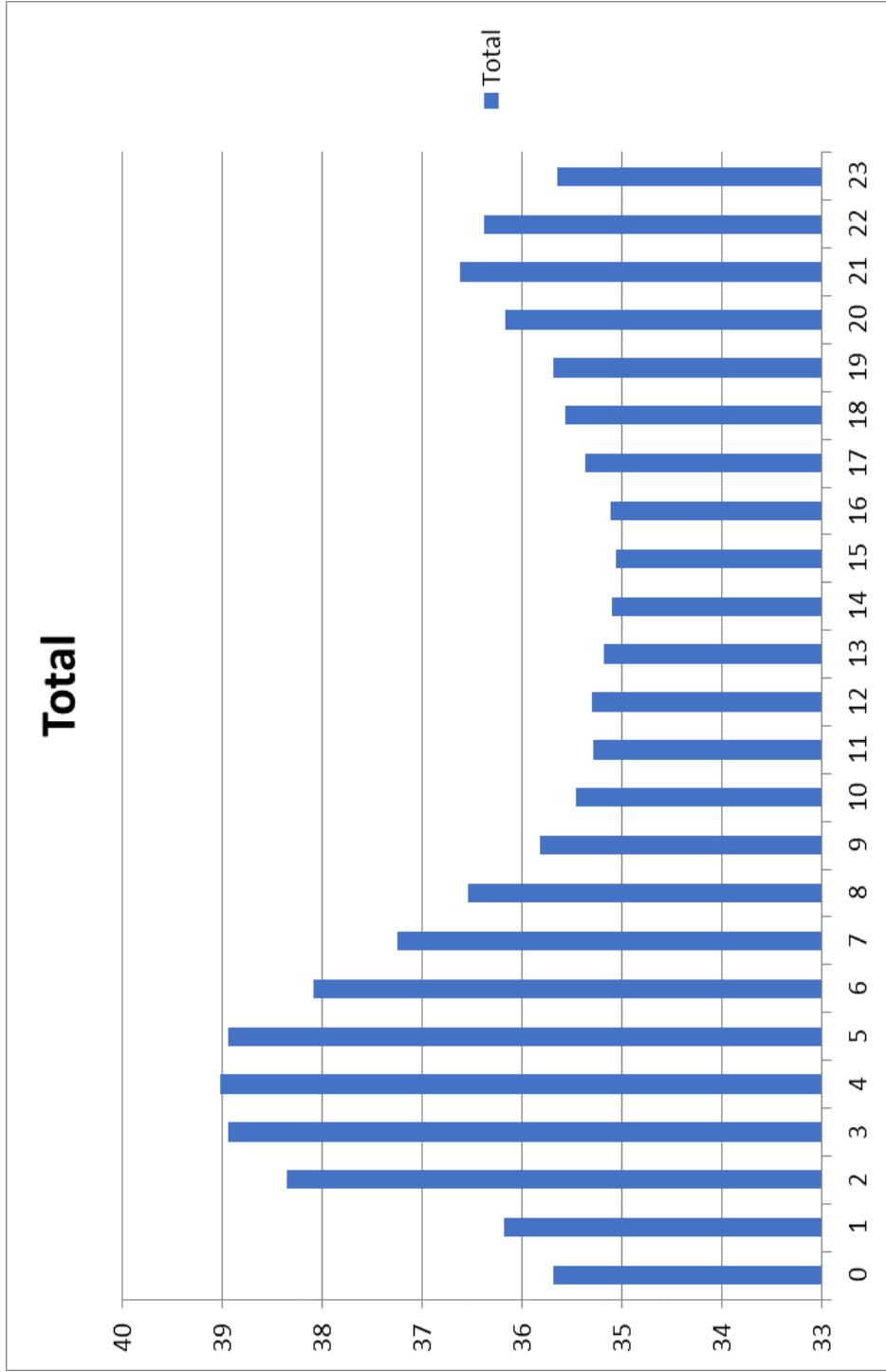
**Tabla CE3:** Depuración de valores obtenidos de presión de ingreso

Promedio de Presion M-31 (mca)	
Fecha - Hora	Total
0	35.69
1	36.19
2	38.35
3	38.94
4	39.02
5	38.94
6	38.08
7	37.25
8	36.54
9	35.82
10	35.46
11	35.29
12	35.31
13	35.18
14	35.10
15	35.07
16	35.11
17	35.38
18	35.57
19	35.69
20	36.17
21	36.63
22	36.39
23	35.65
<b>Total general</b>	<b>36.18</b>

**Fuente:** Autor

Al realizar un análisis de la tabla, se puede encontrar que todos los valores promedio se acercan a un valor de 35 y 36 mca, a excepción de las horas nocturnas en donde su valor se incrementa considerablemente. Esta primera depuración de datos, se puede agrupar bajo cierto grafico referencial de la siguiente manera:

**Gráfico B:** Comportamiento gráfico de la presión de ingreso



**Fuente:** Autor

Ahora es indispensable obtener la depuración de los demás datos bajo un período - horario para las 24 horas del día:

**Tabla CE4:** Valores horarios para cada parámetro

Fecha - Hora	Promedio de Caudal M-31 (l/s)	Promedio de Presión M-31 (mca)	Promedio de Presión Promedio Global #2 (mca) N50-309	Promedio de Presión Crítico Global (mca)N50-305
0	111,46	35,69	30,04	27,21
1	105,58	36,19	31,02	28,38
2	106,96	38,35	32,96	30,31
3	106,42	38,94	33,44	30,90
4	108,79	39,02	33,48	30,88
5	118,17	38,94	32,56	29,85
6	139,04	38,08	29,60	25,94
7	145,04	37,25	28,15	23,83
8	148,13	36,54	27,10	22,75
9	150,14	35,82	25,74	21,93
10	150,03	35,46	25,43	21,43
11	150,47	35,29	25,13	21,18
12	147,39	35,31	25,43	21,64
13	148,28	35,18	25,49	21,57
14	149,50	35,10	25,19	21,01
15	146,36	35,07	25,50	21,33
16	143,81	35,11	25,86	21,86
17	142,75	35,38	26,14	22,25
18	140,89	35,57	26,75	22,71
19	139,31	35,69	27,21	22,92
20	135,47	36,17	28,04	23,85
21	131,44	36,63	29,00	24,96
22	127,92	36,39	29,11	25,50
23	119,72	35,65	29,22	26,13
<b>Total general</b>	<b>135,71</b>	<b>36,18</b>	<b>27,85</b>	<b>24,14</b>

**Fuente:** Autor

Con estos resultados finales de medición horaria, se procederá con la aplicación de las diferentes metodologías descritas en el presente trabajo de tesis.

