



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**Comparación de Metodologías para la Distribución Espacial del Emisor
Global de Fugas en Modelos Hidráulicos de Redes de Distribución de
Agua Potable.**

AUTOR:

Arévalo Castro, Christian Xavier

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de

INGENIERO CIVIL

TUTOR:

Ing. Camacho Monar, Mélida Alexandra

Guayaquil, Ecuador

16 de marzo de 2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Arévalo Castro, Christian Xavier**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTORA

f. _____

Ing. Camacho Monar, Mélida Alexandra

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther

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



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Arévalo Castro, Christian Xavier**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Comparación de metodologías para la distribución espacial del emisor global de fugas en modelos hidráulicos de 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 en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. 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 días del mes de marzo del año 2018

EL AUTOR

f. _____

Arévalo Castro, Christian Xavier



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **ARÉVALO CASTRO, CHRISTIAN XAVIER**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Comparación de metodologías para la distribución espacial del emisor global de fugas en modelos hidráulicos de redes de distribución de agua potable**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 16 días del mes de marzo de 2018

EL AUTOR

f. _____

Arévalo Castro, Christian Xavier



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

REPORTE URKUND



Urkund Analysis Result

Analysed Document: TRABAJO DE TITULO DE CHRISTIAN AREVALO.docx (D35882169)
Submitted: 2/24/2018 1:33:00 AM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 2 %

Sources included in the report:

TESIS VRGG.pdf (D16213259)
ALVARO CASTILLO 13 MARZO 2017 URKUND.docx (D26349791)
20180129 Andrade Juan_Escobar Gilson.pdf (D35128386)
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/59798/CONEJOS%20-%20DESARROLLO%20E%20IMPLEMENTACI%C3%93N%20DE%20UN%20MODELO%20REALISTA%20DE%20DEMANDAS%20Y%20FUGAS%20DEPENDIENTES%20DE%20L....pdf?sequence=1>

Instances where selected sources appear:

13

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por todo el apoyo que me supieron brindar y de igual manera a las autoridades y amigos que influyeron en el éxito de este trabajo.

Christian Xavier Arévalo Castro

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, a mi esposa, a mi hijo y a todas las personas que contribuyeron para la realización del presente trabajo.

Christian Xavier Arévalo Castro



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

f. _____

ING. MÉLIDA ALEXANDRA CAMACHO MONAR

TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

ING. STEFANY ESTHER ALCÍVAR BASTIDAS

DIRECTORA DE CARRERA

f. _____

ING. CLARA CATALINA GLAS CEVALLOS

DELEGADA DE COORDINACIÓN DE ÁREA

f. _____

ING. STEPHENSON XAVIER MOLINA ARCE

OPONENTE



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CALIFICACION

f. _____

ING. MÉLIDA ALEXANDRA CAMACHO MONAR

TUTOR

f. _____

ING. STEFANY ESTHER ALCÍVAR BASTIDAS

DIRECTORA DE CARRERA

f. _____

ING. STEPHENSON XAVIER MOLINA ARCE

OPONENTE

f. _____

ING. GLAS CEVALLOS, CLARA CATALINA

DELEGADA DE COORDINACIÓN DE ÁREA

INDICE GENERAL

Introducción	2
Objetivos	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
Capítulo 1	4
MARCO TEORICO	4
1.1 Redes de distribución de Agua Potable	4
1.2 Modelos hidráulicos	5
1.3 Construcción de un modelo hidráulico	6
1.3.1 Asignación de nodos.....	6
1.3.2 Asignación de fugas.....	7
1.4 Simulación del comportamiento de los orificios de fuga	9
1.5 Emisor global de fugas	15
1.6 Exponente de fugas	17
1.7 Calibración de modelos hidráulicos	18
1.8 Técnicas avanzadas de calibración	20
1.9 Técnicas analíticas de calibración	21
1.10 Técnicas implícitas de calibración.....	21
1.11 Parámetros de calibración	22
1.12 Criterios de calibración	23
1.13 Procedimiento general para la calibración de modelos hidráulicos.....	26
1.14 Gestión de pérdidas de agua	29
1.15 Balance hídrico	30
Capítulo 2	31
METODOLOGÍA PROPUESTA	31
2.1 Carga del Modelo Hidráulico.....	32
2.2 Ajuste de los parámetros de calibración del modelo	34
2.3 Calibración del emisor global de fugas	37
2.3.1 Distribución equitativa.....	39
2.3.2 Distribución por número de conexiones.....	39
2.3.3 Distribución por demanda	39
2.4 Calibración del patrón de consumo de la demanda base	40

2.5 Calibración del emisor global de fugas después de su distribución espacial.....	41
2.6 Calibración de las pérdidas de carga en la red	43
2.7 Resumen del procedimiento de calibración	44
Capítulo 3	47
CASOS DE ESTUDIO	47
3.1 Información comercial de los sectores de estudio	49
3.2 Descripción general de los modelos hidráulicos construidos	51
3.3 Datos de calibración	54
3.4 Carga de los modelos hidráulicos	57
3.5 Aplicación de la metodología de calibración	59
3.5.1 Caso 1: distrito de medición N72-M132	59
3.5.2 Caso 2: distrito de medición N50-M31	73
Conclusiones	90
Bibliografía	93

Índice de tablas

Tabla 1: Casos de estudio	9
Tabla 2: Fórmulas de casos de estudio	10
Tabla 3: Balance hídrico estandarizado propuesto por la IWA	25
Tabla 4: Balance hídrico propuesto por la IWA.....	31
Tabla 5: Información de los sectores de estudio 1	48
Tabla 6: Información de los sectores de estudio 2.....	48
Tabla 7: Información comercial de los sectores de estudio 2	50
Tabla 8: Información descriptiva de los modelos hidráulicos	51
Tabla 9: Registro de caudal y presión por sector.....	54
Tabla 10: Volumen suministrado y cantidad de cuentas por distrito	58
Tabla 11: Simulación de distrito de medición equitativo N72-M132.....	59
Tabla 12: Simulación de distrito de medición por demanda N72-M132	60
Tabla 13: Simulación de distrito de medición por número de conexiones N72-M132.....	60
Tabla 14: Descripción del coeficiente de pérdidas del distrito N72-M132....	60
Tabla 15: Descripción de caudal de consumo nocturno del distrito N72-M132	61
Tabla 16: Ajuste de coeficiente de pérdidas en válvulas del distrito N72-M132	65
Tabla 17: Desviación entre los valores medidos y simulados de caudal método equitativo N50-M31	74
Tabla 18: Desviación entre los valores medidos y simulados de caudal-método por demanda N50-M31	74
Tabla 19: Desviación entre los valores medidos y simulados de caudal-método por número de conexiones N50-M31	75
Tabla 20: Descripción del coeficiente de pérdidas del distrito N50-M31	75
Tabla 21: Descripción de caudal de consumo nocturno del distrito N50-M31	77
Tabla 22: Ajuste de coeficiente de pérdidas en válvulas del distrito N50-M31	79
Tabla 23: Descripción de simulaciones del distrito N72-M132.....	90
Tabla 24: Descripción de simulaciones del distrito N50-M31.....	91

Índice de gráficos

Diagrama de flujo de la metodología de calibración, Gráfico tomado de (Molina, 2014)	46
Distrito N72-M132, Gráfico tomado de (Molina, 2014)	52
Distrito N50-M31, Gráfico tomado de (Molina, 2014)	53
Caudal y presión registrados en el punto de inyección del Distrito de Medición N72-M132, Gráfico tomado de (Molina, 2014)	55
Presión registrada en la red del Distrito de Medición N72-M132, Gráfico tomado de (Molina, 2014)	55
Caudal y presión registrados en el punto de inyección del Distrito de Medición N50-M31, Gráfico tomado de (Molina, 2014)	56
Presión registrada en la red del Distrito de Medición N50-M31, Gráfico tomado de (Molina, 2014)	56
Pasos para asignación de demanda base y consumos al modelo hidráulico en EPANET, Gráfico tomado de (Molina, 2014)	59
Distribución equitativa N72-M132	62
Distribución por demanda N72-M132	63
Distribución por número de conexiones N72-M132	63
Gráfico de correlación de caudal - Distribución equitativa N72-M132	66
Gráfico de correlación de presión - Distribución equitativa N72-M132	67
Gráfico de correlación de caudal – Distribución por demanda N72-M132 ...	68
Gráfico de correlación de presión - Distribución por demanda N72-M132 ...	69
Gráfico de correlación de caudal - Distribución por número de conexiones N72-M132	70
Gráfico de correlación de presión - Distribución por número de conexiones N72-M132	71
Variación de caudal - Distribución equitativa N72-M132	72
Variación de caudal - Distribución por demanda N72-M132	72
Variación de caudal - Distribución por número de conexiones N72-M132 ...	73
Variación entre los patrones de consumos - Distribución equitativa N50-M31	80
Variación entre los patrones de consumos -Distribución por demanda N50-M31	80
Variación entre los patrones de consumos - Distribución por número de conexiones N50-M31	81
Gráfico de correlación de caudal - Distribución equitativa por caudal N50-M31	82
Gráfico de correlación de presión Distribución equitativa N50-M31	83
Gráfico de correlación de caudal – Distribución por demanda N50-M31	84
Gráfico de correlación de presión – Distribución por demanda N50-M31	85
Gráfico de correlación de caudal - Distribución por número de conexiones N50-M31	86

Gráfico de correlación de presión - Distribución por número de conexiones N50-M31	87
Variación de caudal - Distribución equitativa N50-M31.....	88
Variación de caudal - Distribución por demanda N50-M31	88
Variación de caudal - distribución por número de conexiones N50-M31	89

Resumen

En el presente trabajo se ha abordado el tema de la calibración de modelos hidráulicos de redes de distribución de agua potable en el que se enfoca el proceso de repartición de fugas, tomando como punto de partida la metodología de calibración planteada por (Molina, 2014), agregando una variable, la misma que consiste en definir nuevos métodos de repartición debido a la dificultad del ya planteado.

Se modelarán dos casos de estudio, en los que se aplicara la metodología de calibración mencionada dentro de la cual se usaran las tres metodologías de repartición del emisor global de fugas las cuales son de manera equitativa, por número de conexiones y por demanda.

De esta manera se buscará comprobar cuál de estas metodologías es la más conveniente a utilizar dentro del proceso de calibración, teniendo en cuenta la rapidez de convergencia en la calibración y el número de variables a calcular. Definiendo de esta forma el método más rápido y sencillo de ejecutar.

Palabras claves: modelos hidráulicos, simulación, metodologías, calibración, emisor global de fugas.

Abstract

In the present work the subject of the calibration of hydraulic models of drinking water distribution networks has been approached in which the leakage distribution process is focused, taking as a starting point the calibration methodology proposed by (Molina, 2014), adding a variable, the same one that consists of defining new methods of distribution due to the difficulty of the already raised one.

Two case studies will be modeled, in which the aforementioned calibration methodology will be applied, within which three global leak emitter distribution methodologies will be used, which are equitable, by number of connections and by demand.

In this way we will try to verify which of these methodologies is the most convenient to use within the calibration process, taking into account the speed of convergence in the calibration and the number of variables to be calculated. Defining in this way the fastest and easiest method to execute.

Keywords: Hydraulic models, simulation, methodologies, calibration, global leakage emitter.

Introducción

Hoy en día el manejo del agua potable, en lo que a su infraestructura se refiere tiene muchas fallas, que no permiten brindar el mejor servicio al consumidor. Los sistemas de distribución de agua potable son de gran resultado indispensable para la población en general, por lo que se debe buscar en todo momento mejorar su eficiencia. El desarrollo de modelos hidráulicos para simular su funcionamiento permite tomar decisiones a la hora de efectuar cambios en la red y evaluar futuras mejoras.

En el capítulo 1 se definirá el marco teórico en el que se detallará lo que es un modelo hidráulico y todo aquello que se requiere para elaborarlo, de tal forma que esté listo para ser utilizado como una herramienta de gran utilidad, pero para ello se busca que estén correctamente calibrados.

En el capítulo 2 se hablará sobre la metodología planteada para la calibración del modelo, en el que se incluyen los 3 métodos a comparar los mismos que se usaran para la repartición del emisor global de fugas.

En el capítulo 3 se hablará sobre los casos de estudio, en los que se mostrarán los resultados obtenidos durante su simulación.

Al final se incluyen las conclusiones, que fueron obtenidas a partir de la simulación del modelo.

Objetivos

Objetivo general

Comparar las diferentes metodologías propuestas en la literatura técnica para ejecutar la distribución espacial de fugas (pérdidas físicas) en los modelos hidráulicos de redes de distribución de agua potable.

Objetivos específicos

- Representar espacialmente las fugas en la red de abastecimiento mediante las 3 metodologías planteadas
- Realizar una comparación entre las distintas metodologías identificando limitaciones y ventajas de cada una de ellas
- Elegir la metodología que resulte óptima en términos de implementación y proporcionar una adecuada precisión en la calibración del modelo.

Capítulo 1

MARCO TEORICO

1.1 Redes de distribución de Agua Potable

Se puede definir a una red de distribución de agua potable como el conjunto de instalaciones que una empresa de abastecimiento de agua potable posee para hacer llegar el servicio desde el punto de aducción y tratamiento hasta las acometidas de los clientes.

Comúnmente son infraestructuras enterradas, lo cual dificulta su inspección física reduciéndose a medición de presión del caudal y cumplimiento de parámetros de calidad, aunque sean insuficientes por la enorme extensión en un entorno urbano (Teixeira, 2006). Por ello se requiere la aplicación de modelos hidráulicos que se ajusten a los parámetros reales ya descritos para la comprensión del estado actual de dichas redes (Teixeira, 2006).

Según una de las investigaciones del Journal of Water Resources Planning and Management, un sistema de distribución de agua potable se compone de redes de transmisión formadas por tuberías de gran diámetro, el diseño de todo este sistema dependerá de la topografía y la ubicación de las calles de las distintas zonas que atravesará hasta llegar a los hogares(Matthew D. Jolly, 2013)

Por ello, se han identificado tres tipos de configuración de sistemas de distribución de acuerdo a (Matthew D. Jolly, 2013):

1. Sistema ramificado: Su configuración es axial y comunica las tuberías de mayor diámetro a las de menor diámetro para el transporte hacia el consumidor, su aplicación es muy común en las zonas rurales.
2. Sistema en rejilla: Son redes de distribución más pequeñas y se comunican con las redes principales únicamente a través de una central de transmisión.
3. Sistema en bucle: Conocido por su aplicación en las grandes urbes y áreas suburbanas, su configuración es similar al sistema en rejilla, con la diferencia de que las redes pequeñas se pueden comunicar con las principales tuberías a través de bucles.

1.2 Modelos hidráulicos

Los modelos hidráulicos de un Sistema de Distribución de Agua Potable (SDAP) son una herramienta necesaria para el personal de diseño, administración, análisis y mantenimiento del SDAP (Kapelán, 2002). La configuración elemental de un SDAP viene dada por elementos tales como nodos, depósitos, tanques, enlaces que hacen el papel de tuberías, bombas y válvulas (Walski, Chase, Savic, Grayman, & Beckwith, 2003).

Sin embargo, aún quedan dificultades por resolverse como la modelación de las demandas y pérdidas de carga en cada nodo debido a que no hay acceso a una completa información acerca de cómo la presión influye en ellas (Obradovic, Modelling of demand and losses in real-life water distribution systems, 2000). Incluso, los softwares son configurados solamente para la simulación de la demanda sin contemplar la relación entre los flujos y las variaciones de presión de cada nodo (Burrows, 2008).

Por ello, un modelo hidráulico es una aproximación matemática del comportamiento real del SDAP, bajo las condiciones operacionales especificadas según el flujo del agua en los enlaces: constante, cuasi constante, comprensible o incomprensible (Kapelán, 2002). Por ende, los modelos hidráulicos se analizan mediante modelos rígidos, que integran las ecuaciones del flujo del agua considerando su inercia; o modelos cuasi-estáticos, que divide el estudio en intervalos de demanda constante y que se enlazan mediante ecuaciones dinámicas.

Ésta técnica computarizada ha permitido a la ingeniería hidráulica controlar los sistemas de distribución de agua potable hasta un nivel macro, cuyos resultados dependerán de su calibración y los datos de campo obtenidos.(Preis, Whittle, Ostfeld, & Perelman, 2011). La modelación hidráulica puede tener como objetivo la realización de un plan maestro o diversos análisis operacionales tales como el dimensionamiento de tuberías, análisis de presiones del sistema, análisis de capacidad de almacenamiento, análisis de flujo de bombeo y programación de bombeo (Speight & Khanal, 2009).

La modelación hidráulica permite simular el comportamiento del SDAP en casos críticos tales como incendios en algunos de los nodos o demandas de

hora pico(Walski, Chase, Savic, Grayman, & Beckwith, 2003). Sin embargo, cuando se necesita comprender los efectos de los cambios que se efectúan en el SDAP, como el incremento o disminución del consumo, el rendimiento de válvulas y bombas, y llenados de tanque; se requiere construir una modelación más detallada(Walski, Chase, Savic, Grayman, & Beckwith, 2003).

1.3 Construcción de un modelo hidráulico

1.3.1 Asignación de nodos

Las ecuaciones aplicadas en las modelaciones suponen que el agua es extraída a través de los nodos que se distribuyen a lo largo de las tuberías, el consumo de agua se asigna en esos nodos distribuyendo la demanda dentro del SDAP (Gonelas, 2014). Sin las herramientas adecuadas, la asignación de demandas se vuelve una tarea difícil, pero gracias al Sistema de Información Geográfica (SIG) existe la posibilidad de conectarse con una base de datos externa que contemple los consumos (Carbonell & Martínez, s.f.).