#### 4.2. PROCESO DE ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE USO NOCTURNO

Para un mejor seguimiento del proceso, este apartado se expondrá mediante la aplicación de pasos específicos.

- ▲ *Volumen anual de consumo del sector de acuerdo a datos proporcionados por Interagua.*

**Tabla CE5:** Consumos anuales para el sector en estudio

Total conexiones =	3,590	
Longitud de red =	39.37	Km
Densidad de conexiones=	91	conex/km
Volumen anual Contabilizado =	1,825,292	m <sup>3</sup> /año
Caudal promedio contabilizado =	58.7	l/s

Tipo de cliente	No. de conex.	Volumen contabiliz.(+) (m <sup>3</sup> /año)	Caudal promedio contabiliz. (+) (l/s)
Residencial	3,183	1,049,549	33.74
Comercial	363	508,230	16.34
Oficial	43	259,378	8.34
Público	0	0	0.00
Industrial	1	8,135	0.26

**Fuente:** Contabilización de consumos anuales en Atarazana, Interagua

- ▲ *Estimación de uso nocturno de acuerdo a factores establecidos*

**Tabla CE6:** Consumos anuales para el sector en estudio

Tipo de cliente	Tipo de abastec.	Factor de uso nocturno *	Q uso nocturno (l/s)
Residencial	Todos	0.390	13.16
Comercial	Todos	0.100	1.63
Oficial	Todos	0.200	1.67
Público	Todos	0.000	0.00
			<b>16.46</b>

**Fuente:** Factores de usos nocturnos, Interagua

▲ *Suma total y aplicación del factor de error por micromediciones.*

**Tabla CE7:** Valor estimado de uso nocturno corregido

Uso nocturno no industrial	16.46 l/s
Uso nocturno industrial y grandes consumidores	2.59 l/s
<b>Total de uso nocturno</b>	<b>19.05 l/s</b>
Error de micromedición	8.0%
<b>Uso nocturno estimado (corregido)</b>	<b>20.58 l/s</b>

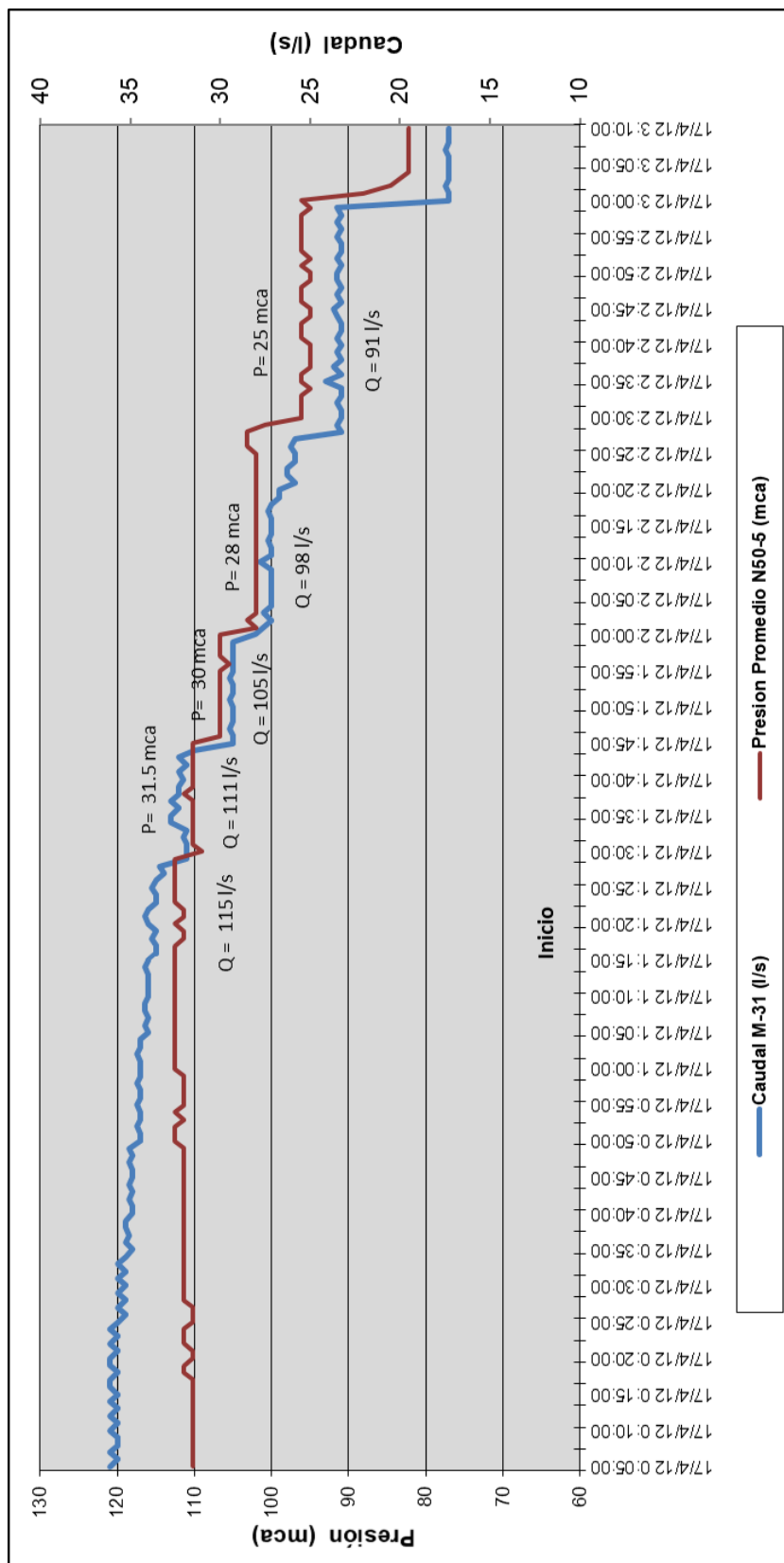
**Fuente:** Autor

### **4.3. ESTIMACIÓN DEL VALOR N1 SEGÚN PRESSURE STEP TEST**

El valor N1 es de suma importancia, y es necesario incorporarlo al proceso de estimación de los caudales de fugas de la red para cada hora del día, logrando desarrollarse los análisis de caudales dependientes e independientes de la presión. En éste apartado se muestra la respectiva tabla de mediciones de *caudal vs presión* para 4 escenarios posibles en las horas nocturnas propuestas por el abastecimiento.

Una vez recompilados los datos necesarios para la estimación de los valores N1, en los diferentes períodos establecidos, se calculará un valor representativo promedio.

**Gráfico C: Mediciones de caudal vs presión – Pressure Step**



**Fuente:** Cálculo de exponente N1 para pérdidas físicas, Interagua



**Tabla CE8: Períodos de medición y cálculo final del valor N1**

Hora de inicio	Hora de fin	Presión (mca)	Caudal (l/s)	Consumo (l/s)	Pérdidas (l/s)	Valores calculados de N1 para pérdidas físicas				
						Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
	1:30	32.5	115.0	20.6	94.4					
1:30	1:45	31.5	111.0	20.6	90.4	1.39				
1:45	2:00	30.0	105.0	20.6	84.4	1.40	1.41			
2:00	2:25	28.0	98.0	20.6	77.4	1.33	1.32	1.25		
2:25	3:00	25.0	91.0	20.6	70.4	1.12	1.08	0.99	0.84	
						<b>N1 Promedio =</b>				
						<b>1.21</b>				

Inicio  
Step 1  
Step 2  
Step 3  
Step 4

**Fuente:** Autor.

#### 4.4. ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE FUGAS Y VALORES K INICIALES (SECTOR SIN REGULACIÓN)

Como siguiente paso del proceso, se aplicarán los conceptos y métodos antes mencionados para la estimación de caudales dependientes e independientes de la presión (caudales de fugas y consumos respectivamente), así como también la obtención del factor K para cada hora del día.

Una vez seleccionada y establecida la hora de mínimo consumo nocturno se obtiene un caudal de fugas, realizando una diferencia entre el caudal de entrada a la red y el consumo en dicho periodo.

Al obtener dicho dato inicial, el cual será marcado con color rojo, se procederá a obtener los caudales de fugas restantes en las 23 horas del día faltantes mediante la aplicación de la ecuación de FAVAD, procedimiento descrito en detalle en la metodología de caudales dependientes e independientes de la presión.

La siguiente tabla muestra todo el proceso de forma conjunta, incluye la depuración de datos realizada, los diferenciales de presión, factores K, estimación de caudal de fugas y caudales de consumo finales. Adicionalmente se incorporará una gráfica en donde se podrá apreciar el caudal de entrada a la red en conjunto con el caudal de fugas actual de sistema.

##### Información general recopilada

##### Regulación de presiones, distrito "Atarazanas"

Sector hidráulico:	N50			
Na=	3590			
L=	39.7 Km			
DN=	400 mm			
N1 =	1.20 (17/abril/2012)			
Q promedio de consumo (op. comerciales)=	58.7 l/s	8% error		<b>63.4 l/s</b>
Q estimado de uso nocturno =	19.1 l/s	medición		20.6 l/s

**Tabla CE9: Comportamiento hidráulico del sector**

Sector sin regulación												
Hora	Caudal (l/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	P entrada (mca)	P prom (mca)	P crítico (mca)	ΔP prom (mca)	ΔP crítico (mca)	K ΔP prom (m-5.h <sup>2</sup> )	K ΔP crít (m-5.h <sup>2</sup> )	Q fuga (l/s)	Q fuga (m <sup>3</sup> /h)	Q consumo (l/s)
0	111.5	401.3	35.7	30.0	27.2	5.6	8.5	0.000351	0.000527	75.5	271.8	36.0
1	105.6	380.1	36.2	31.0	28.4	5.2	7.8	0.000358	0.000541	78.5	282.4	27.1
2	107.0	385.1	38.4	33.0	30.3	5.4	8.0	0.000364	0.000542	84.4	303.7	22.6
3	106.4	383.1	38.9	33.4	30.9	5.5	8.0	0.000375	0.000548	85.8	309.0	20.6
4	108.8	391.7	39.0	33.5	30.9	5.5	8.1	0.000361	0.000531	86.0	309.5	22.8
5	118.2	425.4	38.9	32.6	29.9	6.4	9.1	0.000352	0.000502	83.2	299.4	35.0
6	139.0	500.6	38.1	29.6	25.9	8.5	12.1	0.000338	0.000485	74.2	267.0	64.9
7	145.0	522.2	37.3	28.1	23.8	9.1	13.4	0.000334	0.000492	69.8	251.3	75.2
8	148.1	533.3	36.5	27.1	22.8	9.4	13.8	0.000332	0.000485	66.7	240.2	81.4
9	150.1	540.5	35.8	25.7	21.9	10.1	13.9	0.000345	0.000475	62.7	225.7	87.4
10	150.0	540.1	35.5	25.4	21.4	10.0	14.0	0.000344	0.000481	61.8	222.5	88.2
11	150.5	541.7	35.3	25.1	21.2	10.2	14.1	0.000346	0.000481	60.9	219.3	89.6
12	147.4	530.6	35.3	25.4	21.6	9.9	13.7	0.000351	0.000485	61.8	222.5	85.6
13	148.3	533.8	35.2	25.5	21.6	9.7	13.6	0.000340	0.000478	62.0	223.1	86.3
14	149.5	538.2	35.1	25.2	21.0	9.9	14.1	0.000342	0.000486	61.1	220.0	88.4
15	146.4	526.9	35.1	25.5	21.3	9.6	13.7	0.000345	0.000495	62.0	223.2	84.3
16	143.8	517.7	35.1	25.9	21.9	9.3	13.3	0.000345	0.000494	63.1	227.0	80.7
17	142.8	513.9	35.4	26.1	22.3	9.2	13.1	0.000350	0.000497	63.9	230.0	78.9
18	140.9	507.2	35.6	26.8	22.7	8.8	12.9	0.000343	0.000500	65.7	236.4	75.2
19	139.3	501.5	35.7	27.2	22.9	8.5	12.8	0.000337	0.000508	67.0	241.3	72.3
20	135.5	487.7	36.2	28.0	23.8	8.1	12.3	0.000342	0.000518	69.5	250.2	66.0
21	131.4	473.2	36.6	29.0	25.0	7.6	11.7	0.000341	0.000521	72.4	260.5	59.1
22	127.9	460.5	36.4	29.1	25.5	7.3	10.9	0.000343	0.000513	72.7	261.7	55.2
23	119.7	431.0	35.7	29.2	26.1	6.4	9.5	0.000346	0.000513	73.0	262.9	46.7
	<b>133.9</b>	<b>36.4</b>	<b>28.2</b>	<b>24.6</b>	<b>70.1</b>							