La ubicación exacta de la demanda independiente de la presión mediante el SIG permite analizar detalladamente el SDAP, incrementando la complejidad del modelo hidráulico y generando la necesidad de simplificar dos o más demandas en un nodo (Gonelas, 2014). Sin embargo, se puede realizar asignaciones automáticas a través de un gestor de hipótesis de carga que reparte los consumos mediante principales consumidores, consumos por calle y sectores de consumo sobre ciertos nodos elegidos bajo un criterio (Carbonell & Martínez, s.f.). Otra técnica para la simplificación de datos aplicados para SDAP más complejas se la conoce como esqueletización, que omite enlaces y sectoriza las demandas en un nodo, es decir, los efectos se contabilizan en una parte del SDAP (Walski, Chase, Savic, Grayman, & Beckwith, 2003).

En caso de no poder usar la herramienta SIG se pueden usar otros métodos para la asignación de los nodos como: El balance hídrico conocido como TOP-DOWN parte de los registros de los caudales inyectados a la red de distribución y el volumen según tipos de uso (grandes consumidores) para asignar la demanda independiente de la presión a los nodos del modelo.

El método Botton – Up, realiza la repartición del consumo basándose en el registro del volumen facturado para luego poder repartirlo al resto de nodos a través de un criterio zonal.

1.3.2 Asignación de fugas

Las fugas forman parte de la demanda, con la diferencia que esta estará cuantificada en función de la presión que llegue a cada nodo.

Una demanda puede figurar como orificio funcional mientras que una fuga se consideraría parte de un SDAP, todo depende de la escala temporal/espacial del análisis y la exactitud que se requiera en los resultados de un modelado (Colombo, Karney, & ASCE, Leaks and Water Use Representation in Water Distribution System Models: Finding a Working Equivalence, 2009). Sin embargo, para una modelación más precisa con la finalidad de reducir las fugas, éste debe ser capaz de contabilizar la demanda de presión y el flujo de fugas a nivel de nodo en un periodo extendido (Giustolisi, Savic, & Kapelan, Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks, 2008). La dificultad de dicha modelación es que la información acerca de la demanda de presión se basa en una situación regular, mientras que las pérdidas se asignaban de forma arbitraria para incrementar la demanda (Obradovic, Modelling of demand and losses in real-life water distribution systems, 2000). Bajo la ecuación de Torricelli, según Van Zyl y Clayton (2007) la fuga de una tubería es equivalente a la salida del fluido de un tanque, por lo que hay que considerar la reducción de área del orificio de fuga en comparación con la salida del agua del tanque y para ello incluye el coeficiente de descarga:

$$Q = C_d A (2gH)^{0.5} \quad (1)$$

Dónde:

- Q: Caudal de fuga
- C_d: Coeficiente de descarga
- A: Área del orificio de fuga
- g: Aceleración de la gravedad
- H: Pérdida de carga

Sin embargo, según May (2000), la relación entre la velocidad de flujo y la presión influye en las variaciones del área del orificio de fuga debido a la

presión que se manifiesta en base a una cierta circunstancia o anomalía, ya sea el material de la tubería, el cambio de sección en el recorrido de la red y otros casos más. Entonces la relación se expresa de la siguiente manera:

$$Q = KP^N \quad (2)$$

Dónde:

- Q: Caudal de fuga
- K: Coeficiente emisor de fuga
- P: Presión
- N: Exponente de fugas (representa la circunstancia en que se manifiesta la presión)

Para la fórmula anteriormente expresada, el valor del exponente de fugas debía ser constante. Sin embargo, luego de que se hayan realizado varias pruebas en tuberías de distinto material, con sus supuestos valores de exponente de fugas y con secciones variables y de distinta morfología (expuestas en la tabla siguiente), los resultados eran distintos entre sí (Cassa, Van Zyl, & Laubscher, 2010).

Van Zyl, Cassa y Laubscher, considera que todos los tipos de fuga tienen distintas secciones, sean en superficie como en forma por lo que plantean la siguiente ecuación:

$$Q = C_d \sqrt{2g} (A_0 P^{0.5} + m P^{1.5}) \quad (3)$$

Dónde:

- Q: Caudal de fuga
- C_d : Coeficiente de descarga
- g: Aceleración de la gravedad
- A_0 : Área inicial de fuga con $P = 0$
- P: Presión
- m: Pendiente indicada en la gráfica área vs. Presión

1.4 Simulación del comportamiento de los orificios de fuga

Varios autores han analizado varios casos, generándose diversas formulaciones que se basan en ciertos parámetros expuestos en la tabla de a continuación. Sin embargo, la base de las distintas formulaciones es el principio propuesto por May (2000) donde expresa que el caudal de fuga es proporcional a la presión:

Tabla 1: Casos de estudio

Caso / Análisis	Valor exponente fuga	Orificio fuga	Sección tubería	Material tubería	valor exponente medio de fuga
Caso 1	0,36 - 0,70	1 mm - 5 mm	60 - 80 mm	metálica	0,5
Caso 2	0,40 - 2,30	0,52mm - 0,53 mm	Indistinto	acero	0,5
Caso 3	0,40- 2,30	Falla longitudinal 1,38mm - 1,85mm	Indistinto	PVC	0,5
Caso 4	0,40 - 2,50	Falla longitudinal 0,79mm - 1,04mm	Indistinto	asbesto	0,5
Caso 5	1,23 - 1,97	Corte longitudinal 20 mm largo	22 mm	polietileno	1,52
Caso 6	0,46 - 076	orificio circular - orificio longitudinal - orificio transversal	25 - 150 mm	plástico	0,58
Caso 7	1,39 - 1,72	Corte longitudinal 10 mm largo	22 mm	polietileno	1,52

Tabla 2: Fórmulas de casos de estudio

Casos	Fórmulas	Autores	Variables
Simulación de una fuga en una tubería conectada a un nodo	$Q_j = K_j P_j^n$ (4)	EPANET	<p>Q_j= Caudal de fuga en el nodo j K_j= Coeficiente emisor de fuga en el nodo j P_j= Presión en el nodo j n = Exponente de fugas</p>
Distribución uniforme de las fugas a lo largo de una tubería	$Q_{ij} = \beta L_{ij} P_{ij}^n$ (5)	Germanopoulos y Jowitt	<p>Q_{ij}= Caudal de fuga entre los nodos i y j β = Coeficiente de fuga según el estado de tubería L_{ij}= Longitud de la tubería entre los nodos i y j P_{ij}= Presión promedio de la tubería entre los nodos i y j n = Exponente de fugas</p>
El caudal de fugas de una tubería es proporcional al número de orificios presentes en dicho enlace	$Q_{ij} = C_s L_{ij} D_{ij}^d e^{\alpha \tau} P_{ij}^n$ (6)	Vela	<p>Q_{ij}= Caudal de fuga entre los nodos i y j C_s= Coeficiente global de fuga según el material o tipo de tubería L_{ij}= Longitud de la tubería entre los nodos i y j D_{ij}= Diámetro de la tubería entre los nodos i y j d = Exponente 1 para tuberías <125mm y Exponente -1 para tuberías ≥ 125mm e= Logaritmo natural α= Parámetro temporal de defectos en tuberías del sector τ = Edad de las tuberías del sector n= Exponente de fugas</p>

Zona con tuberías de similar estructura	$Q_i = M_i \frac{\pi}{2} D_{ij} A_{ij} L_{ij} (H_i + z_i)^n \quad (7)$	Tucciarelli	<p> Q_i= Caudal de fuga en el nodo i M_i= Número total de tuberías conectadas al nodo i D_{ij}= Diámetro de la tubería entre los nodos i y j A_{ij}= Área de fuga en la superficie de la tubería L_{ij}= Longitud de la tubería entre los nodos i y j H_i= Altura piezométrica en el nudo i z_i= Elevación topográfica en el nudo i n= Exponente de fugas </p>
Se separan las fugas de fondo y los orificios de fuga presentes a lo largo de una tubería	$Q_{ij} = \beta L_{ij} P_{ij}^n + \sum_{j=1}^{K_{ij}} P_{ij}^{0.5} \quad (8)$	Giustolisi	<p> Q_{ij}= Caudal de fuga entre los nodos i y j β= Coeficiente de fuga según el estado de tubería L_{ij}= Longitud de la tubería entre los nodos i y j P_{ij}= Presión promedio de la tubería entre los nodos i y j n= Exponente de fugas $\sum_{j=1}^{K_{ij}}$ = Suma de los coeficientes emisores de fuga existentes a lo largo del tubo </p>
Las tuberías de todo el SDAP tienen similar estructura	$Q = K N_D P_i^n \quad (9)$	Wu	<p> Q= Caudal de fuga en el SDAP K= Coeficiente emisor global de fugas N_D= Número total de nodos de demanda del SDAP P_i= Presión en el nodo i n= Exponente de fugas </p>

<p>Las fugas se presentan con mayor frecuencia cerca de las conexiones domiciliarias</p>	$Q_{MN} = Q_u N_D N_{u_i} P_i^n \quad (10)$	<p>Burrows</p>	<p>Q_{MN}= Caudal de fuga en el instante de caudal mínimo nocturno Q_u= Caudal de fuga por conexión domiciliaria N_D= Número total de nodos de demanda del SDAP N_{u_i}= Número de conexiones domiciliarias asociados al nodo i P_i= Presión en el nodo i n= Exponente de fugas</p>
<p>Longitud de tuberías como parámetro principal para la asignación de fugas</p>	$Q_{MN} = N_D Q_{MN_i} \quad (11)$	<p>Araujo</p>	<p>Q_{MN}= Caudal de fuga en el instante de caudal mínimo nocturno N_D= Número total de nodos de demanda del SDAP Q_{MN_i}= Caudal de fuga en el nodo i y en el instante de caudal mínimo nocturno</p>
<p>Longitud de tuberías como parámetro principal para la asignación de fugas</p>	$Q_{MN} = N_D P_{MN_i}^{1.18} K_i \quad (12)$	<p>Araujo</p>	<p>Q_{MN}= Caudal de fuga en el instante de caudal mínimo nocturno N_D= Número total de nodos de demanda del SDAP P_{MN_i}= Presión en el nodo i y en el instante de caudal mínimo nocturno K_i= Coeficiente emisor de fugas en el nodo i</p>

<p>Longitud de tuberías como parámetro principal para la asignación de fugas</p>	$Q_{MN} = N_D P_{MN_i}^{1.18} C M_i 0.5 L_{ij} \quad (13)$	<p>Araujo</p>	<p>Q_{MN}= Caudal de fuga en el instante de caudal mínimo nocturno N_D= Número total de nodos de demanda del SDAP P_{MN_i}= Presión en el nodo i y en el instante de caudal mínimo nocturno C= Coeficiente global de fugas M_i= Número total de tuberías conectadas al nodo i L_{ij}= Longitud de la tubería entre los nodos i y j</p>
<p>Longitud de tuberías como parámetro principal para la asignación de fugas</p>	$Q_{MN} = 0.8 Q_{MNT,t} \quad (14)$	<p>Araujo</p>	<p>Q_{MN}= Caudal de fuga en el instante de caudal mínimo nocturno $Q_{MNT,t}$= Caudal de fuga en el instante de caudal mínimo nocturno y en el instante t o período T</p>
<p>Asignación de fugas mediante un emisor global ajustado a cada nodo</p>	$Q = K N_D \frac{0.5 L_i}{L_T} P_i^n \quad (15)$	<p>Almandoz</p>	<p>Q= Caudal de fuga en el SDAP K= Coeficiente emisor global de fugas N_D= Número total de nodos de demanda del SDAP L_i= Longitud total de tuberías conectadas al nodo i L_T= Longitud total de tuberías del SDAP P_i= Presión en el nodo i n= Exponente de fugas</p>

<p>Asignación de fugas a cada nodo</p>	$Q_i = M_i \frac{L_{ij}}{2} \sum_{j=1}^{K_{ij}} P_i^n \quad (16)$	<p>Tabesh</p> <p>Q_i = Caudal de fuga en el nodo i M_i = Número total de tuberías conectadas al nodo i L_{ij} = Longitud de la tubería entre los nodos i y j $\sum_{j=1}^{K_{ij}}$ = Suma de los coeficientes emisores de fuga existentes a lo largo del tubo P_i = Presión en el nodo i n = Exponente de fugas</p>
--	---	--

1.5 Emisor global de fugas

Existen dos términos a analizarse para comprender este tema: emisor y fuga. El emisor está ligado al caudal, simula el flujo de salida por medio de un orificio, descargando el fluido a la atmósfera (Rossman, 2000). Mientras que la fuga, según Torricelli, son consideradas pérdidas constantes por unidad de superficie de las tuberías pertenecientes al SDAP, afirmación que debe ser considerada al momento de la calibración (Martins & Hussain, 2008).

Los emisores son aplicados comúnmente para simular el caudal de salida de un rociador de Sistema contra incendios o de un Sistema de riego, lo que explica su uso en el estudio de las fugas debido a su similar comportamiento a causa de la presión (Rossman, 2000). Las fugas poseen una localización y descarga desconocida, por lo cual su evolución se torna un misterio, motivo por el cual su valoración se basa en coeficientes o exponentes apropiados al caso (Colombo, Karney, & ASCE, Leaks and Water Use Representation in Water Distribution System Models: Finding a Working Equivalence, 2009). Las fugas se generan a partir de defectos, y son producto de la relación entre el caudal y la presión, el cual, si lo distribuimos en el sistema en base a un período de tiempo, resulta la siguiente fórmula (Martínez, Conejos, & Vercher, 1999):

$$Q_i = K_i(p_i - p_0)^\beta \quad (16)$$

Dónde:

- Q_i = Caudal aguas arriba del orificio
- K_i = Coeficiente del orificio
- p_i = Presión aguas arriba del orificio
- p_0 = Presión aguas abajo del orificio
- β = Exponente de fuga

Según Giustolisi(2008), es necesario un valor de estimación más razonable que no involucre un programa o sistema de detección de fugas debido a la dificultad que representa esto. Este parámetro es el valor coeficiente emisor, representado en “k”, es el resultado de la agrupación de varios parámetros como el valor coeficiente de descarga y el área del orificio (Walski, Bezts, Posluszny, Weir, & Whitman, 2006). Por lo tanto, se puede definir que el

coeficiente emisor de fuga es directamente proporcional al coeficiente de descarga de la rotura y la sección de esta.

Al introducir dichos parámetros en la simulación, el problema se dificulta al comprender el estado de estas variables como las características del orificio de fuga tales como su morfología, material de la tubería, influencia del entorno circundante, entre otros (Bennis, Farés, Guemouria, & Dubois, 2011). Sin embargo, la evolución de la presión entre los períodos diurnos y nocturnos de un día también debe tomarse en cuenta durante la simulación, un rasgo que no contempla el coeficiente de descarga que junto con el área del orificio resulta insuficiente para el estudio (Obradovic, Modelling of demand and losses in real-life water distribution systems, 2000).

En todo caso, las fugas se dividen en dos tipos según la anomalía presente en el SDAP: A consecuencia de las juntas entre tuberías, también conocidos como fugas reportadas; y las producidas por estallidos a lo largo de las tuberías del sistema, o fugas no reportadas (Giustolisi, Savic, & Kapelan, Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks, 2008). Sus principales causantes con factores comunes que se presentan en el SDAP, estos son el deterioro de las tuberías, los minúsculos orificios que se generan en las juntas de estas y el estado de las conexiones hacia los domicilios (Giustolisi, Savic, & Kapelan, Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks, 2008).

Por ello, es primordial el estudio en campo, previamente sectorizado según la precisión del valor del caudal de ingreso a la red de dicha zona, incluso la presión (Núñez, Escobar, & Cárdenas, 2014). A medida que la presión se incrementa, la fuga también aumenta, lo que explica el interés de considerar la demanda de presión para la optimización del coeficiente emisor de fugas, el cual también facilita la calibración del modelo hidráulico del SDAP (Wu Z. Y., 2007). Por lo tanto, la fuga se la consideraría como un tipo de demanda proporcional a la presión, tal como lo indicaría el flujo por medio de un emisor (Wu, Sage, & Turtle, Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System, 2010):

$$Q_{i,l}(t) = K_i[P_i(t)]^\alpha \quad (17)$$

Dónde:

- $Q_{i,l}(t)$ = Caudal de fuga en el nodo i y en el instante t.
- K_i = Coeficiente emisor en el nodo i.
- $P_i(t)$ = Presión en el nodo i y en el instante t.
- α = Exponente de fuga.

Si el valor K_i presenta un valor absoluto mayor a cero, a dicho nodo se lo considera como hotspot de fuga, es decir, las tuberías conectadas a dicho nodo registran roturas, entonces la formulación respectiva para optimizar el modelo debe perfeccionar principalmente el coeficiente emisor (Wu, Sage, & Turtle, Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System, 2010). Sin embargo, no existen algoritmos que acoja todo un SDAP, en ese caso se analiza por sectores y los nodos agruparían cierta cantidad de demandas y fugas bajo los parámetros aceptables de presión y del coeficiente emisor (Wu, Sage, & Turtle, Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System, 2010).

1.6 Exponente de fugas

N1 (exponente de fugas): para la modelación de fugas en un SDAP utilizaremos la ecuación de Torrichelli que simula el comportamiento de un orificio, que es similar a lo que intentamos aproximar con una fuga.

Este exponente no mantendrá un único valor de 0.5 ya que ha sido corregido a partir de análisis experimentales (Lambert, 2001).

Para ello se ha recorrido a dos tipos de pruebas (Lambert, 2001; Thomton, 2002):

- Pruebas suspendiendo el servicio de abastecimiento de agua a los consumidores. En cada prueba se procede al cierre de las válvulas de seccionamiento para poder aislar las tuberías requeridas, una vez logrado este primer cometido se procede a la medición del caudal necesario a utilizar para poder mantener el caudal de fuga, al mismo tiempo en que se varían las presiones de acuerdo a los distintos valores posibles en la red.

- Pruebas nocturnas en SDAP, incluyendo el consumo nocturno. Cada prueba se debe realizar en un sector con un solo punto de abastecimiento, en el cual se procede a realizar la medición del caudal nocturno junto con su respectiva presión media durante un periodo establecido el mismo que puede tratarse de horas, días o semanas. El caudal mínimo nocturno abarca el consumo mínimo nocturno junto con las pérdidas. Las pérdidas se las obtiene de la resta de las estimaciones en el periodo establecido del caudal mínimo nocturno.

En general el valor del exponente de fugas es obtenido luego de repetir estas pruebas unas dos o 3 veces.

Estudios de campo han demostrado que el exponente de fuga a menudo es mayor al coeficiente estimado para el orificio (JE van Zyl y CRI Clayton).

Van Zyl y Clayton propusieron que hay cuatro factores que son responsables del alto valor del exponente de fugas:

- Hidráulica de fugas
- Comportamiento de los materiales de la tubería
- Hidráulica del suelo
- Demanda de agua

1.7 Calibración de modelos hidráulicos

Es un proceso por el cual se determina el valor de cada uno de los atributos elementales del SDAP, su importancia se debe a que permiten que las simulaciones de los modelos hidráulicos se efectúen de manera confiable y concreta (Takahashi, Sadarriaga, & Vega, 2008). Generalmente, consiste en ajustar los parámetros del modelo para representar las condiciones reales de un SDAP (Speight & Khanal, Model calibration and current usage in practice, 2009).

Sin embargo, posee dificultades debido a la falta de conocimiento acerca de cambios efectuados dentro del SDAP, generando incertidumbres en cuanto a las fugas, demandas, diámetros de tuberías, rugosidades y coeficientes de pérdidas menores (Takahashi, Sadarriaga, & Vega, 2008). Ante esta limitación, Thomas Walski, citado por Claudia Stella Solano (2012), en 1995,

identificó siete propósitos de los modelos del SDAP que influyen en su posterior calibración:

- Tamaño de tuberías para planeación y gestión
- Simulaciones en período extendido para estudios de planeación y gestión
- Diseño de sectorización
- Estudios de rehabilitación
- Estudios de gasto de la energía
- Modelación de calidad de agua
- Programas de lavado de redes

Por ende, surge la necesidad de orientar sobre las mejores prácticas de modelado, lo cual motivó al desarrollo de una guía práctica de parte de la Fundación de Investigación de la Asociación Americana de Obras Hídricas (AWWARF), abarcando los temas de modelación, calibración y sus aplicaciones (Speight V. , 2008). Aquella institución, a través de la Journal AWWA (2013), manifiesta tres posibles situaciones en las que se pueda evaluar la calibración del modelo:

- En la finalización de la edificación del modelo inicial
- Antes de la utilización de un modelo ante un problema en particular
- Durante el modelado en tiempo real a período extendido

La calibración implica el ajuste de las características y parámetros del modelo hidráulico, lo cual predice los flujos y presiones que deben coincidir con los datos observados en campo, o a rangos aceptables para la mejora del servicio del SDAP (Zheng W. , y otros, 2002). Sin embargo, simular un SDAP tal como es en la realidad es tan solo una utopía, lo cual limita la calibración. La reducción de las diferencias entre datos observados y datos de campo dependerá de los tres parámetros propuestos por Juan Cabrera (s.f.):

- Variables de ingreso: Datos obtenidos de campo que se utilizarán en las ecuaciones de la modelación para determinar variables de este.
- Parámetros: Directrices de la modelación hidráulica que influyen en la selección de variables y direccionan el comportamiento hidráulico del modelo.

- Variables de estado: Son datos obtenidos que se manifiestan según las circunstancias en que se encuentre el SDAP.

Así mismo, se pueden generar incertidumbres en los parámetros propuestos por Cabrera (s.f.) que afectarían el proceso de calibración del SDAP, errores como:

- Falencias en datos de ingreso: Son errores que se manifiestan al momento de captar los datos de ingreso que se producen debido a una incorrecta interpretación o por la aplicación de técnicas no recomendables.
- Falencias en datos observados: Son deslices producto de una incorrecta interpretación o medición de los datos de campo.
- Falencias por la falta de optimización de parámetros: Son desajustes en el conjunto de parámetros que ocasiona dudas en el momento de la calibración de datos, ya que no existiría una base o indicador que manifieste que el proceso de calibración esté correctamente direccionado.
- Falencias en la estructuración del modelo: Son fallas que se producen al momento de elaborar el modelo hidráulico, que, si bien no afectan el proceso de calibración, la modelación no estaría simulando el comportamiento real de un SDAP.

1.8 Técnicas avanzadas de calibración

Históricamente la mayoría de los intentos para calibrar un modelo hidráulico se basaban en métodos como el de prueba y error, u otros métodos empíricos. Dado que el modelamiento del comportamiento hidráulico en las tuberías es complejo en términos tanto de tamaño como de no linealidad, los métodos clásicos de optimización requieren de una gran cantidad de simplificaciones lo que da resultados poco realistas. La calibración tradicional de un modelo de SDAP basado en el método prueba y el error, implicaba en un inicio asumir los parámetros del modelo para luego simularlo y realizar la comparación con los datos observados, este proceso se debe realizar hasta que la diferencia de resultados sea mínima, por lo que este método es muy lento.

En años recientes muchos investigadores han propuesto diferentes algoritmos para usarse en modelos de redes de calibración automáticas. Estos modelos están basados en el uso de las ecuaciones analíticas planteadas por Tomas Walski (1983), modelos de simulación (Boulos & Ormsbee, 1991) y métodos de optimización.

1.9 Técnicas analíticas de calibración

Su función es ajustar los coeficientes de rugosidad que poseen las tuberías mediante un proceso iterativo hasta lograr la calibración, por medio de la combinación de valores pronosticados con los reales.

La evaluación de los datos predichos en el modelo en base a las observaciones en campo es el paso primordial para el desarrollo del modelo de distribución, aunque éstos no suelen ser perfectos y posteriormente deban ser cambiados (Walski & ASCE, 1983). Dichas inexactitudes, según Thomas Walski(1983) son de distinto origen, comúnmente por:

- Estimación incorrecta de la demanda del agua
- Incorrecta capacidad de las tuberías
- Cabezales incorrectos
- Excesiva simplificación del SDAP en el modelo hidráulico

A pesar de los procedimientos aplicados tales como el análisis de sonido y algoritmos de simulación, es indispensable la exactitud de los datos de ingreso o de campo, el cual pone a discusión acerca de la relevancia de los datos de análisis de simulación (Ormsbee & Wood, 1986). El primer paso a tener en cuenta en la calibración es el ajuste de los parámetros del modelo hidráulico con los datos reales dentro de un rango de tolerancia, pero debido a la cantidad de datos, dicha verificación se torna desordenada y los errores son susceptibles a manifestarse (Ormsbee & Wood, 1986).

1.10 Técnicas implícitas de calibración

Dentro de este grupo se puede definir que existen dos subdivisiones que son los métodos evolutivos y no evolutivos. Dentro de los métodos evolutivos encontramos aquellos que se encuentran basados en algoritmos genéticos, las cuales hacen uso de las reglas de selección natural que guían el proceso

evolutivo de los seres vivos, es decir, en casos los cuales otros métodos no resultan u otorgan satisfactorios resultados. Los métodos no evolutivos pueden ser lineales o no lineales.

1.11 Parámetros de calibración

Los parámetros para la calibración se alcanzan al minimizar las diferencias entre los valores observados en campo y las predicciones que manifieste el modelo, entonces la calibración debe cumplir tres objetivos como 1) Minimizar la suma de los cuadrados de diferencia, 2) Minimizar la suma de las diferencias absolutas y 3) Minimizar la diferencia absoluta máxima (Zheng W. , Walski, Mankowski, Gurrieri, & Tryby, 2002). Tales objetivos se manifiestan en las siguientes expresiones:

$$\frac{\sum^{NH} W_{nh} \left(\frac{H_{sim} - H_{obs}}{H_{pnt}} \right)^2 + \sum^{NF} W_{nf} \left(\frac{F_{sim} - F_{obs}}{F_{pnt}} \right)^2}{NH + NF} \quad (18)$$

$$\frac{\sum^{NH} W_{nh} \left| \frac{H_{sim} - H_{obs}}{H_{pnt}} \right| + \sum^{NF} W_{nf} \left| \frac{F_{sim} - F_{obs}}{F_{pnt}} \right|}{NH + NF} \quad (19)$$

$$\max \left\{ NH_{\max} W_{nh} \left| \frac{H_{sim} - H_{obs}}{H_{pnt}} \right| + NF_{\max} W_{nf} \left| \frac{F_{sim} - F_{obs}}{F_{pnt}} \right| \right\} \quad (20)$$

Dónde:

- H_{obs} : Grado hidráulico observado
- H_{sim} : Grado hidráulico simulado
- F_{obs} : Flujo observado
- F_{sim} : Flujo simulado
- NH : Número de grados hidráulicos observados
- NF : Número de descargas de tuberías observadas
- W_{nh} : Factor de ponderación entre grados hidráulicos observados
- W_{nf} : Factor de ponderación entre flujos hidráulicos
- H_{pnt} : Grado hidráulico por punto de aptitud
- F_{pnt} : Flujo hidráulico por punto de aptitud

1.12 Criterios de calibración

Los criterios de calibración para modelos hidráulicos son planteados por muchos autores como en Walski et al (2007) que indica que la diferencias límites entre los valores medidos y simulados de caudal y presión para diferentes casos ser:

- Planificación de SDAP:
 - o Altura piezométrica de entre 1.5 metros y 3.0 metros para calibración en condiciones normales de demanda y pruebas de campo en hidrantes (instantes de velocidad máxima en caso de tuberías mayores a 600mm).
 - o Nivel de depósitos de entre 1.0 metro y 2.0 metros para simulación en período extendido.
 - o Diferencia de caudal entre un 10% y 20% en puntos de inyección de agua y bombeo.
- Diseño del Sistema:
 - o Altura piezométrica de entre 1.5 metros y 3.0 metros para funcionamiento de hidrantes.
 - o Nivel de depósitos de entre 1.0 metro y 2.0 metros.
- En caso de análisis de incendios: altura piezométrica y residual de entre 1.5 metros y 3.0 metros en nudos representativos de zonas de presión para calibración en condiciones normales de demanda y en caso de incendios.
- Para diseño de redes sectorizado: altura piezométrica de entre 1.5 metros y 3.0 metros en punto de división de sectores para calibración en condiciones normales de demanda y en caso de incendios.
- Para sistemas de distribución fuera del medio urbano: altura piezométrica de entre 3.0 metros y 6.0 metros en la zona de estudio para calibración en condiciones normales de demanda y en caso de incendios.
- En caso de rehabilitación de redes: altura piezométrica estática y residual de entre 1.5 metros y 3.0 metros en la zona de estudio para calibración en condiciones normales de demanda y en caso de incendios.

- Purgas de red: diferencia de caudal entre el 10% y 20% para calibración de descarga en hidrante.
- Verificación de eficiencia energética:
 - o Energía total utilizada dentro de un rango de entre 5% y 10% para un período de 24 horas.
 - o Consumo energético dentro de un rango de entre 10% y 20% para un período establecido en el estudio.
 - o Demanda máxima de energía dentro de un rango de entre 5% y 10%.
- Para el caso de análisis de operación de red: el modelado debe reproducir los problemas registrados en el sistema, elemento necesario para la toma de decisiones en base a tales falencias.
- En caso de planificaciones de emergencia: altura piezométrica de entre 3.0 metros y 6.0 metros para calibración en condiciones de escenarios emergentes.
- Para modelación de desinfección: el modelado debe reproducir el patrón de concentración del elemento desinfectante a lo largo de un período de tiempo definido, basándose en un error aproximado de entre 0.1 miligramos por litro a 0.2 miligramos por litro.

También existe otro criterio para los parámetros de calibración planteado por la (AWWA- ECAC Engineering Computer Applications Committee, 1999) para diferentes casos como se muestra a continuación:

Tabla 3: Balance hídrico estandarizado propuesto por la IWA

Propósito del modelo	Nivel de detalle	Tipo de simulación	No. mediciones de presión (% de nudos)	Precisión en mediciones de presión	No. Mediciones de caudal (% de tuberías)	Precisión mediciones de caudal (%)
Planificación	Bajo	Régimen estacionario o EPS	10	± 5 psi (3.5 mca) para el 100% de las mediciones	1	± 10
Diseño	Moderado - Alto	Régimen estacionario o EPS	2 – 5	± 2 psi (1.4 mca) para el 90% de las mediciones	3	± 5
Operación de la red	Bajo – Alto	Régimen estacionario o EPS	2 – 5	± 2 psi (1.4 mca) para el 90% de las mediciones	2	± 5
Calidad de agua	Alto	EPS	2	± 3 psi (2.1 mca) para el 70% de las mediciones	5	± 2

Fuente: (AWWA- ECAC Engineering Computer Applications Committee, 1999)

La utilización del criterio planteado por (AWWA- ECAC Engineering Computer Applications Committee, 1999) requiere la implementación numerosos equipos para la obtención de datos durante las pruebas de campo.

1.13 Procedimiento general para la calibración de modelos hidráulicos

En general la calibración del modelo de una red debe seguir 7 pasos básicos (Ormsbee y Lingireddy, 1997):

1. Identificar el uso del modelo
2. Determinar estimaciones iniciales de los parámetros del modelo
3. Recolectar la información para la calibración.
4. Evaluar los resultados del modelo
5. Realizar una macro calibración
6. Desarrollar un análisis de sensibilidad
7. Realizar una micro calibración

Existen algunos usos que se les pueden dar a los modelos hidráulicos, por lo que es importante definirlo puesto que esto implicará realizar algunas variantes durante el proceso de calibración, ya sea para dimensionamiento de tuberías, estudios operacionales, etc. Y junto con ello también definir el tipo de análisis a seguir, estático o de periodo extendido E. Ormsbee et al (1997)

En cuanto a la estimación de los parámetros iniciales del modelo corresponde mencionar que nos referimos a la rugosidad de las tuberías, la asignación de las demandas a los nodos y el patrón de consumo para el caso del análisis en periodo extendido.

Para la estimación inicial del coeficiente de rugosidad se plantea la utilización de tablas que presentan valores para estas tuberías, que tienen como variable el diámetro, edad y material. El uso de estas tablas es de gran ayuda en el caso de trabajar con tuberías nuevas, pero cuando se tienen tuberías con algunos años de edad estos valores pierden confiabilidad dado que entran en escena otros factores como la composición química del agua que circula y el envejecimiento de la tubería que afecta la rugosidad de esta E. Ormsbee et al (1997).

En el momento que ingresamos los parámetros iniciales del modelo podemos realizar la primera simulación, la que nos servirá de base para iniciar el proceso de calibración, el mismo que requerirá de información tomada en campo para saber qué tan cercano está nuestro modelo del funcionamiento real del SDAP.

Existen algunas metodologías para obtener la información requerida para la calibración, entre la información a ser recogida debe constar:

- Fire-Flow Tests, estas son pruebas que nos permiten recolectar información referente a caudales y a presión, que permitirán efectuar la calibración en varios instantes de tiempo bajo el análisis estático E. Ormsbee et al (1997). Estas pruebas deben realizarse de preferencia cerca del perímetro del SDAP
- Medición de presión estática en hidrantes por todo el SDAP Walski (1983).
- Cotas de los tanques y presiones en las bombas, las mismas que se obtendrán a través de la colocación de medidores temporales en la red, para obtener el comportamiento de esta en un periodo extendido, normalmente 24 horas Walski (1983).
- Lecturas de presión en las válvulas rompe presión Walski (1983).
- Caudal a través de los medidores de la red, para lo cual únicamente se requiere de un manómetro para el hidrante Walski (1983).
- Tiempo de recorrido de una partícula a través de diferentes puntos de la red, el mismo que puede ser determinado a través de la utilización de trazadores conservativos o no conservativo. Esta información nos permite modelar la concentración de determinado elemento químico a lo largo de la red E. Ormsbee et al (1997).

En el momento en que evaluamos los resultados obtenidos, comparamos toda la información obtenida para el proceso de calibración con lo obtenido en el campo para lo que utilizaremos algunos criterios para poder establecer que tan fino es nuestro modelo

Para medir la exactitud del modelo, el criterio más común a utilizar es el de la diferencia de presiones absoluta, la misma que se calcula dividiendo la variación de la presión absoluta en un punto para la variación de la presión medida a través de todo el sistema. Para el caso de análisis de periodos extendidos es mejor realizar la comparación de los niveles de los tanques con los obtenidos de la medición de periodo extendido E. Ormsbee et al (1997).

Para Walski (2000) de acuerdo al grado de utilidad, se pueden subdividir los datos recolectados en:

- Buena información, la información a utilizar, se da cuando hay suficiente pérdida de carga estática para poder establecer conclusiones sobre el modelo.
- Mala información, es aquella que comúnmente tiene una falla referente a una mala medición en algún manómetro colocado en la red o ausencia de información sobre que bomba está trabajando durante el proceso.
- Información inútil, se la obtiene cuando los valores de altura estática son tan bajos que son inservibles.

Cuando hablamos de macro calibración de una red nos referimos a la red de manera global, para ello hacemos énfasis en aquellos detalles que afectan el funcionamiento de la misma en manera significativa, si uno de los valores de las variables de estado varía con respecto a los valores medidos en campo de manera alarmante, con ello me refiero a porcentajes mayores del treinta por ciento, la causa de esta des concordancia podría encontrarse en la estimación de la rugosidad interna de la tubería o las demandas ingresadas en cada nodo.