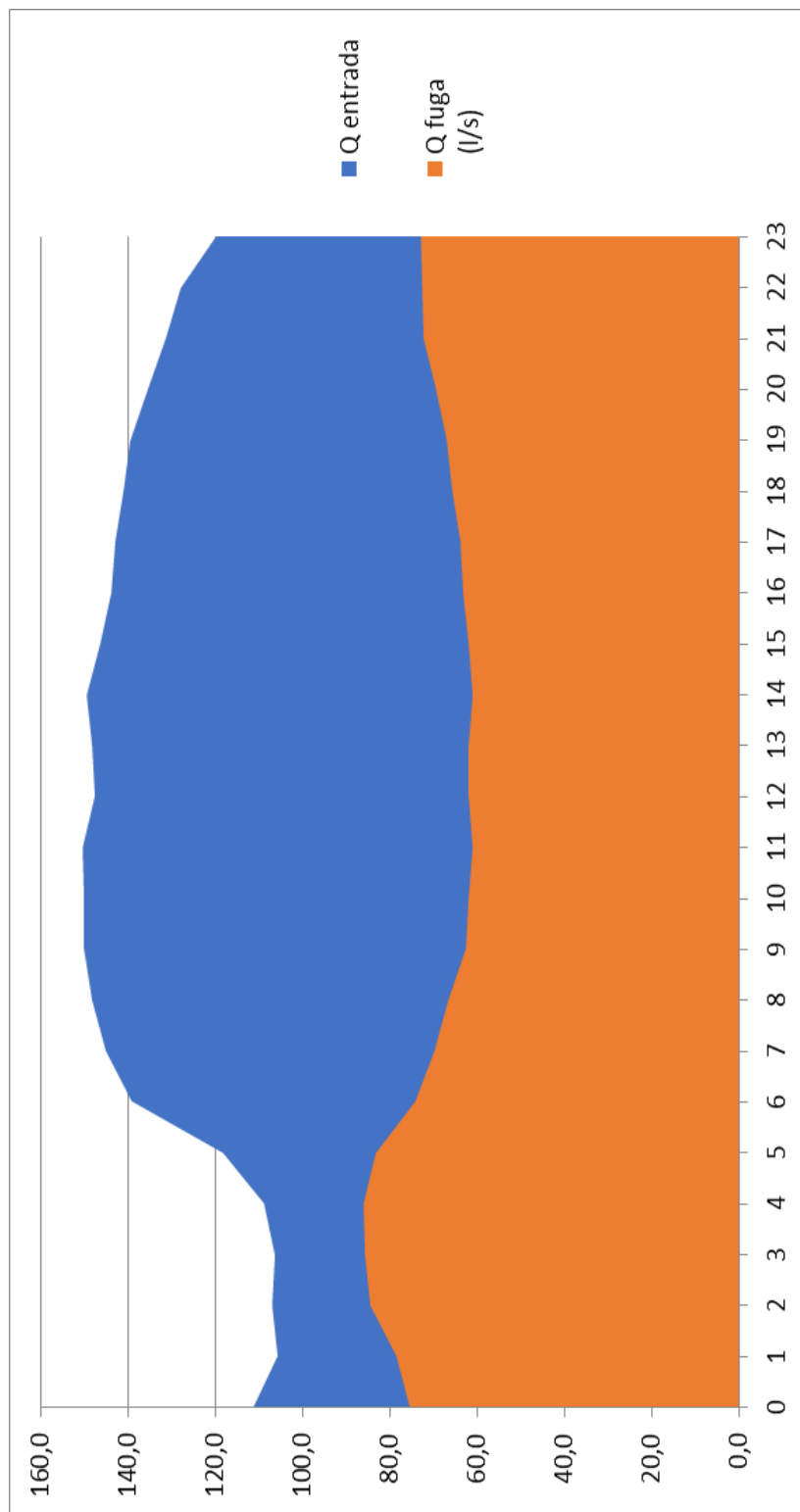
Q mín

Q máx

Q consumo promedio estimado = 63.7 l/s  
( 0.5% error en estimación de consumo promedio )

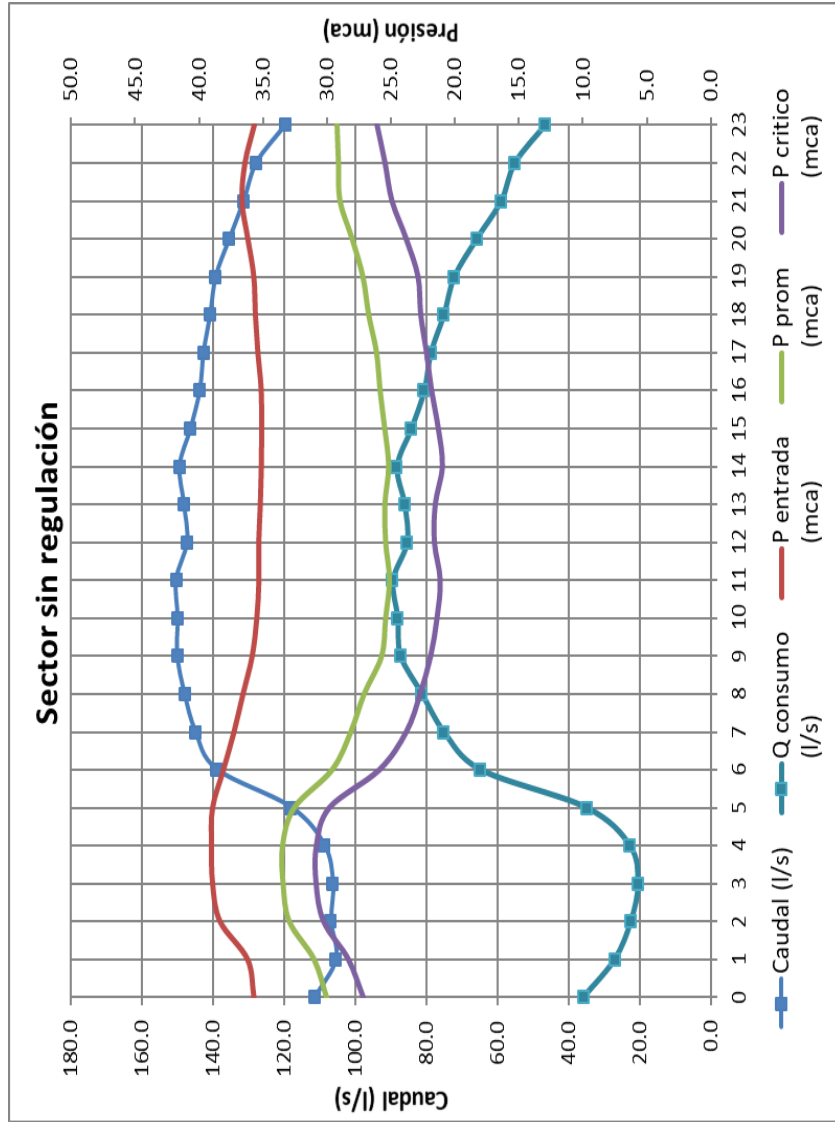
Fuente: Autor.