En fin, los motivos que conllevan a la variación de los resultados medidos con los simulados son varios, pero no podemos dejar de lado la importancia que tienen las válvulas parcial o totalmente cerradas, curvas de bombas o información telemétrica de los tanques mal definida, diámetros y longitudes de tuberías incorrectas, geometría de la red y zonas de presión incorrectas Lindell E. et al (1997).

Para un análisis de sensibilidad de un SDAP se ejecuta un algoritmo genético con suficientes generaciones para obtener una respuesta de la red a los muchos cambios que se ejecuten en los valores de una variable perteneciente a la misma. Este análisis es muy importante puesto que permite definir qué factor afecta en mayor y menor consideración a la simulación de la red, ya sea la demanda base, el coeficiente emisor de fugas, etc. Walski et al (2007).

Para poder abarcar el tema de micro calibración debe haber una concordancia de alto grado en referencia a los datos obtenidos en campo con los obtenidos de la simulación.

Este proceso se refiere a que las condiciones en un área específica del modelo estén siendo simuladas con precisión. Durante una micro calibración se suelen usar los caudales de boca de incendio para poder corregir información de las tuberías y localizar cierres de válvulas AWWA (2012).

Ya hablando plenamente de micro calibración, tomaremos en cuenta los parámetros de la red referentes a la rugosidad de las tuberías y las demandas nodales, las mismas que iremos afinando para lo que se plantea la división de este proceso en dos análisis, uno estático y otro de periodo extendido.

En el caso del análisis estático, haremos coincidir los datos de caudal y presión de varias observaciones estáticas. En el caso de análisis de periodo extendido el factor que afecta de manera significativa durante la calibración es la distribución de las demandas L.E Ormsbee et al (1997).

1.14 Gestión de pérdidas de agua

Para la metodología propuesta se requiere el cálculo de los consumos en la red junto con las pérdidas para lo que se implementa un balance hídrico en el que detallamos la diferencia del caudal de ingreso de la red y los caudales de salida dándose como resultado las pérdidas en el sistema.

El problema principal de entidades que suministran agua es la pérdida de agua (Alegre et al, 2005). Por consiguiente, estos volúmenes de agua que se pierden antes de que esté lista para ser consumida (Molina, 2009). Según La Asociación Internacional de Agua (IWA), existen 2 tipos de pérdida de agua en el balance hídrico para revisión de redes de distribución: "Volumen inyectado al sistema - Consumo Autorizado = Pérdidas "aparentes" + Pérdidas "reales" (Lambert y Hirner, 2000; Alegre et al, 2006).

Las pérdidas aparentes se basan en: "caudales de agua transportados a través de la red de distribución que alcanzan el punto de entrega a los abonados" (EPA, 2010). Esta pérdida aparente se da principalmente por: consumos no autorizados, imprecisiones de medida y errores en el manejo de datos.

Las pérdidas reales: "están constituidas por la sumatoria de caudales incontrolados debido a fallos en la estanqueidad de esta; los que siguen dinámicas propias según su localización, tamaño (caudal de fuga) y tiempo

durante el cual fugan” (Guerrero y Arango, 2008). Estas dependen de la localización y reparación de fugas que responden a normativas de la empresa abastecedora. Para cuantificar la cantidad de agua perdida en el sistema de distribución se basan en 3 métodos: el balance hídrico, el método de caudales nocturnos y el análisis de componentes de fugas.

El balance hídrico conocido como TOP-DOWN parte de los registros de los caudales inyectados a la red de distribución y el volumen según tipos de uso para determinar el volumen anual de pérdidas. El método de caudales nocturnos conocido como BOTTON-UP está conformado entre 500 y 3000 conexiones domiciliarias llamado también como Distritos de Medición, analizan los caudales nocturnos inyectados en estas zonas. El análisis de componentes de fugas permite estimar el volumen: “parte de la estimación del caudal de fuga correspondiente a cada uno de los elementos de la red” (Farley, 2001). En 1957 La American Water Works Association (AWWA) publica el artículo “RevenueProducing vs. Unaccounted-for Water” (Wallace, 1987) donde presenta el término ‘Agua No Contabilizada. Esto permitió definir el porcentaje de volumen de agua que no se ve reflejada en el volumen contabilizado hacia los abonados.

1.15 Balance hídrico

Consiste en establecer la contabilidad precisa del agua que maneja un SDAP en un determinado período de tiempo, considerando un valor máximo de un año y un valor mínimo de un mes (Cabrera E. , s.f.). El caudal que se inyecta al SDAP es consumido por los distintos abonados, pero diferenciar los caudales de consumo de las fugas no resulta ser suficiente (Cabrera, Almandoz, Arregui, & García-Serra, 1999).

El balance se presenta como una especie de estructura arbórea de manera que el caudal superior resulta ser más general que el inferior, tal como lo muestra la tabla de a continuación (Cabrera, Almandoz, Arregui, & García-Serra, 1999). Según un informe de la International Water Association (IWA) (s.f.), la estructura arbórea del balance hídrico se divide en cuatro niveles:

- Punto de partida: Caudal de ingreso al SDAP.
- Primer nivel: La suma del Caudal consumido y el Caudal registrado.

- Segundo nivel: La suma del Caudal incontrolado fugado y el Caudal consumido no registrado.
- Tercer nivel: Es el caudal consumido no registrado ya sea por error de medición o la carencia de éste, ya sea de forma consciente o autorizada, o de manera inconsciente o robos.
- Cuarto nivel: Son los usos autorizados exentas de pago y los ilegales que no constan en la base de datos de la empresa.

Tabla 4: Balance hídrico propuesto por la IWA

Volumen inyectado al sistema	Consumo autorizado	Consumo Autorizado facturado	Consumo facturado medido	Agua Facturada
			Consumo facturado no-medido	
		Consumo Autorizado no facturado	Consumo no-facturado medido	Agua No Facturada
			Consumo no-facturado no-medido	
	Pérdidas de agua	Pérdidas aparentes	Consumo no autorizado	
			Imprecisiones de medida	
			Errores sistemáticos en el manejo de datos	
		Pérdidas reales	Fugas en tuberías de transporte y distribución	
			Fugas y reboses en depósitos de almacenamiento	
			Fugas en acometidas hasta el punto de medida	

Fuente: (Lambert, 2000)

Capítulo 2

METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología a usar en este trabajo de tesis será la planteada por (Molina, 2014), la misma que se basa en un proceso iterativo que nos permitirá ir calibrando el emisor global de fugas, el patrón de consumo de la demanda base y las pérdidas de carga localizadas en las válvulas. Es de suma utilidad ya que permite realizar la calibración del modelo con pocas mediciones e incertidumbre en la posición de operación de las válvulas existentes.

Se plantea obtener el patrón de consumo para la demanda independiente de la presión, estimar el valor del emisor global de fugas para distribuirlo espacialmente y representar la pérdida de carga en la red de distribución.

2.1 Carga del Modelo Hidráulico

Este proceso dependerá de muchos factores, entre ellos la forma y disponibilidad de la información requerida. Por lo que (Molina, 2014) propone un procedimiento a seguir el mismo que consiste en seis etapas que son:

1. Verificación de la información disponible
2. Estimación del volumen suministrado
3. Definición de los nudos de demanda
4. Cálculo de los caudales de modelación
5. Asignación espacial de los consumos
6. Estimación inicial del patrón de consumo para la demanda base

En lo que se refiere al primer punto, se debe constatar que el registro que se tiene sobre lo facturado de los usuarios coincida con la base de datos de los predios. Se deben identificar errores y corregirlos, trátase de omisión o duplicidad de información.

Se debe estimar el volumen suministrado (V_s) para lo que hay que identificar aquellos usuarios que por algún motivo se encuentran registrados, pero carecen de valor facturado. Para estos casos su caudal asignado será el promedio obtenido de toda la red.

$$\bar{V}_c = \frac{\sum_{K=1}^{DL} V_{fact_DL}}{DL} \quad (21)$$

- \bar{V}_c : volumen promedio consumido del sector
- V_{fact_DL} : volumen facturado a partir de las lecturas de consumo para el abonado K
- DL : número de abonados facturados a partir de las lecturas de consumo

Una vez identificado y calculado el caudal medio del sector se lo multiplicara por el número de cuentas que tengan este problema y adicionalmente se le sumara el volumen facturado registrado de aquel sector.

$$V_s = V_{fact} + (CC) \cdot \bar{V}_c \quad (22)$$

- V_s : volumen suministrado estimado
- V_{fact} : volumen facturado del sector
- CC : número de cuentas con anomalías o consumo cero
- \bar{V}_c : volumen promedio consumido del sector

Ahora se deberá identificar aquellos nudos a los cuales se le será asignada una demanda base y su representación espacial, se los seleccionara de forma que representan de manera más practica la demanda en la red.

Luego se realizará un balance hídrico para poder determinar el caudal suministrado junto con el de fugas, a partir del volumen de agua suministrada determinada en el paso anterior y el caudal inyectado, el mismo que se determina a partir de una medición constate de veinte y cuatro horas durante siete días.

El caudal de agua no registrada se calculará mediante la diferencia entre el caudal medio inyectado y el caudal medio suministrado, lo que permitirá definir los caudales de modelación. Obtenido y validado el caudal de fugas se procederá a asignar el caudal de consumo a cada predio y se los asignará respectivamente a los elementos pertenecientes a la base de datos SIG.

$$\bar{Q}_s = \frac{V_s}{T_{fac}} \quad (23)$$

- \bar{Q}_s caudal suministrado a los abonados
- V_s : volumen suministrado estimado
- T_{fac} : tiempo utilizado para la facturación

$$\bar{Q}_{ANR} = \bar{Q}_{iny} - \bar{Q}_s \quad (24)$$

- \bar{Q}_{ANR} : caudal medio de agua no registrada
- \bar{Q}_{iny} : caudal medio inyectado
- \bar{Q}_s caudal suministrado a los abonados

Asignar los consumos de manera espacial involucra cuatro pasos que son: asignar un punto de demanda a cada predio, crear polígonos de servicio, calcular la demanda base por cada polígono y la asignación de la demanda base en los nudos del modelo hidráulico. Por tanto, se deben de tener igual número de nudos de demanda como de polígonos de servicio.

Finalmente nos tiene que dar como resultado que la suma de los caudales asignados como demanda base a los nudos sea igual al caudal medio suministrado a los abonados “ Q_s ”.

$$\sum_{j=1}^{ND} q_{db,j} = \bar{Q}_s \quad (25)$$

- \bar{Q}_s = caudal medio suministrado a los abonados
- ND = número de nudos de demanda en el modelo hidráulico
- $q_{db,j}$: demanda base asignada al nudo de demanda j

Como paso final de este proceso está la estimación inicial de un patrón de consumo para lo que necesitaremos una serie medida de los caudales inyectados a la red y el valor del caudal promedio inyectado de forma que se puedan calcular los coeficientes de modulación de la demanda base para cada instante t del día haciendo una relación ente el caudal inyectado en cada instante “t” y el caudal medio inyectado, de esta manera logrando obtener la primera aproximación del patrón de consumo, el mismo que será asignado a los nudos de demanda del modelo hidráulico. Tal como se puede observar a continuación:

$$C_m(t) = \frac{Q_{iny}(t)}{\bar{Q}_{iny}} \quad (26)$$

- $C_m(t)$ coeficiente de modulación para la demanda base en el instante t
- $Q_{iny}(t)$ caudal inyectado para el instante t
- \bar{Q}_{iny} : caudal medio inyectado a la red

2.2 Ajuste de los parámetros de calibración del modelo

Los parámetros a ajustar durante la calibración del modelo serán el patrón de consumo para la demanda base, el coeficiente emisor de fugas de toda la red, la representación de las pérdidas de carga causadas por la fricción en las tuberías y reducción de diámetro a través de válvulas (Molina, 2014). Para lo que se utilizarán una serie de ecuaciones que servirán de base para la calibración de los parámetros propuestos.

En primer lugar, asumiremos como válida la ecuación planteada por EPANET para la modelación de fugas en la red la misma que se representa como una

derivación de la ecuación de Torricelli para lo que el exponente de fugas ya definido en el capítulo anterior será asumido como 0.5

$$Q_i(t) = C_{e,i}[P_i(t)]^N \quad (27)$$

- $Q_i(t)$ = Caudal de fuga en el nodo i y en el instante t
- $C_{e,i}$ = Coeficiente emisor de fugas en el nodo i
- $P_i(t)$ = Presión en el nodo i y en el instante t
- N = Exponente de fugas

Para obtener la demanda total en cada nodo se deberá sumar las demandas dependientes y las no dependientes de la presión, es decir la suma del consumo de cada nodo y las fugas. Siendo el consumo en el nodo igual al coeficiente de consumo de ese instante multiplicado por la demanda base de este y el caudal de fuga del nodo tal cual fue definido en la ecuación anterior.

$$Q_{T,i}(t) = C_{c,i}(t)Q_{db,i} + C_{e,i}[P_i(t)]^{0.5} \quad (28)$$

- $Q_{T,i}(t)$ = Demanda total del nodo i y en el instante t
- $C_{c,i}(t)$ = Coeficiente de consumo en el nodo i y en el instante t
- $Q_{db,i}$ = Demanda base del nodo i
- $C_{e,i}$ = Coeficiente emisor de fugas en el nodo i
- $P_i(t)$ = Presión en el nodo i y en el instante t

Ahora para poder determinar una ecuación que me permita calcular el coeficiente emisor global de fugas para lo que se presenta una expresión que representa un balance hídrico en término de volúmenes

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} Q_{T,i}(t)\Delta t = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} C_{c,i}(t)q_{db,i}\Delta t + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{ND} C_{e,i}[P_i(t)]^{0.5}\Delta t \quad (29)$$

- T = Número total de instantes
- Δt = intervalo de tiempo t entre cada instante de cálculo
- ND = Número total de nodos
- $Q_{T,i}(t)$ = Demanda total del nodo i y en el instante t
- $C_{c,i}(t)$ = Coeficiente de consumo en el nodo i y en el instante t
- $q_{db,i}$ = Demanda base del nodo i
- $C_{e,i}$ = Coeficiente emisor de fugas en el nodo i
- $P_i(t)$ = Presión en el nodo i y en el instante t

Para complementar esta ecuación realizaremos unos reemplazos asumiendo que el coeficiente de consumo el coeficiente de consumo es el mismo para cada instante de tiempo y que el emisor global de fugas se repartirá de manera equitativa

$$C_{e,i} = \frac{C_{e,global}}{ND} \quad (30)$$

- $C_{e,i}$ = Coeficiente emisor de fugas en el nodo i
- $C_{e,global}$ = Coeficiente emisor global de fugas
- ND = Número total de nodos

$$C_c(t) = C_{c,i}(t) \quad (31)$$

- $C_c(t)$ = coeficiente de consumo para el instante t
- $C_{c,i}(t)$ = coeficiente de consumo del nudo i

Como resultado del reemplazo de las dos ecuaciones anteriores y simplificando Δt nos queda una expresión

$$\sum_{t=1}^T Q_{T,sim}(t) = C_c(t) \sum_{t=1}^T Q_C + \sum_{t=1}^T (T) [\bar{P}_T(t)]^{0.5} \quad (32)$$

- T = Número total de instantes
- $Q_{T,sim}(t)$ = Caudal total simulado en el instante t
- $C_c(t)$ = Coeficiente de consumo en el instante t
- Q_C = Caudal de consumo total
- $\bar{P}_T(t)$ = Presión promedio para toda la red en el instante t

Como resultado de esta ecuación podemos hacer una simplificación tomando todos los instantes de tiempo t obteniendo:

$$Q_{T,sim}(t) = C_c(t)Q_C + C_{e,T}(\bar{P})^{0.5} \quad (33)$$

- $Q_{T,sim}(t)$ = Caudal total promedio simulado en el instante t
- $C_c(t)$ = Coeficiente de consumo en el instante t
- Q_C = Caudal de consumo total
- $C_{e,T}$ = Coeficiente emisor global de fugas
- \bar{P} = Presión promedio total simulado

Para que finalmente despejando de la ecuación anterior encontremos la expresión que me permitirá determinar la primera estimación del coeficiente emisor global de fugas

$$C_{e,global} = \frac{\bar{Q}_{iny} - \bar{Q}_s}{\bar{p}^{0.5}} \quad (34)$$

$C_{e,global}$ hace referencia el emisor global de fugas, \bar{Q}_{iny} equivale al caudal medio inyectado en la red, \bar{Q}_s caudal medio suministrado a los clientes y \bar{p} es la presión promedio de la red para todos los instantes de simulación.

Además, si consideramos que la diferencia del caudal medio inyectado y el caudal medio suministrado es igual al caudal medio de agua no registrada (\bar{Q}_{ANR}), como ya se había definido previamente, podemos definir la ecuación para encontrar el emisor global de fugas en toda la red de distribución.

$$C_{e,global} = \frac{\bar{Q}_{ANR}}{\bar{p}^{0.5}} \quad (35)$$

2.3 Calibración del emisor global de fugas

Como ya se habló anteriormente uno de los pasos a seguir para el proceso de calibración consiste en la repartición espacial del coeficiente emisor de fugas para cada nodo. Para ello se necesita estimar un primer valor de este emisor de fugas el mismo que ya fue definido anteriormente.

$$C_{e,global} = \frac{\bar{Q}_{iny} - \bar{Q}_s}{\bar{p}^{0.5}} \quad (36)$$

Para la utilización de la ecuación anterior se deben considerar las siguientes hipótesis:

1. El caudal medio total simulado equivale al caudal medio inyectado
2. El caudal consumido es conocido y equivale al caudal medio suministrado a los clientes
3. La presión promedio para todos los instantes de tiempo pueden ser obtenidos a través de la simulación

Durante la primera simulación del modelo, se procederá a cargar únicamente la demanda de los clientes y el patrón de consumo. En la segunda simulación obtenemos la presión media de la red y el caudal estimado de fugas con la cual se calculará el coeficiente emisor global ($C_{e, global}$) de fugas.

$$C_{e,global} = \frac{\bar{Q}_{ANR}}{\bar{p}^{0.5}} \quad (37)$$

En donde $C_{e, global}$ es el emisor global de fugas, $\overline{Q_{ANR}}$ es el caudal de agua no contabilizada y \bar{P} es la presión media de la red.

Se determinará el coeficiente para cada nudo ($C_{e, i}$) usando 3 metodologías que se plantean a continuación.

Para la tercera simulación se deberá incluir la utilización de un factor de corrección para el coeficiente emisor global de fugas de la simulación anterior el mismo que se calcula como se muestra a continuación

$$C_{e, global}^n = FC \cdot C_{e, global}^{n-1} \quad (41)$$

- $C_{e, global}^n$ = coeficiente emisor global de fugas en el instante j
- $C_{e, global}^{n-1}$ = coeficiente emisor global de fugas anterior al instante j

$$FC = \frac{\bar{Q}_{ANR}}{\bar{Q}_{F, sim}} \quad (42)$$

- FC = factor de corrección
- \bar{Q}_{ANR} = caudal medio de agua no registrada
- $\bar{Q}_{F, sim}$ = caudal medio de fugas obtenido de la simulación.

Cada proceso de calibración tiene límites que permiten saber el nivel de precisión que posee, en el caso de emisor global de fugas, se seguirá este proceso iterativo hasta que la presión media de demanda sea considerada constante para dos iteraciones consecutivas.

$$|\bar{P}_i^n| - |\bar{P}_i^{n-1}| \leq \epsilon$$

- \bar{P}_i^n = presión media en el nudo i para la simulación n
- \bar{P}_i^{n-1} = presión media en el nudo i para la simulación anterior a n
- ϵ = margen de error admisible

También se revisará que el caudal medio de fugas simulado tenga un alto grado de similitud con el caudal medio de fugas teórico, tomado en cuenta los niveles de precisión preestablecidos para el uso del modelo.

$$|(\bar{Q}_{T, sim} - \sum_{i=1}^{ND} q_{db, i}) - \bar{Q}_{ANR}| \leq \epsilon \quad (43)$$

- \bar{Q}_{ANR} = caudal medio total simulado
- $q_{db, i}$ = demanda base en el nudo i

- ND = número de nudos de demanda en el modelo
- \bar{Q}_{ANR} = caudal medio de agua no registrada
- ϵ = margen de error admisible

2.3.1 Distribución equitativa

La primera, que consiste en realizar una distribución equitativa del emisor global, es decir otorgar un valor proporcional equitativo a cada nodo de demanda.

$$C_{e,i} = \frac{C_{e,global}}{n} \quad (38)$$

En donde $C_{e,global}$ equivale al emisor global de fugas, $C_{e,i}$ es el coeficiente emisor de fugas para el nudo i y n la cantidad de nudos de demande definidos.

2.3.2 Distribución por número de conexiones

La segunda metodología planteada tiene como fundamento la distribución del emisor global de manera proporcional al número de conexiones en la red. Es decir que el emisor para cada nudo tendrá un porcentaje proporcional correspondiente al número de conexiones que estén enlazados a ese nudo.

$$C_{e,i} = \frac{C_{e,global} \cdot N_{cn}}{\sum N_c} \quad (39)$$

En donde $C_{e,global}$ equivale al emisor global de fugas, $C_{e,i}$ es el coeficiente emisor de fugas para el nudo i , N_{cn} son las conexiones asociadas al nudo y $\sum N_c$ es la cantidad total de conexiones en la red.

2.3.3 Distribución por demanda

En la tercera metodología se plantea la distribución del emisor global en proporción a la demanda asignada a cada nodo de demanda del modelo.

$$C_{e,i} = \frac{C_{e,global} q_n}{\sum q_T} \quad (40)$$

En donde $C_{e,global}$ equivale al emisor global de fugas, $C_{e,i}$ es el coeficiente emisor de fugas para el nudo i , q_n es la demanda asociada al nudo y $\sum q_T$ es la demanda total de la red.

2.4 Calibración del patrón de consumo de la demanda base

Para iniciar el proceso de calibración del patrón de consumo se deben calcular los coeficientes de consumo correspondientes a cada hora del día. El primer patrón de consumo será el utilizado durante el proceso de calibración del coeficiente emisor global de fugas.

Una de las consideraciones para la metodología empleada es que el caudal consumido en cada instante de tiempo tendrá como limitante el caudal de fuga simulado y el caudal inyectado medido. Lo que permitirá ajustar la demanda total al volumen de fugas obtenido en el proceso de calibración anterior referente al emisor global de fugas.

Cada uno de los coeficientes del patrón de consumo para los instantes t se definirán una vez obtenido el caudal de fuga simulado de manera indirecta luego de la primera simulación, a través de la siguiente ecuación:

$$C_c(t) = \frac{Q_{iny}(t) - Q_{f,sim}(t)}{Q_c} \quad (44)$$

- $C_c(t)$: coeficiente de consumo para cada instante t
- $Q_{iny}(t)$: caudal inyectado medido en el tiempo t
- Q_c : caudal de consumo
- $Q_{f,sim}(t)$: caudal de fugas simulado para el tiempo t

$$Q_{f,sim}(t) = Q_{T,sim}(t) - C_m(t)Q_c \quad (45)$$

- $Q_{f,sim}(t)$: caudal de fugas simulado para el tiempo t
- $Q_{T,sim}(t)$: caudal total simulado para el tiempo t
- $C_m(t)$: coeficiente de consumo estimado para el proceso de calibración el emisor global de fugas.
- Q_c : caudal de consumo

El objetivo de esta calibración es tener una precisión del $\pm 5\%$ o $\pm 10\%$ entre el caudal total inyectado medido y el caudal total simulado según lo establecido por la ECAC – AWWA (1999).

Finalmente se deberá evaluar si es necesario calibrar nuevamente el emisor global de fugas y hacerlo de así requerirse.

2.5 Calibración del emisor global de fugas después de su distribución espacial

En la metodología planteada por (Molina, 2014) se utiliza la ecuación de Germanopoulos para la distribución espacial de las fugas mediante el uso de un coeficiente de fuga por unidad de longitud de las tuberías de la red. Para el cálculo del caudal de fuga como se muestra la siguiente ecuación:

$$q_{F,i}(t) = \sum_{j=1}^{NT} B_{k,j} \frac{L_{j,i}}{2} [P_{\cdot i}(t)]^N \quad (46)$$

En donde $q_{F,i}(t)$ representa el caudal de fugas i para el instante de tiempo t , $B_{k,j}$ es el coeficiente de fuga por unidad de longitud en un sector k asignado a la tubería j del nodo i , $L_{j,i}$ es la longitud de la tubería j conectada al nodo i para un instante t , $P_{\cdot i}(t)$ es la presión en el nodo i para el instante t , N corresponde al exponente de fugas, el mismo que para este trabajo y el de (Molina, 2014) fue asumido como 0.5 y NT equivale al número de tuberías que llegan al nudo j .

El emisor de fugas de cada nodo se verá representado por la siguiente ecuación:

$$C_{e,i} = B_{k,j} \sum_{j=1}^{NT} \frac{L_{j,i}}{2} \quad (47)$$

El coeficiente de fuga por unidad de longitud se lo obtiene mediante la multiplicación del peso porcentual de fugas del sector k y el emisor global de fugas como se muestra a continuación

$$B_k = \frac{W_k C_{e,global}}{L_k} \quad (48)$$

El peso porcentual de fugas se lo obtiene haciendo una relación entre el indicador de fugas del sector k y la suma de todos los sectores del caso en estudio, así como se muestra a continuación

$$W_k = \frac{IF_k}{\sum_{k=1}^{NS} IF_k} \quad (49)$$

En donde W_k es el factor de ponderación del emisor global de fugas, IF_k es el indicador de fugas para el sector k y NS es el número de sectores definidos para el caso de estudio.

Haciendo una variación en la metodología planteada por (Molina, 2014) la distribución del emisor global de fugas previo a la distribución espacial no será de manera equitativa, sino que se utilizarán las metodologías propuestas desde la simulación 1.

A partir de la distribución espacial se introducirá un nuevo factor al cual se lo denomina indicador de fugas, el mismo que permitirá calcular el porcentaje de fuga que le corresponde a cada sector.

Este indicador de fugas dará paso al cálculo del peso porcentual de fugas para cada sector del caso de estudio.

A partir del uso del método de los caudales nocturnos se ha podido calcular el indicador de fugas, el mismo que define que el caudal nocturno está compuesto en mayor cantidad por fugas que por el consumo de los clientes, razón por la cual es ideal el cálculo de las fugas durante este periodo. Para la ciudad de Guayaquil se define que este caudal mínimo nocturno está presente de 2:00 am a 4:00 am.

Este indicador de fugas es resultado de la diferencia entre el caudal mínimo nocturno del sector k y la multiplicación del promedio de los coeficientes de consumo promedio en el horario mínimo nocturno y el caudal de consumo del sector k , todo esto dividido para la presión del sector antes del cierre de la válvula elevado al exponente de fugas que para nuestro caso de estudio será 0.5.

$$IF_k = \frac{Q_{CMN,k} - C\bar{c} \cdot Q_{C,k}}{(P_{CMN,k})^{0.5}} \quad (50)$$

En donde IF_k es el indicador de fugas del sector k , $Q_{CMN,k}$ es el caudal mínimo nocturno del sector k , $C\bar{c}$ es el promedio del coeficiente de consumo durante el caudal mínimo nocturno, $Q_{C,k}$ es el caudal de consumo del sector k y $P_{CMN,k}$ es la presión en el sector k antes del cierre de la válvula.

Una forma de poder obtener este indicador de fugas es la utilización de distritos de medición, a partir del cierre de válvulas de manera secuencial se podrá ir obteniendo el caudal de demanda total de cada sector efectuando una

resta entre el caudal total y el caudal de demanda después del cierre de cada válvula.

De tal forma que el emisor de fugas para cada nodo sería equivalente al producto entre el peso porcentual del indicador de fugas de cada sector, el peso porcentual de demanda, número de cuentas y número de nodos que corresponda a cada metodología para cada sector k ; y el emisor global de fugas.

2.6 Calibración de las pérdidas de carga en la red

Está dada por la pérdida de energía del flujo de agua provocada por la fricción con las paredes de las tuberías (pérdidas continuas), también por las uniones de estas o elementos reguladores que se presentan en las redes (pérdidas localizadas). Su cálculo se realiza mediante las expresiones mostradas a continuación:

Para pérdidas continuas

$$h_f = f \frac{Lv^2}{D2g} \quad (51)$$

Dónde:

- h_f = Energía pérdida constante
- f = Factor de fricción de Darcy
- L = Longitud de la tubería
- v = Velocidad media del flujo
- D = Diámetro de la tubería
- g = Gravedad

Para pérdidas localizadas

$$h_v = K_0 \frac{v^2}{2g} \quad (52)$$

Dónde:

- h_v = Energía perdida localizada
- K_0 = Coeficiente de pérdidas
- v = Velocidad media del flujo

- g = Gravedad

Las pérdidas localizadas pueden llegar a ser muy significativas, dependiendo del grado de apertura que posea la válvula, por lo que se es factible representar las pérdidas de carga de la red mediante la modificación del coeficiente K_0 .

En este trabajo de titulación se procederá a modificar los coeficientes de pérdida de las válvulas, las mismas que su vez son representadas a través de tuberías dentro del modelo, para poder ajustar la presión de los nodos de la red con los datos medidos en campo.

De acuerdo a (AWWA- ECAC Engineering Computer Applications Committee, 1999) los datos medidos y los datos simulados en cuanto a presión se refiere deben tener un error cuadrático medio de ± 1.4 mca o ± 3.5 mca dependiendo del propósito para el cual el modelo hidráulico fue construido.

2.7 Resumen del procedimiento de calibración

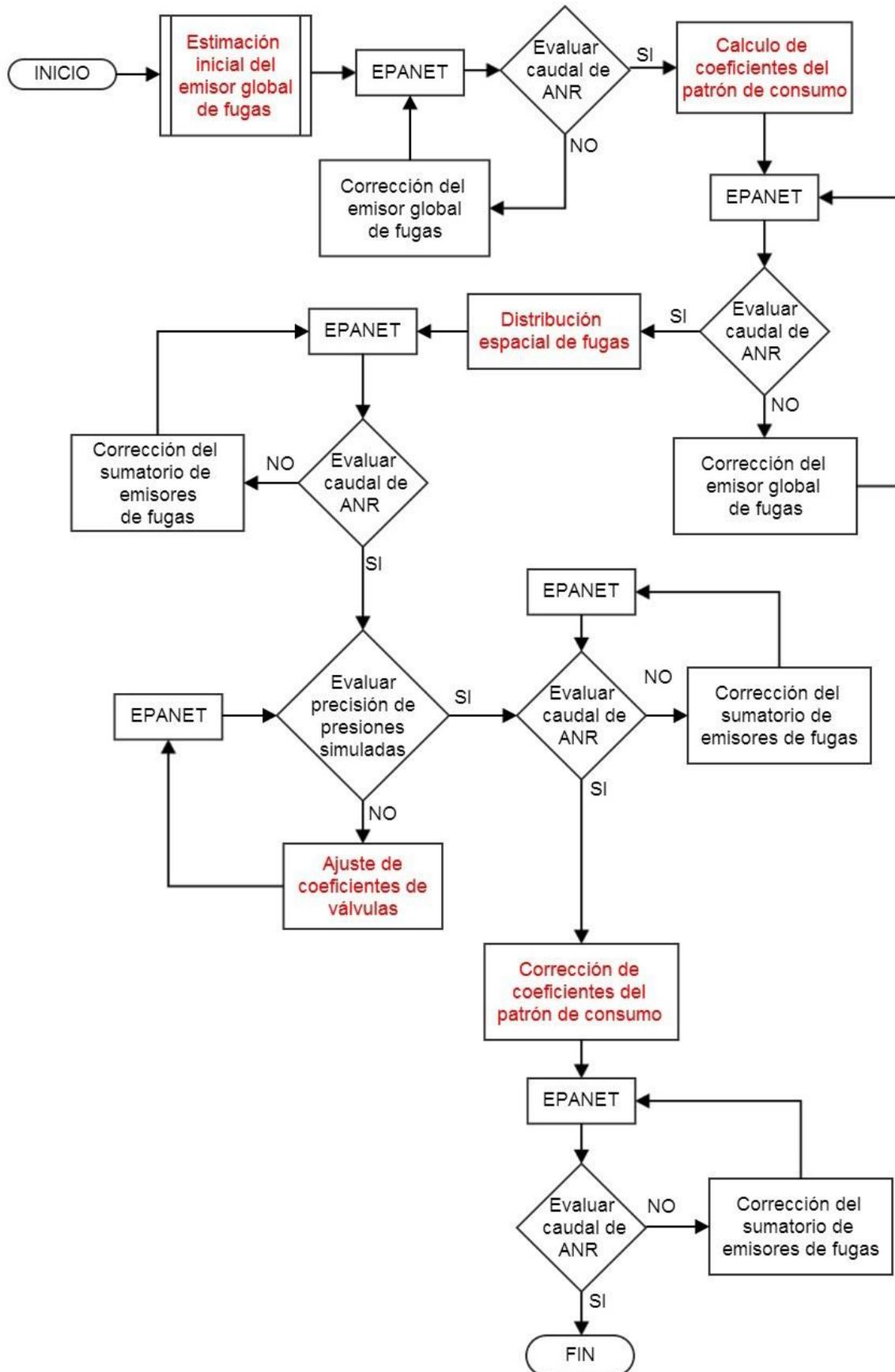
A continuación, se presenta el procedimiento para calibración de modelos hidráulicos junto con un diagrama de flujo referente a la metodología tomado de (Molina, 2014):

1. Tener listos los datos de calibración de manera tal en la que se asegure la mayor precisión posible. Proceder a la carga hidráulica del modelo asignando la demanda independiente de la presión a cada nodo junto con el patrón de consumos obtenido de la serie de datos del caudal inyectado.
2. Realizar la primera estimación del emisor global de fugas, obtener la presión promedio de la red mediante simulación hidráulica, distribuir espacialmente el emisor global de fugas usando las metodologías planteadas y simular nuevamente
3. Mediante la comparación entre el caudal teórico de agua no registrada y el caudal de fugas simulado se podrá evaluar la precisión del último mencionado. En caso de carecer de precisión se deberá utilizar un factor de corrección para el coeficiente emisor de fugas para luego repartirlo a todos los nodos mediante el uso de las

3 metodologías planteadas, este proceso se repetirá hasta que se cumplan con los criterios preestablecidos.

4. Calcular el nuevo patrón de consumo para la demanda base y asignar el patrón de consumo a todos los nodos de demanda para luego realizar una nueva simulación
5. Repetir paso 3
6. Distribuir espacialmente el coeficiente global de fugas entre los nodos del modelo, en función de las tres metodologías, equitativo entre todos los nodos, peso porcentual de la demanda de cada nodo y el peso porcentual del número de conexiones de cada nodo.
7. Nuevamente evaluar la precisión del caudal de fugas simulado comparándolo con el caudal de agua no registrada y en caso de no cumplirse usar un factor de corrección para el emisor global de fugas para finalmente volver a repartirlo a los nodos del modelo hidráulico.
8. Revisar la precisión de las presiones simuladas con las presiones obtenidas en campo y finalmente ajustar el coeficiente de pérdida de carga para las líneas de tubería hasta que se alcance el objetivo previamente establecido.
9. Repetir paso 7
10. Volver a calcular el patrón de consumo de la demanda base y asignarlo a los nodos del modelo.
11. Repetir paso 7

1 Diagrama de flujo de la metodología de calibración, Gráfico tomado de (Molina, 2014)



Capítulo 3

CASOS DE ESTUDIO

Los casos de estudio planteados en el presente trabajo están ubicados dentro de la ciudad de Guayaquil, pertenecientes al Ecuador. La empresa concesionada para supervisar el buen funcionamiento de los sistemas de Agua Potable en la urbe porteña es International Water Services Guayaquil (INTERAGUA LTDA).