**Gráfico D:** Gráfica del comportamiento hidráulico del sector



**Fuente:** Autor.

**Grafico E:** Comparación de resultados referente al estado



**Fuente:** Autor.

#### **4.5 GESTIÓN DE PRESIONES POR REGULACIÓN FIJA**

Teniendo como referencia el comportamiento de la red, con su variación de presiones a lo largo de tiempo, los caudales de fugas y consumos, se procederá a la aplicación de una de las metodologías descritas, con base en la gestión de presiones para la reducción de caudales de fugas.

Recordemos que, un sector con regulación fija busca generar la presión crítica o mínima de servicio disponible para el sistema, en el momento donde el caudal de ingreso es máximo. Este objetivo se puede lograr mediante estimaciones, con las cuales se podrá tener la máxima presión fija de ingreso para los fines mencionados.

Es necesario mencionar que la presión mínima de servicio, para este caso tiene un valor de 15 mca, cifra determinada por el mismo abastecimiento.

A continuación, se muestran los resultados de acuerdo a la metodología propuesta. Se mostrará la primera estimación, con un caudal de entrada de 30 metros de columna de agua (mca), seguido de la estimación definitiva y su respectiva grafica comparativa.

**Tabla CE10:** Primera estimación de la presión de entrada.

Primera estimación						
Hora	P salida VRP (mca)	P prom (mca)	P critico (mca)	Q fuga (l/s)	Q fuga (m3/h)	Q entrada (l/s)
0	30	24.4	21.5	58.7	211.3	94.7
1	30	24.8	22.2	60.1	216.3	87.2
2	30	24.6	22.0	59.4	213.9	82.0
3	30	24.5	22.0	59.1	212.8	79.7
4	30	24.5	21.9	59.0	212.3	81.8
5	30	23.6	20.9	56.6	203.7	91.6
6	30	21.5	17.9	50.6	182.1	115.5
7	30	20.9	16.6	48.8	175.8	124.1
8	30	20.6	16.2	47.9	172.4	129.3
9	30	19.9	16.1	46.1	166.0	133.5
10	30	20.0	16.0	46.3	166.5	134.5
11	30	19.8	15.9	45.9	165.1	135.4
12	30	20.1	16.3	46.7	168.0	132.3
13	30	20.3	16.4	47.2	169.8	133.5
14	30	20.1	15.9	46.6	167.8	135.0
15	30	20.4	16.3	47.5	171.1	131.9
16	30	20.8	16.8	48.4	174.3	129.2
17	30	20.8	16.9	48.5	174.5	127.3
18	30	21.2	17.1	49.6	178.7	124.8
19	30	21.5	17.2	50.6	182.0	122.8
20	30	21.9	17.7	51.6	185.7	117.6
21	30	22.4	18.3	53.0	190.8	112.1
22	30	22.7	19.1	54.0	194.4	109.2
23	30	23.6	20.5	56.4	203.1	103.1

**Fuente:** Autor

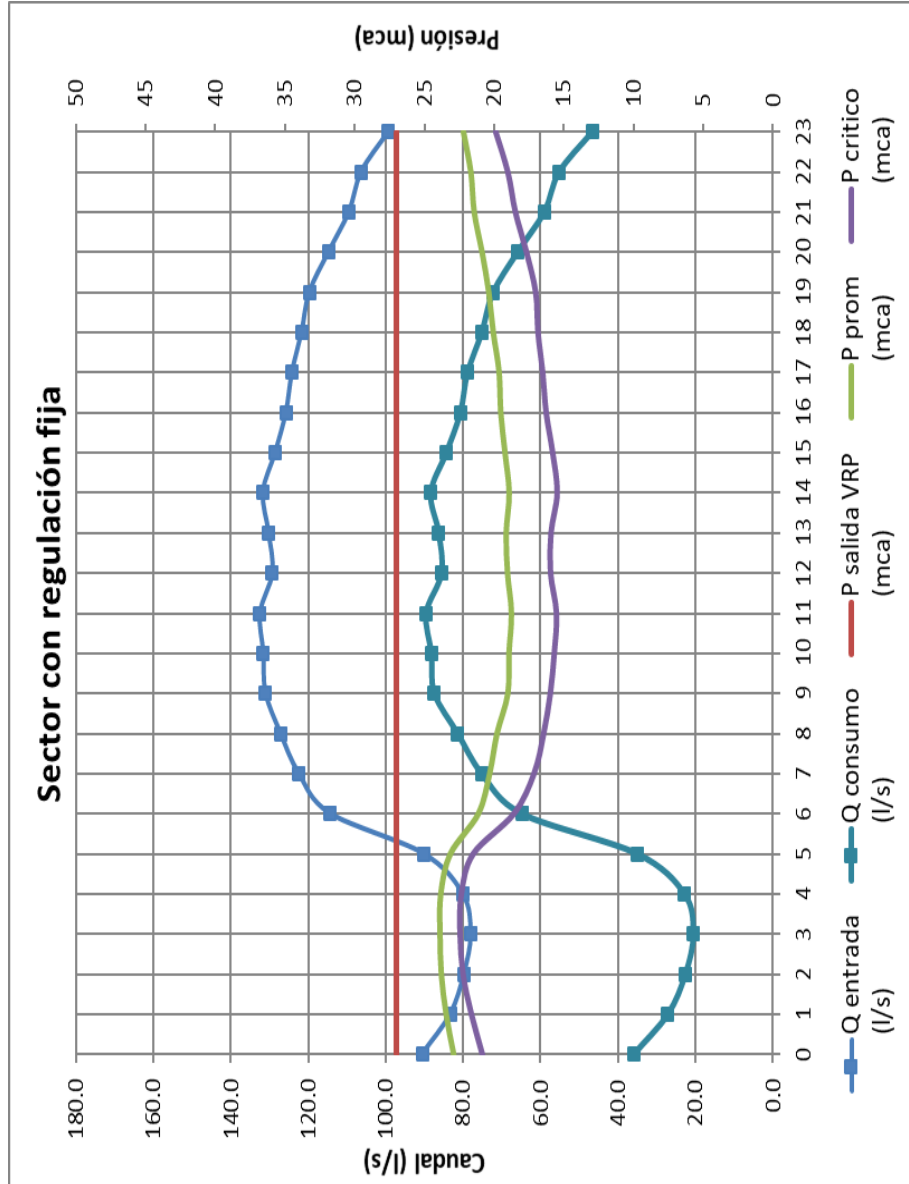
**Tabla CE11: Cálculo definitivo de presión fija de ingreso y parámetros de comportamiento de red**