Dicha empresa ha dividido el sistema de red de distribución de Agua Potable en seiscientos tres sectores hidráulicos, los cuáles fueron agrupados en catorce macrosectores. Se han desarrollado ochenta distritos de medición de caudal y presión, los mismos que permiten tener a tiempo real las variables mencionadas.

Los sectores hidráulicos escogidos para este proyecto representan mayor rendimiento volumétrico como el N72-M132 y uno que representa el rendimiento global del sistema o el N50-M31. El primero posee un rendimiento volumétrico del 77.7%, siendo el mayor en comparación con el segundo caso. El caudal medio inyectado al sistema es de 44.50 l/s, el caudal de consumo es de 34.56 l/s. Lo que da como resultado para este caso un caudal de agua no registrada de 9.94l/s.

A continuación, se detalla información general de los sectores que incluyen área, longitud de red, cantidad de acometidas, rendimiento volumétrico, indicador de pérdidas, caudal inyectado y la presión en los puntos de inyección.

Tabla 5: Información de los sectores de estudio 1

Distrito de medición	Area (Ha)	Longitud de red [Km]	No. de conexiones	Caudal promedio inyectado [l/s]	Volumen suministrado [m³/mês]	Rendimiento [%]	Indicador relativo de perdidas [l/s/Km]
N72-M132	95.9	34.83	5,672	44.50	89,580	77.7	8.57
N50-M31	180.8	39.94	3,312	144.55	154,631	41.3	63.83

Tabla 6: Información de los sectores de estudio 2

Distrito de Medición	Caudal inyectado [l/s]			Presión (en el punto de inyección) [mca]		
	Q_min	Q_med	Q_máx	P_min	P_med	P_máx
N72-M132	16.7	44.5	74.1	44.5	51.2	56.5
N50-M31	115.0	144.6	168.0	34.5	41.3	50.5

Se utilizaron 3 métodos de distribución del emisor global de fugas, equitativo, cantidad de conexiones y demanda siendo necesarias 9,8 y 9 simulaciones respectivamente para poder lograr la calibración del modelo.

3.1 Información comercial de los sectores de estudio

Dentro de la información comercial se incluye una base de datos en la cual tiene registros de facturación mensual y planos del catastro comercial, a eso se le añade ficheros SIG que tienen información de los abonados catastrados junto con la ubicación catastral de las parcelas con sus respectivos números de cuenta. En esta base de datos se detallan:

- Número o código de cuenta del abonado
- Nombre del abonado y dirección del predio
- Código del catastro comercial (ciclo – sector – ruta- manzana – secuencia – piso – departamento)
- Consumo mensual facturado
- Categoría de consumo (residencial, comercial, oficial e industrial)
- Tipo de facturación (DL= diferencia de lectura, PH= promedio histórico, CO= consumo cero, NF= no facturable)

Toda la información recopilada corresponde a un año completo medido de enero a diciembre del 2012. En este método de calibración utilizado por (Molina, 2014) define que el cálculo del caudal base a utilizar en los modelos debe ser obtenido a partir del promedio anual facturado por los abonados pero se presenta una variación considerable en el número de abonados activos por mes, para lo que se tomó como referencia el mes que poseía la mayor cantidad de abonados activos, siendo Diciembre del 2012 para el distrito N72-M132 y mayo del 2012 para N50-M31. A continuación se incluye información referente a la categoría de consumo, tipo de facturación y número de cuentas para cada distrito de estudio:

Tabla 7: Información comercial de los sectores de estudio 2

Distrito de Medición	Categoría de uso	No. cuentas activas	Volumen facturado por categoría [m ³ /mes]	Volumen por tipo de facturación [m ³ /mes]			
				C0	DL	NF	PH
N72-M132	Residencial	6,916	88,008	2,957	81,351	555	3,145
	Comercial	29	478	58	320	32	68
	Oficial	16	229	0	78	95	56
	Industrial	0	0	0	0	0	0
	<i>Sub-totales N72-M132</i>	6,961	88,715	3,015	81,749	682	3,269
<i>Porcentaje</i>				3 %	92 %	1 %	4 %
N50-M31	Residencial	3,358	84,828	3,912	74,548	1,985	4,383
	Comercial	413	20,777	1,454	18,368	838	1.170
	Oficial	137	46,061	3,639	41,455	856	111
	Industrial	1	1,051		1051	0	0
	<i>Sub-totales N50-M31</i>	3,909	153,770	9,005	135,422	3,679	5,664
<i>Porcentaje</i>				6 %	88 %	2 %	4 %

3.2 Descripción general de los modelos hidráulicos construidos

La construcción de los modelos hidráulicos se logró a través de los ficheros SIG y su procesamiento por medio del programa lector SHP v1.1, el cual permite convertir archivos shape a INP (EPANET). A continuación, se detalla información referente a los modelos hidráulicos construidos que incluye el número de tuberías, nodos y rango de elevación:

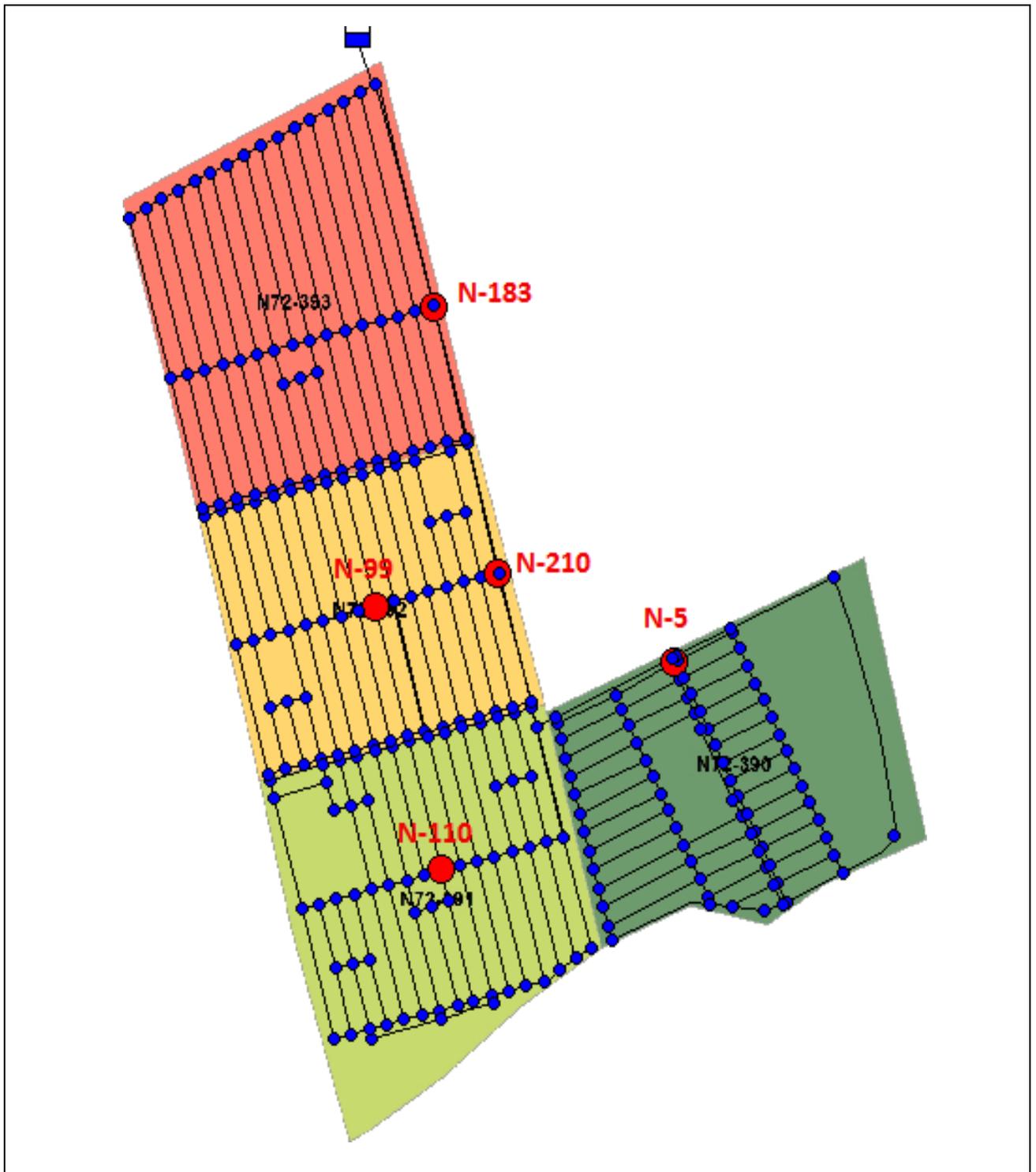
Tabla 8: Información descriptiva de los modelos hidráulicos

Distrito de Medición	No. líneas	Longitud tuberías [m]	No. nodos	No. nodos consumo	Cota Pto. Iny. [msnm]	Cota media [msnm]	Cota_min [msnm]	Cota_máx [msnm]
N72-M132	391	34,834	252	241	4.53	5.82	4.45	14.79
N50-M31	531	39,975	374	341	4.50	3.86	2.94	6.02

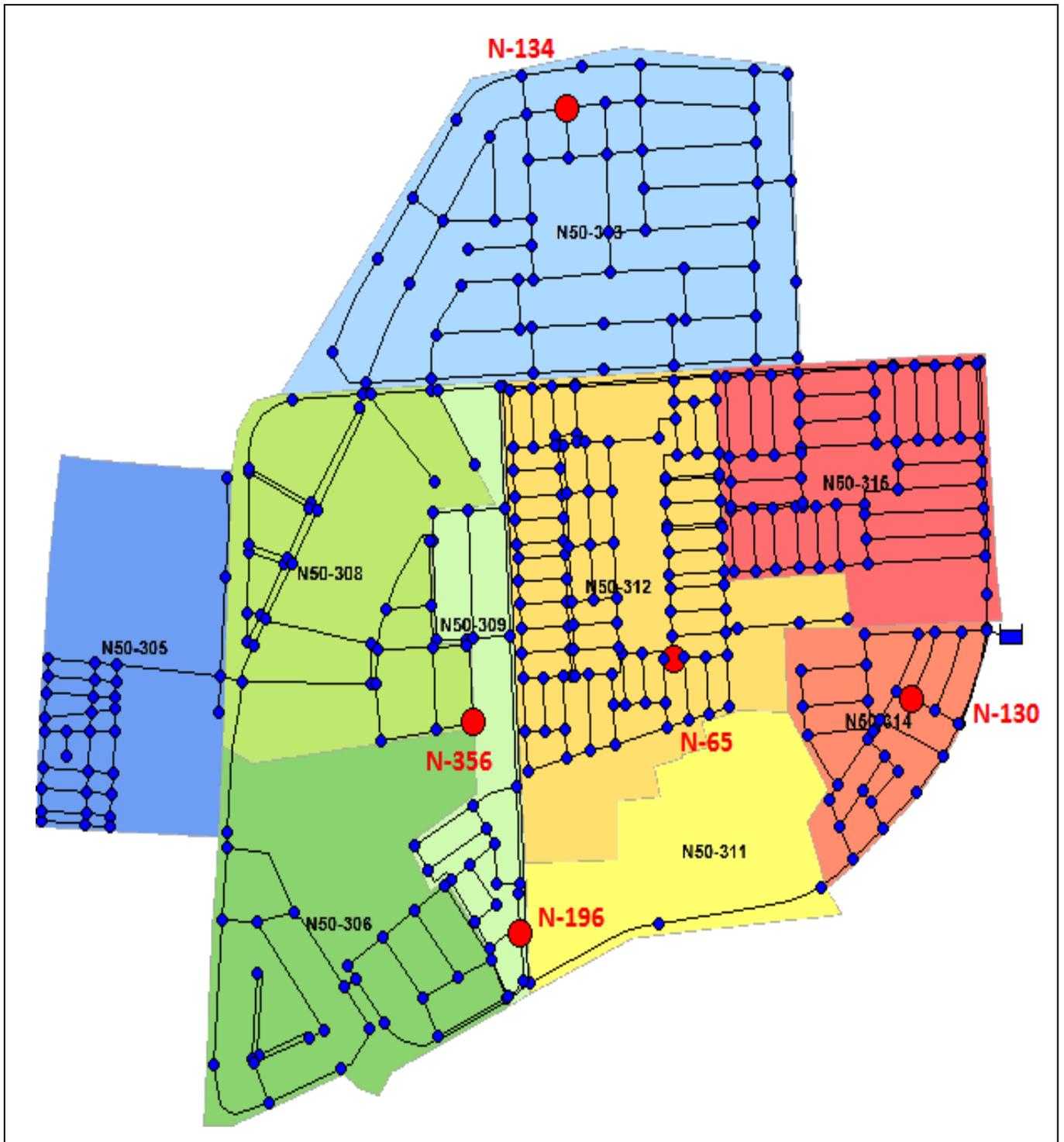
Para los casos de estudio, las válvulas han sido representadas a través de líneas de conducción en el programa EPANET puesto que cumplen funciones de corte de flujo y no de regulación. Para el caso del distrito N72-M132 no fue cerrada ninguna línea y en el distrito N50-M31 se cerraron siete válvulas.

En los siguientes gráficos se presentan esquemas de los modelos hidráulicos construidos en los cuáles se puede visualizar la sectorización hidráulica, los puntos de medición de presión y el punto de inyección que permitirán la calibración, éste último será representado a través de un depósito de agua al cuál se le asignará el patrón de consumo.

2 Distrito N72-M132, gráfico tomado de (Molina, 2014)



3 Distrito N50-M31, gráfico tomado de (Molina, 2014)



3.3 Datos de calibración

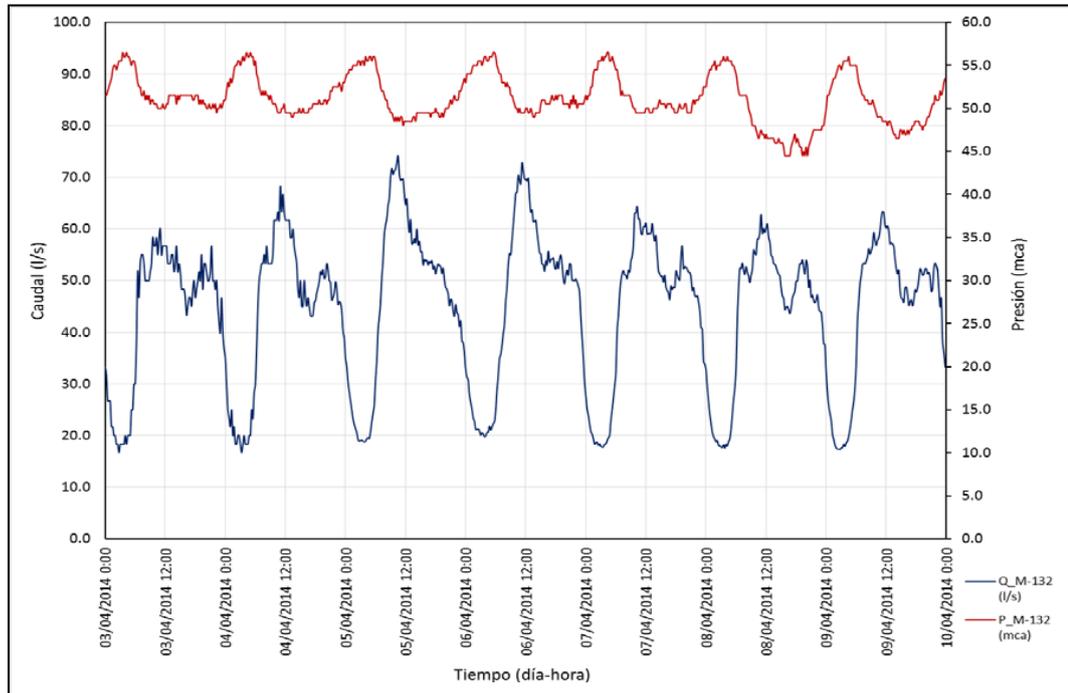
El registro de caudal y presión a utilizar fueron obtenidos mediante puntos estratégicos de medición ubicados en el punto de inyección de cada de distrito y puntos de aforo dentro de la red de distribución. Esta información fue recopilada durante campañas de medición de siete días con un intervalo de quince minutos. A continuación, se detalla la información recopilada en cada uno de estos puntos:

Tabla 9: Registro de caudal y presión por sector

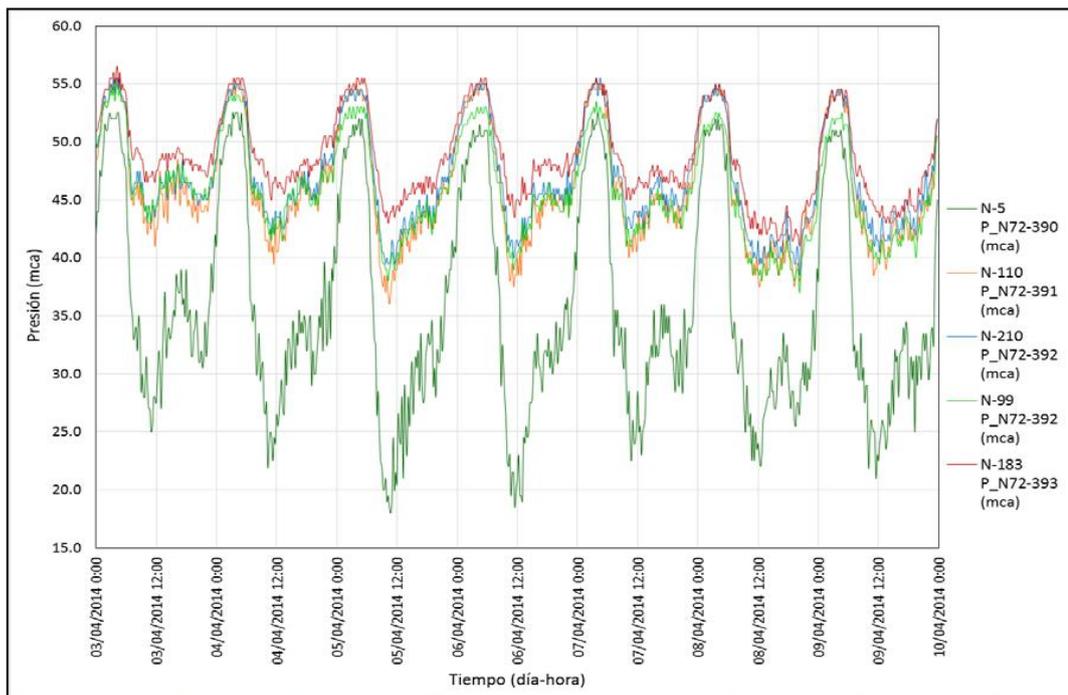
Distrito de Medición	Nudo EPANET	Parámetro medido	Valor Mínimo	Valor Medio	Valor Máximo
N72-M132	L-157	Caudal	16.7	44.5	74.1
	Embalse	Presión	44.5	51.2	56.5
	N-5	Presión	18.0	35.8	52.5
	N-99	Presión	37.0	45.9	55.0
	N-110	Presión	36.0	46.2	55.5
	N-183	Presión	47.0	48.7	56.5
	N-210	Presión	38.5	47.1	55.5
N50-M31	L-1	Caudal	115.0	144.6	168.0
	Embalse	Presión	34.5	41.3	50.5
	N-65	Presión	6.0	13.7	25.5
	N-130	Presión	32.5	38.6	47.5
	N-163	Presión	15.5	23.3	35.0
	N-196	Presión	22.5	29.5	40.0
	N-356	Presión	20.0	28.0	39.5
Los valores asociados a mediciones de caudal están expresados en l/s					
Los valores asociados a mediciones de presión están expresados en mca					

Ahora se presenta a continuación los gráficos correspondientes a las mediciones realizadas para la calibración de los modelos construidos:

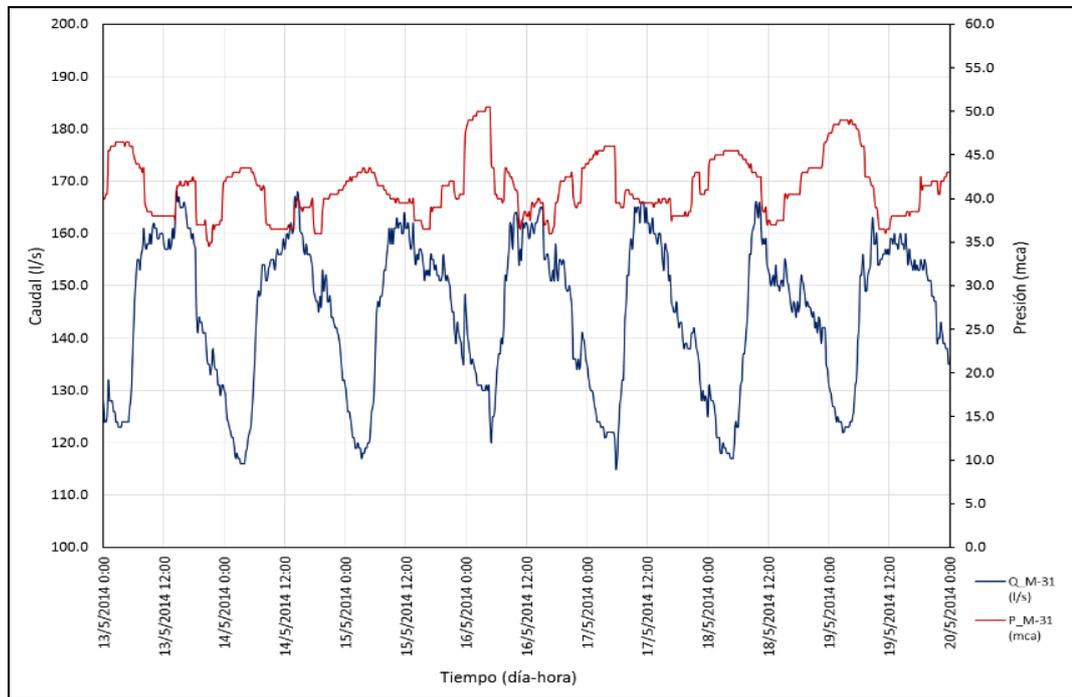
4 Caudal y presión registrados en el punto de inyección del Distrito de Medición N72-M132, Gráfico tomado de (Molina, 2014)



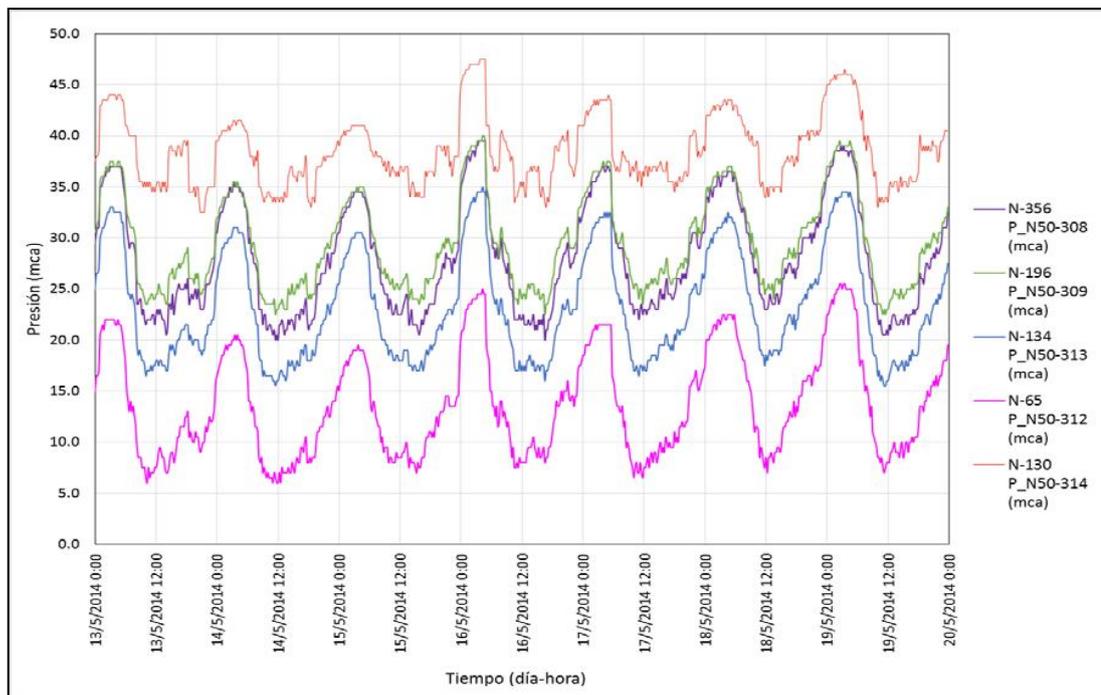
5 Presión registrada en la red del Distrito de Medición N72-M132, Gráfico tomado de (Molina, 2014)



6 Caudal y presión registrados en el punto de inyección del Distrito de Medición N50-M31, Gráfico tomado de (Molina, 2014)



7 Presión registrada en la red del Distrito de Medición N50-M31, Gráfico tomado de (Molina, 2014)



3.4 Carga de los modelos hidráulicos

La carga de los modelos hidráulicos se logró a través de los ficheros SIG y su concordancia con la base de datos de facturación. En los ficheros se identificaron los predios que carecían de códigos de cuentas para luego identificarlos en los planos de catastro comercial y así ubicarlos en la base de datos de facturación. Dentro de la base de datos se encontraron parcelas asociadas a un mismo número de cuenta, el mismo que no estaba asociado a ningún polígono del fichero de parcelas del SIG. Para solucionar dicho problema se partió de la información del código de catastro para poder obtener su ubicación espacial y posteriormente enlazarlo a cuenta que si poseía representación dentro del fichero SIG.

El consumo promedio anual del volumen facturado se obtuvo por diferencia de lectura (DL), que corresponde a 15.83 m³/ mes para el distrito N72-M132 y 25.9 m³/ mes para el distrito N50-M31; valores que se le fueron asignados para aquellos polígonos que no pudieron ser enlazados con ningún número de cuenta de la base comercial.

Se asignó un valor de consumo cero a aquellos polígonos correspondientes a hidrantes en ambos distritos de medición. Finalmente, el volumen suministrado a los abonados corresponde a la suma del volumen facturado asociado a los polígonos de los ficheros más el volumen definido en el párrafo anterior.

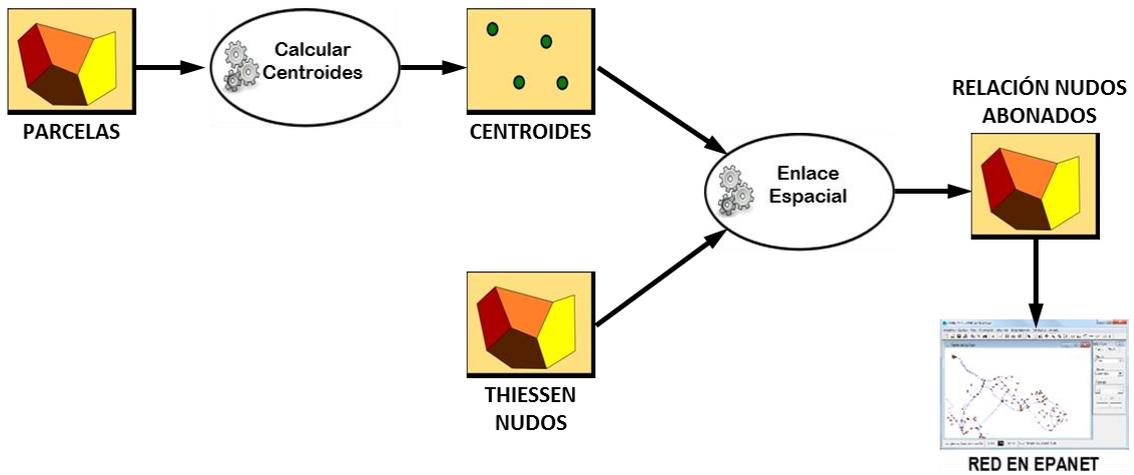
En la tabla mostrada a continuación se detalla el volumen suministrado a cada distrito de medición con sus componentes y la cantidad de cuentas activas:

Tabla 10: Volumen suministrado y cantidad de cuentas por distrito

Distrito de Medición	Volumen por facturación mensual [m3/mes]	No. Cuentas por facturación mensual	Volumen estimado de consumo [m3/mes]	No. Cuentas por estimación del consumo	Volumen suministrado [m3/mes]	No. Cuentas total
N72-M132	88,565	6,537	939	29	89,504	6,566
N50-M31	153,686	3,276	906	35	154,592.5	3,311

Para la asignación espacial de la demanda base, se asigna el consumo a cada parcela dentro del fichero SIG a través del comando “Join”, mediante un atributo en común de la base de datos cuentas y la base de datos gráfica predios ID_PREDIO. Luego de haber sido asignado los consumos a cada polígono, se procedió a representar el punto de demanda en cada parcela previamente calculando su centroide. Se procedió a acumular las demandas asociadas a cada nodo de demanda del modelo a través de la relación definida entre los polígonos de Thiessen asociados a los nudos de consumo y los nudos del modelo hidráulico con los abonados. Lo cual puede explicarse de mejor manera en la gráfica de a continuación:

8 Pasos para asignación de demanda base y consumos al modelo hidráulico en EPANET, Gráfico tomado de (Molina, 2014)



3.5 Aplicación de la metodología de calibración

3.5.1 Caso 1: distrito de medición N72-M132

Como ya lo indica la metodología, en la simulación 0 se procedió a obtener la presión media del modelo y así poder calcular el emisor global de fugas para la simulación 1 el cual fue de $1.4274 \frac{l}{s.m.c.a^{0.5}}$ para luego poder repartirlo en función de las tres metodologías planteadas a los 251 nudos existentes en el modelo.

A continuación, se presenta la variación en la convergencia de los datos de caudal medido y simulado de los 3 métodos:

Tabla 11: Simulación de distrito de medición equitativo N72-M132

Equitativo				
Simulación	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio	Proceso de calibración realizado
Simulación 0	34.56	9.942	10.479	Simulación para estimar emisor global de fugas
Simulación 1	44.41	3.065	3.629	Primera simulación con emisor global de fugas
Simulación 2	44.51	3.034	3.631	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 3	44.51	3.034	3.631	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 4	44.51	0.019	0.024	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 5	44.52	0.024	0.03	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 6	44.52	0.028	0.034	Distribución espacial de emisores de fugas
Simulación 7	43.87	0.637	0.733	Ajuste de coeficientes de pérdida en válvulas
Simulación 8	44.49	0.343	0.418	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 9	44.52	0.339	0.421	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas

Tabla 12: Simulación de distrito de medición por demanda N72-M132

Demanda				
	Valor medio	Error	Error	
Simulación	simulado	medio absoluto	cuadrático medio	Proceso de calibración realizado
Simulación 0	34.56	9.942	10.479	Simulación para estimar emisor global de fugas
Simulación 1	44.43	3.053	3.623	Primera simulación con emisor global de fugas
Simulación 2	44.51	3.029	3.625	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 3	44.51	0.018	0.023	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 4	44.52	0.024	0.028	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 5	44.51	0.027	0.034	Distribución espacial de emisores de fugas
Simulación 6	44.52	0.03	0.037	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 7	43.85	0.647	0.746	Ajuste de coeficientes de pérdida en válvulas
Simulación 8	44.48	0.351	0.428	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 9	44.52	0.347	0.431	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas

Tabla 13: Simulación de distrito de medición por número de conexiones N72-M132

Número de consumidores				
	Valor medio	Error	Error	
Simulación	simulado	medio absoluto	cuadrático medio	Proceso de calibración realizado
Simulación 0	34.56	9.942	10.479	Simulación para estimar emisor global de fugas
Simulación 1	44.43	3.053	3.622	Primera simulación con emisor global de fugas
Simulación 2	44.51	3.029	3.625	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 3	44.51	0.018	0.023	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 4	44.52	0.023	0.028	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 5	44.51	0.028	0.035	Distribución espacial de emisores de fugas
Simulación 6	43.85	0.647	0.746	Ajuste de coeficientes de pérdida en válvulas
Simulación 7	44.48	0.351	0.427	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 8	44.52	0.346	0.43	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas

Para el proceso de calibración de las perdidas menores en las tuberías se utilizaron los coeficientes de pérdida detallados a continuación:

Tabla 14: Descripción del coeficiente de pérdidas del distrito N72-M132

Línea	Diámetro (mm)	Coefficientes de pérdidas	Sector hidráulico	Tipo de válvula
L-141	160	625	N72-390	abastecimiento
L-91	11	600	N72-390	abastecimiento
L-296	160	150	N72-392	abastecimiento
L-390	160	150	N72-391	abastecimiento
L-388	160	25	N72-393	abastecimiento
L-56	160	cerrada	N72-390	interna

Para la repartición espacial de fugas se utilizará los factores de ponderación, los mismos que se obtuvieron a través de las pruebas de medición realizadas en los distritos. Para poder determinar el caudal de consumo nocturno se utilizó un factor de 0.2442.

Tabla 15: Descripción de caudal de consumo nocturno del distrito N72-M132

SECTOR HIDRAULICO	PRUEBA DE STEP TEST	USO NOCTURNO & FUGAS	FACTOR DE PONDERACIÓN			
Sector	Caudal nocturno (l/s)	Presión (mca)	Uso nocturno estimado (l/s)	Caudal de fugas (l/s)	Indicador de fugas $\left(\frac{l}{s} \cdot \frac{1}{mca^{0.5}}\right)$	Factor de ponderación %
N72-390	9.70	40.0	2.37	7.33	1.16	42.02%
N72-391	6.30	52.0	1.54	4.76	0.66	23.94%
N72-392	4.20	54.0	1.03	3.17	0.43	15.66%
N72-393	4.30	53.0	1.05	3.25	0.45	16.18%
ACUEDUCTO	0.45	56.0	0.00	0.45	0.06	2.20%
					2.76	100%

Las reparticiones de las perdidas menores en las tuberías permitirán calibrar la presión simulada con la presión medida en sitio, a continuación, se muestra una tabla mostrando la variación entre la simulación 1 y la última de cada método.