Estimación definitiva											
Q entrada (l/s)	$\Delta P$ prom (mca)	$\Delta P$ crítico (mca)	P salida VRP (mca)	P prom (mca)	P crítico (mca)	Q fuga (l/s)	Q fuga (m <sup>3</sup> /h)	Q entrada (l/s)	Q recuperado (l/s)	Q recuperado (m <sup>3</sup> /h)	
94.7	4.1	6.1	27	22.9	20.9	54.6	196.5	90.6	20.9	75.3	
87.2	3.5	5.3	27	23.5	21.7	56.2	202.1	83.3	22.3	80.3	
82.0	3.2	4.7	27	23.8	22.3	57.2	205.8	79.8	27.2	97.9	
79.7	3.1	4.5	27	23.9	22.5	57.4	206.7	78.0	28.4	102.3	
81.8	3.1	4.6	27	23.9	22.4	57.3	206.2	80.1	28.7	103.3	
91.6	3.8	5.5	27	23.2	21.5	55.3	199.0	90.3	27.9	100.4	
115.5	5.8	8.4	27	21.2	18.6	49.6	178.4	114.4	24.6	88.6	
124.1	6.7	9.8	27	20.3	17.2	47.3	170.2	122.5	22.5	81.1	
129.3	7.2	10.5	27	19.8	16.5	45.8	164.9	127.2	20.9	75.3	
133.5	8.0	11.0	27	19.0	16.0	43.6	157.1	131.1	19.1	68.7	
134.5	8.1	11.3	27	18.9	15.7	43.4	156.3	131.6	18.4	66.2	
135.4	8.2	11.4	27	18.8	15.6	42.9	154.5	132.5	18.0	64.8	
132.3	8.0	11.0	27	19.0	16.0	43.7	157.3	129.3	18.1	65.2	
133.5	7.9	11.0	27	19.1	16.0	44.0	158.2	130.3	18.0	64.8	
135.0	8.1	11.5	27	18.9	15.5	43.4	156.1	131.7	17.8	63.9	
131.9	7.8	11.2	27	19.2	15.8	44.2	159.1	128.5	17.8	64.1	
129.2	7.5	10.7	27	19.5	16.3	45.0	162.2	125.8	18.0	64.9	
127.3	7.3	10.4	27	19.7	16.6	45.4	163.3	124.2	18.5	66.7	
124.8	6.9	10.1	27	20.1	16.9	46.5	167.5	121.8	19.1	68.9	
122.8	6.6	9.9	27	20.4	17.1	47.4	170.8	119.7	19.6	70.5	
117.6	6.1	9.3	27	20.9	17.7	48.8	175.6	114.8	20.7	74.6	
112.1	5.5	8.5	27	21.5	18.5	50.4	181.5	109.5	22.0	79.0	
109.2	5.3	7.9	27	21.7	19.1	51.1	183.9	106.3	21.6	77.8	
103.1	4.8	7.1	27	22.2	19.9	52.6	189.3	99.3	20.4	73.6	

**Fuente: Autor**



**Gráfico F:** Comparación entre los diferentes parámetros



**Fuente:** Autor

#### 4.6 GESTIÓN DE PRESIONES POR REGULACIÓN ACTIVA

Este segundo método aplica un proceso personalizado al momento de analizar el comportamiento de la red para cada hora del día. Es decir, que la presión regulada en la entrada de la red ya no será fija, esta tendrá variaciones que permite llegar a la presión mínima de servicio. Con dicho procedimiento habrá una mejor manipulación de los caudales de fugas, reduciendo de manera general las presiones de todos los puntos de la red.

A continuación, se presentan los resultados de igual forma que la metodología anterior.

**Tabla CE12:** Primera estimación de variación de presiones de entrada

Primera estimación						
Hora	P salida VRP (mca)	P prom (mca)	P critico (mca)	Q fuga (l/s)	Q fuga (m3/h)	Q entrada (l/s)
0	24	18.4	15.5	41.8	150.5	77.8
1	23.5	18.3	15.7	41.7	150.3	68.9
2	23.5	18.1	15.5	41.1	148.0	63.7
3	23.5	18.0	15.5	40.8	147.0	61.4
4	23.5	18.0	15.4	40.7	146.6	63.5
5	24.5	18.1	15.4	41.2	148.2	76.2
6	27.5	19.0	15.4	43.6	157.0	108.5
7	29	19.9	15.6	46.0	165.7	121.3
8	29.5	20.1	15.7	46.5	167.4	127.9
9	29.5	19.4	15.6	44.7	161.0	132.2
10	29.5	19.5	15.5	44.9	161.5	133.1
11	29.5	19.3	15.4	44.5	160.1	134.0
12	29	19.1	15.3	43.9	158.1	129.5
13	29	19.3	15.4	44.4	159.9	130.7
14	29.5	19.6	15.4	45.2	162.8	133.6
15	29	19.4	15.3	44.8	161.1	129.1
16	28.5	19.3	15.3	44.3	159.3	125.0
17	28.5	19.3	15.4	44.3	159.4	123.2
18	28	19.2	15.1	44.1	158.6	119.3
19	28	19.5	15.2	45.0	161.9	117.3
20	27.5	19.4	15.2	44.6	160.6	110.6
21	27	19.4	15.3	44.6	160.6	103.7
22	26	18.7	15.1	42.8	154.1	98.0
23	25	18.6	15.5	42.4	152.6	89.1

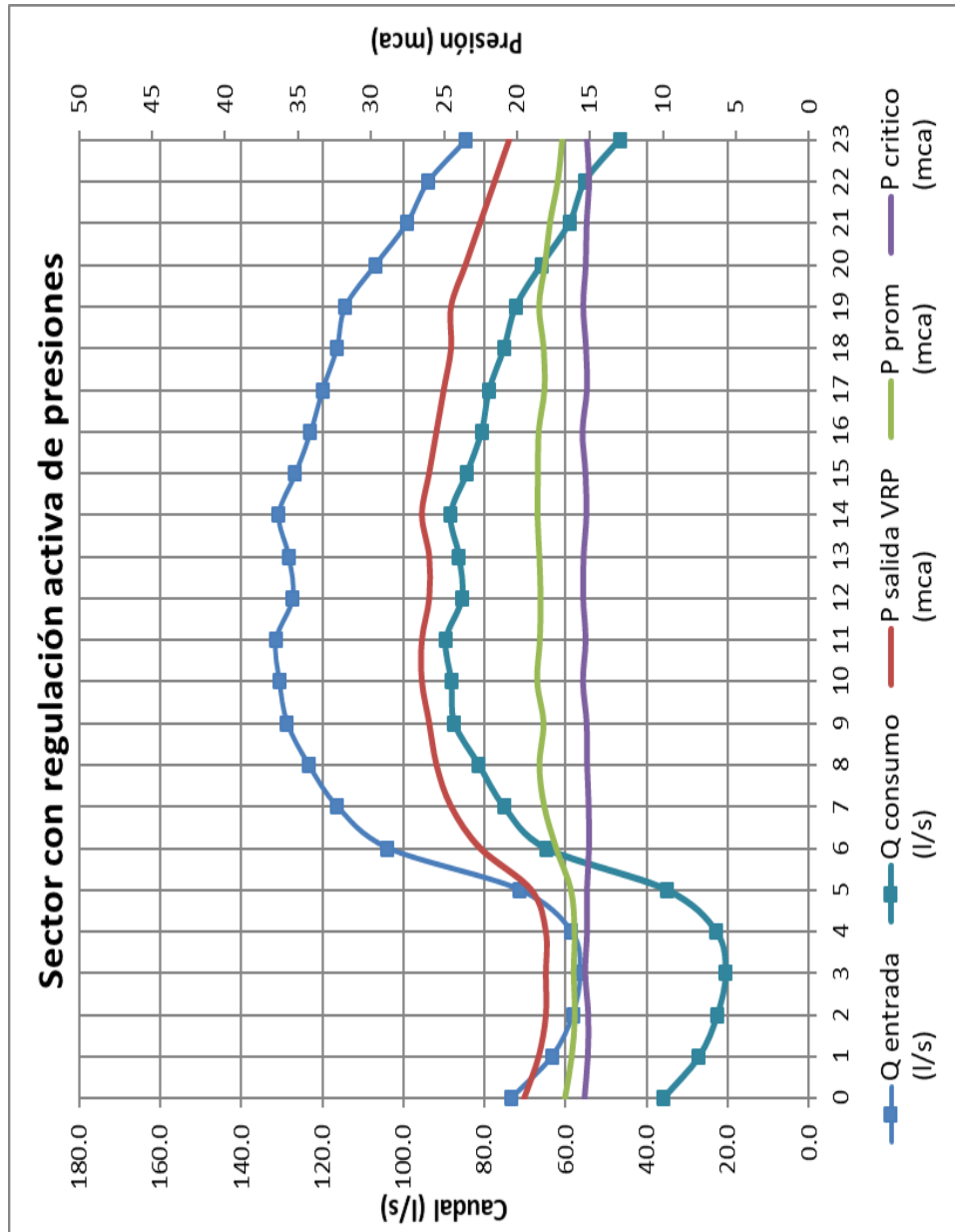
Fuente: Autor

**Tabla CE13: Cálculo definitivo de presiones variables y parámetros de comportamiento de red**

Estimación definitiva										
Q entrada (l/s)	$\Delta P$ prom (mca)	$\Delta P$ crítico (mca)	P salida VRP (mca)	P prom (mca)	P crítico (mca)	Q fuga (l/s)	Q fuga (m <sup>3</sup> /h)	Q entrada (l/s)	Q recuperado (l/s)	Q recuperado (m <sup>3</sup> /h)
77.8	2.7	4.1	19.5	16.8	15.4	37.5		73.4	38.0	136.9
68.9	2.2	3.3	18.5	16.3	15.2	36.3		63.4	42.2	151.9
63.7	1.9	2.9	18	16.1	15.1	35.7		58.3	48.7	175.3
61.4	1.8	2.7	18	16.2	15.3	35.9		56.5	49.9	179.8
63.5	1.9	2.8	18	16.1	15.2	35.7		58.6	50.2	180.8
76.2	2.6	3.8	19	16.4	15.2	36.4		71.4	46.8	168.4
108.5	5.2	7.4	22.5	17.3	15.1	39.0		103.9	35.1	126.5
121.3	6.4	9.4	24.5	18.1	15.1	41.2		116.4	28.6	103.0
127.9	7.0	10.3	25.5	18.5	15.2	42.1		123.5	24.6	88.7
132.2	7.8	10.8	26	18.2	15.2	41.3		128.8	21.4	76.9
133.1	7.9	11.0	26.5	18.6	15.5	42.5		130.7	19.3	69.5
134.0	8.1	11.2	26.5	18.4	15.3	42.0		131.6	18.9	68.1
129.5	7.6	10.5	26	18.4	15.5	41.9		127.4	20.0	71.8
130.7	7.5	10.6	26	18.5	15.4	42.1		128.4	19.9	71.5
133.6	7.9	11.2	26.5	18.6	15.3	42.4		130.8	18.7	67.2
129.1	7.4	10.7	26	18.6	15.3	42.3		126.7	19.7	70.8
125.0	7.0	10.0	25.5	18.5	15.5	42.2		123.0	20.8	75.0
123.2	6.9	9.8	25	18.1	15.2	41.2		120.0	22.7	81.8
119.3	6.3	9.2	24.5	18.2	15.3	41.3		116.5	24.4	87.7
117.3	6.0	9.1	24.5	18.5	15.4	42.2		114.4	24.9	89.5
110.6	5.4	8.2	23.5	18.1	15.3	41.1		107.0	28.4	102.4
103.7	4.7	7.3	22.5	17.8	15.2	40.2		99.2	32.2	115.9
98.0	4.3	6.4	21.5	17.2	15.1	38.7		94.0	34.0	122.3
89.1	3.6	5.3	20.5	16.9	15.2	38.0		84.7	35.1	126.2

**Fuente: Autor**

**Gráfico G:** Comparación entre los diferentes parámetros



**Fuente:** Autor

## 5. CAPÍTULO 5: COMPARATIVA DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Para comprender de mejor manera los resultados obtenidos, se han desarrollado tablas resumen para una certera evaluación y conocimiento de los volúmenes recuperados de agua, bajo las distintas formas de gestión de presiones propuestas en este trabajo de tesis.

### Sector sin regulación

<b>% Fugas</b>	<b>56.2%</b>
Q entrada prom	133.9 l/s
Q entrada máx	150.5 l/s
Q entrada mín	105.6 l/s
Qmax/Qprom	1.124
Qmin/Qprom	0.789
Volumen perdido	2,212,194 m <sup>3</sup> /año
Costo estimado por m <sup>3</sup>	\$0.05
Costo pérdidas físicas	\$ 110,610 /año

### Sector con regulación fija

<b>% Fugas</b>	<b>47.9%</b>
Q entrada prom	112.6 l/s
Q entrada máx	132.5 l/s
Q entrada mín	78.0 l/s
Qmax/Qprom	1.176
Qmin/Qprom	0.693
Volumen perdido	1,520,130 m <sup>3</sup> /año
Costo pérdidas físicas	\$ 76,007 /año
Q prom recuperado	21.3 l/s
Volumen recuperado	670,951 m <sup>3</sup> /año
% Volumen recuperado	30.3%

### Sector con regulación activa

<b>% Fugas</b>	<b>43.4%</b>
Q entrada prom	103.7 l/s
Q entrada máx	131.6 l/s
Q entrada mín	56.5 l/s
Qmax/Qprom	1.269
Qmin/Qprom	0.545
Volumen perdido	1,194,425 m <sup>3</sup> /año
Costo pérdidas físicas	\$ 59,721 /año
Q prom recuperado	30.2 l/s
Volumen recuperado	951,965 m <sup>3</sup> /año
% Volumen recuperado	43.0%

- ▲ Al analizar los resultados del estado actual de la red, del 100% de suministro de agua, el 56.2% es representado por fugas existentes en la red, generando un volumen de agua perdido de más de dos millones de metros cúbicos anuales. El sistema de agua potable en estudio se encuentra en una situación crítica, habiendo más agua perdida de la que se consume.
  
- ▲ Por otro lado, si se realiza una gestión de presiones por regulación fija, el porcentaje de fugas tiende a disminuir en un 47.9%, recuperando el volumen perdido, bajo condiciones iniciales, en un 30.3%.
  
- ▲ Finalmente, aplicando una regulación activa de presiones, el porcentaje de fugas llega cerca del 40% disminuyendo aún más las pérdidas de agua, y recuperando el volumen perdido, bajo condiciones iniciales, en un 43%.

Estos tres análisis demuestran que, la regulación activa de presiones es la más efectiva, si se trata de recuperar mayores volúmenes de agua, por los porcentajes de ahorro que presenta. Pero al ser una gestión personalizada, existirá una variación continua de la presión de entrada en cada hora del día, generando ciertos costos adicionales, tanto operativos como de mantenimiento, por el tipo de mecanismo que pueda presentar la válvula reductora de presión (VRP), en comparación con el dispositivo utilizado para ejecutar una regulación de presiones fija, que presenta una funcionalidad más simple.

## REFERENCIAS

Agencia de Regulación y Control del Agua. (2015). *Indicadores Técnicos Priorizados ARCA*. Quito, Ecuador: Secretaría del Agua.

Comisión Nacional del Agua. (2009). *Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable*. Coyoacán, Mexico D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales .

Escobar, J. J. (Julio 2011). Método de los caudales mínimos nocturnos. En E. J. José, *Método de los caudales mínimos nocturnos: Revisión de sus bases científicas, evaluación de errores potenciales y propuestas para su mejora*. Valencia - España.

George, T. J. (2008). *Water loss control manual*. New York, U.S: McGraw-Hill.

GIZ & VAG. (2011). Guía para la reducción de las pérdidas de agua. En G. & VAG, *Guía para la reducción de las pérdidas de agua*. Eschborn, Alemania: Rohland&more, Offenbach/Alemania.

McKenzie. (2011). *Pressure Management Program (PRESMAC)*. South Africa: South African Water Research Commission.

Mckenzie. (Junio 1999). *South African Night Flow Analysis Model Version 1.5*. South Africa: South African Water Research Commission.

Molina Arce, S. X. (2009). *Metodología para reducción de pérdidas técnicas en el sistema de distribución de AA.PP. del Suburbio Oeste de la ciudad de Guayaquil*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Molina Arce, S. X. (2014). *Metodología para la calibración preliminar de modelos de redes de distribución de agua mediante la utilización conjunta de demandas y consumos dependientes de la presión*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

Ranhill Utilities Berhad & The United States Agency for International Development. (Julio 2008). *The Manager's Non-Revenue Water Handbook*. Bangkok, Thailand: USAID.

Richard, L. A. (2010). *Water Loss Guidelines*. New Zeland: Water New Zealand .

United States Environmental Protection Agency EPA. (2010). *Control and mitigation of drinking water losses in distribution systems*. U.S.: Office of Water.

Water loss control committee review . (Mayo 2007 ). *Water Audits and Loss Control Programs* . Philadelphia, U.S.: AWWA M36 .





## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Haro Tamayo, Eduardo Alfredo**, con C.C: # **1600665390** autor del trabajo de titulación: **Propuesta metodológica simplificada de gestión de presiones para la recuperación de pérdidas reales en redes de distribución de agua potable**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 16 de marzo de 2018

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Haro Tamayo, Eduardo Alfredo**

C.C: **1600665390**



## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	Propuesta metodológica simplificada de gestión de presiones para la recuperación de pérdidas reales en redes de distribución de agua potable		
<b>AUTOR(ES)</b>	Haro Tamayo, Eduardo Alfredo		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Molina Arce, Stephenson Xavier		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Ingeniería		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Civil		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Civil		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	16 de marzo de 2018	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	131
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Hidráulica, Matemáticas, Estadística		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	metodología, abastecimiento, fugas, caudal, presión, comportamiento, regulación		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>Este trabajo de título consiste en la implementación de una metodología simplificada de gestión de presiones, para la reducción de volúmenes de fugas en sistemas de abastecimiento de agua potable. Los pocos datos empleados para su desarrollo, fueron medidos dentro el sector en estudio, representado por la ciudadela “La Atarazana” perteneciente a la zona urbana de la ciudad de Guayaquil.</p> <p>Las mediciones realizadas se ejecutaron en un período de siete días consecutivos, los cuales entraron en un proceso de depuración, dando como consiguiente una tabla representativa de 24 horas.</p> <p>Gracias a la aplicabilidad de la ecuación FAVAD, se consiguió determinar el comportamiento hidráulico real de la red, con un nivel de proximidad presión-caudal bastante acertado, al momento de ejecutar regulaciones de presión fija y activa en la entrada del sistema de abastecimiento.</p>			

Una vez obtenidos los resultados de los análisis, se determinaron ciertas diferencias y conclusiones importantes entre estos tipos de regulación en mención.

<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593 999 764465	<b>E-mail:</b> <b>eduhar713@gmail.com</b>
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>Nombre: Clara Glas Cevallos</b>	
	<b>Teléfono: +593-4 -2206956</b>	
	<b>E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec</b>	
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>		
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>		
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>		
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>		