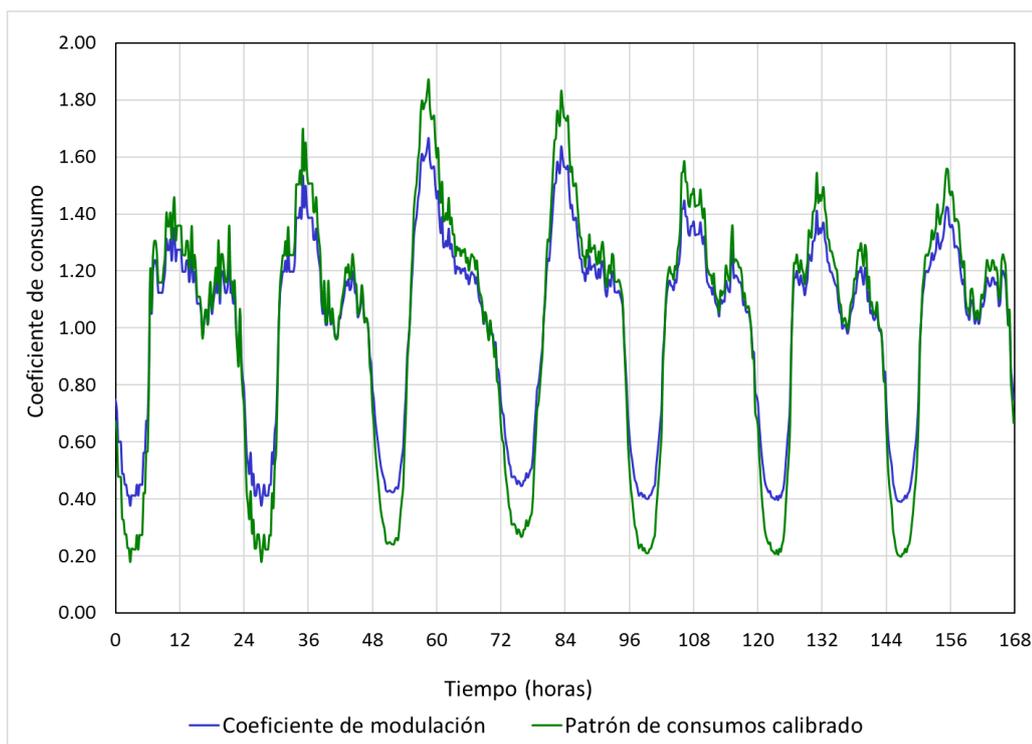
En la metodología equitativa fueron necesarias 9 simulaciones en las que las 3 primeras simulaciones tuvieron como propósito calibrar el emisor global para luego calibrar el patrón de consumo en la simulación 4, en la simulación 6 se realizó la distribución espacial de las fugas, en la simulación 7 se procedió a ajustar las perdidas en las tuberías para que finalmente en la simulación 9 se obtenga el modelo calibrado con un emisor global de $1.5463 \frac{l}{s \cdot mca^{0.5}}$. Las demás simulaciones se efectuaron para poder calibrar el emisor global de

fugas ya que se produjo una variación significativa entre el caudal medido y el simulado. En la metodología referente al número de conexiones fueron necesarias 8 simulaciones para lograr la calibración, en la simulación 3 se procedió a ajustar el patrón de consumo, en la simulación 5 se efectuó la distribución espacial de fugas usando el índice de fugas, en la simulación 6 se realizó el ajuste de las pérdidas menores en las válvulas, el resto de simulaciones se efectuaron para poder calibrar el emisor global de fugas, teniendo como resultado en la última simulación un emisor global de $1.5508 \frac{l}{s.m.c.a^{0.5}}$.

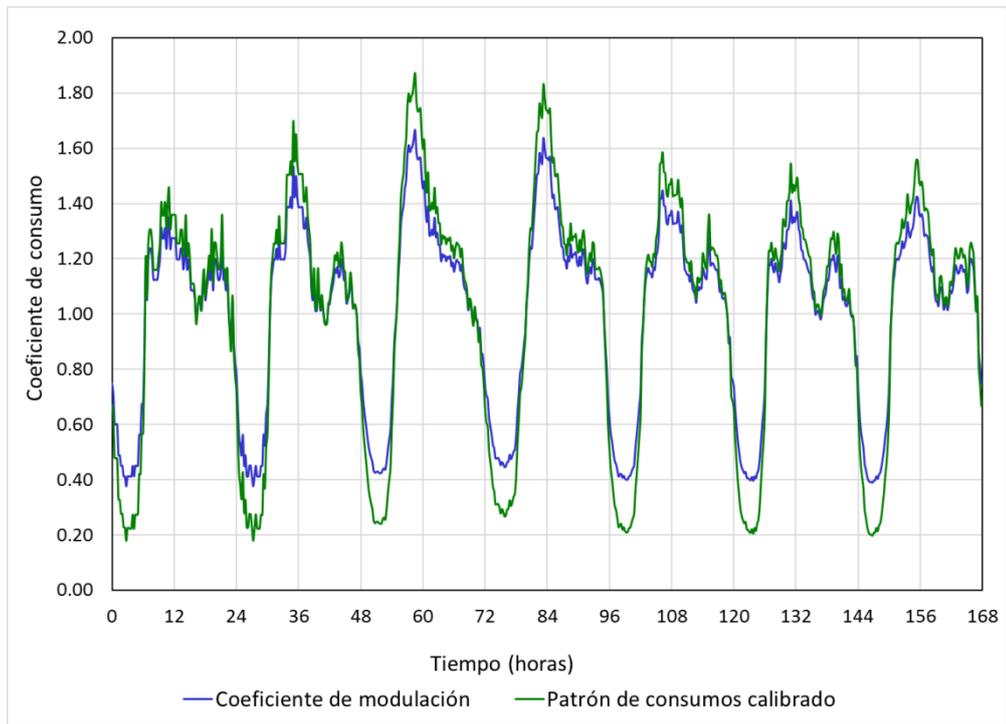
En el caso de la metodología de repartición por demanda fueron necesarias 9 simulaciones de las cuales en la simulación 3 se produjo el ajuste del patrón de consumo, en la simulación 5 se realizó la distribución espacial de fugas, en la simulación 7 se ajustaron las pérdidas menores en las válvulas, el resto de simulaciones tuvieron como objetivo ajustar el emisor global de fugas para obtener en la simulación 9 uno de $1.5512 \frac{l}{s.m.c.a^{0.5}}$.

A continuación, se muestra una gráfica que indica la variación entre el primer patrón utilizado y el corregido de los 3 métodos.

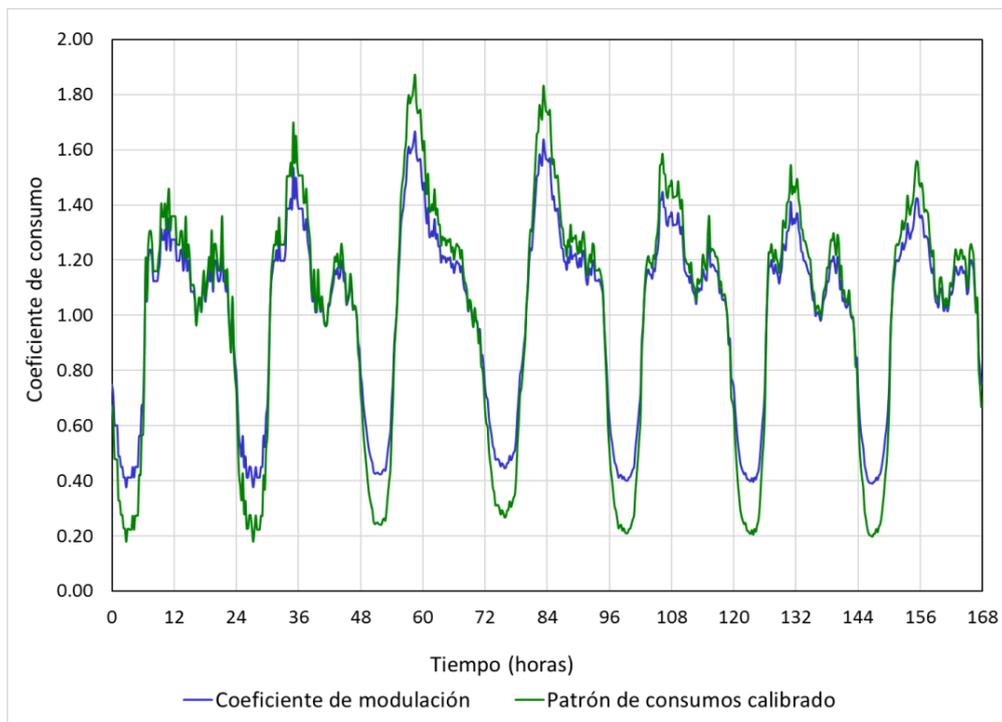
9 Distribución equitativa N72-M132



10 Distribución por demanda N72-M132



11 Distribución por número de conexiones N72-M132



La variación entre la presión simulada y la observada en campo se ve afectada de gran manera luego de ajustar los coeficientes de pérdida en las válvulas:

Metodología	Simulación	Nudo	Valor medio observaciones	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio
Equitativo	Simulación 1	N-5	35.77	48.19	12.414	13.859
		N-110	46.16	47.92	1.911	2.389
		N-210	47.05	48.71	1.736	2.096
		N-99	45.91	48.11	2.225	2.49
		N183	48.73	49.4	0.84	1.032
	Simulación 9	N-5	35.77	35.17	1.507	1.911
		N-110	46.16	45.71	0.664	0.836
		N-210	47.05	46.71	0.534	0.674
		N-99	45.91	46.12	0.78	0.959
		N183	48.73	48.72	0.411	0.506
Número de conexiones	Simulación 1	N-5	35.77	48.3	12.526	13.968
		N-110	46.16	48.02	1.983	2.473
		N-210	47.05	48.76	1.777	2.139
		N-99	45.91	48.15	2.258	2.523
		N183	48.73	49.39	0.838	1.03
	Simulación 8	N-5	35.77	35.09	1.536	1.939
		N-110	46.16	45.71	0.665	0.837
		N-210	47.05	46.71	0.534	0.673
		N-99	45.91	46.12	0.78	0.959

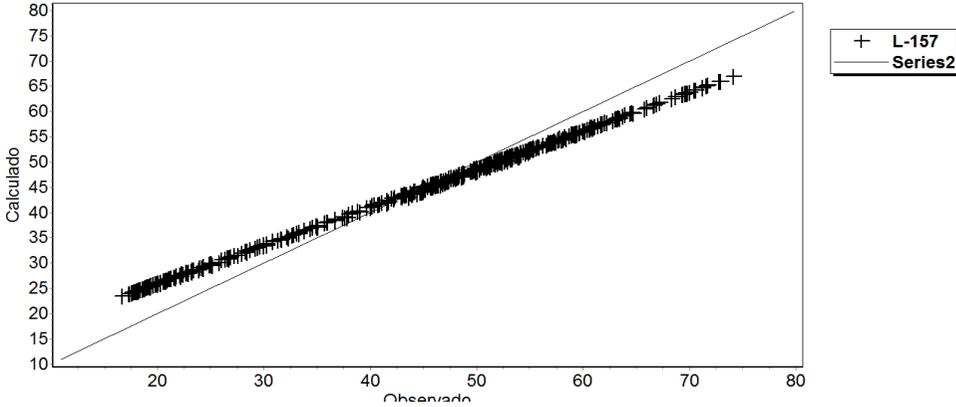
		N183	48.73	48.72	0.411	0.506
Demanda	Simulación 1	N-5	35.77	48.28	12.507	13.949
		N-110	46.16	48.01	1.98	2.469
		N-210	47.05	48.76	1.775	2.137
		N-99	45.91	48.15	2.266	2.531
		N183	48.73	49.39	0.838	1.03
	Simulación 9	N-5	35.77	35.06	1.545	1.949
		N-110	46.16	45.71	0.664	0.837
		N-210	47.05	46.71	0.534	0.673
		N-99	45.91	46.12	0.78	0.959
		N183	48.73	48.72	0.411	0.506

Tabla 16: Ajuste de coeficiente de pérdidas en válvulas del distrito N72-M132

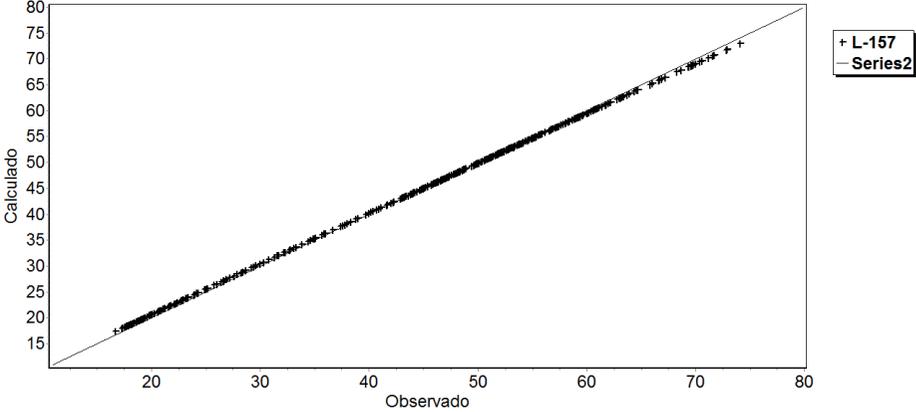
La corrección del patrón de consumo nos permite calibrar el caudal simulado con el observado, a continuación, se muestran gráficos de correlación en la primera y última simulación de caudal y presión.

12 Gráfico de correlación de caudal - Distribución equitativa N72-M132

Simulación 1

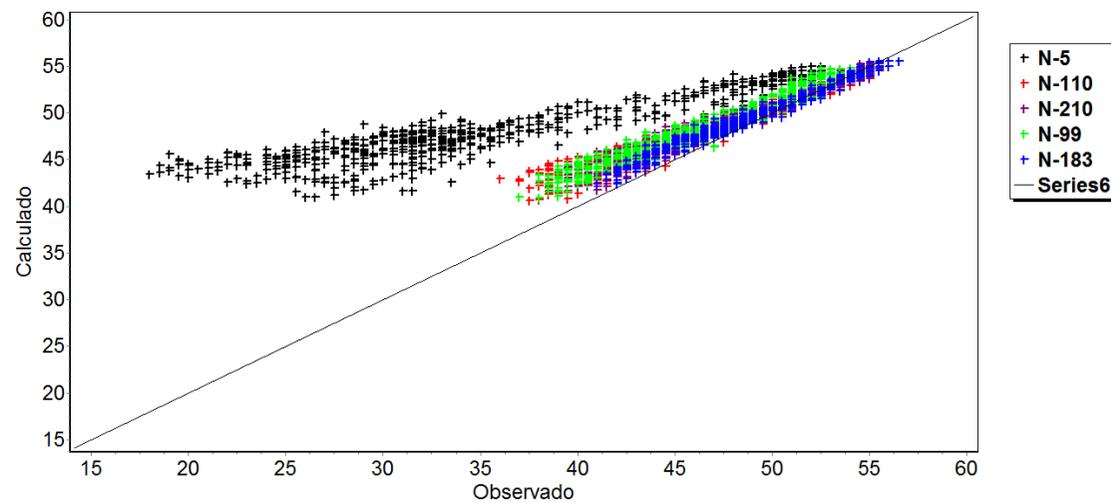


Simulación 9

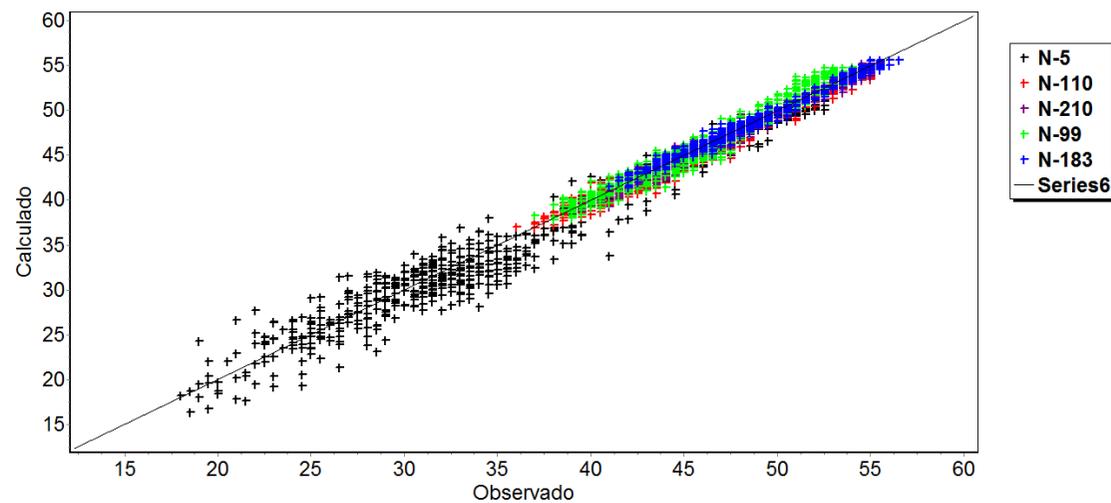


13 Gráfico de correlación de presión - Distribución equitativa N72-M132

Simulación 1

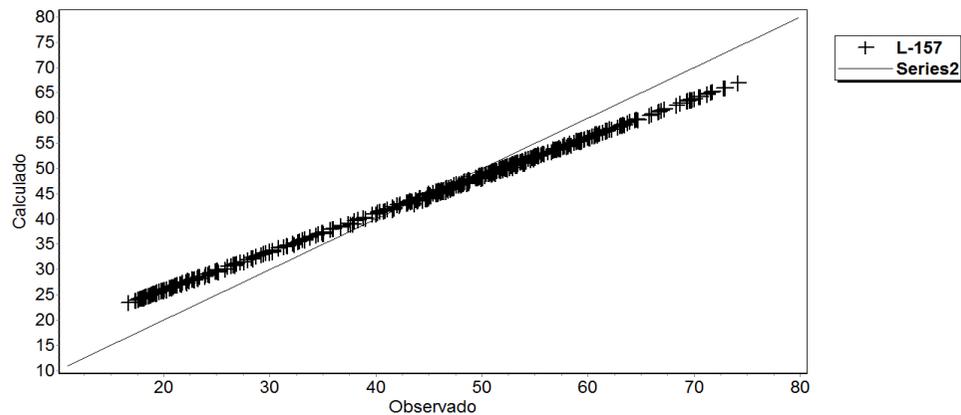


Simulación 9

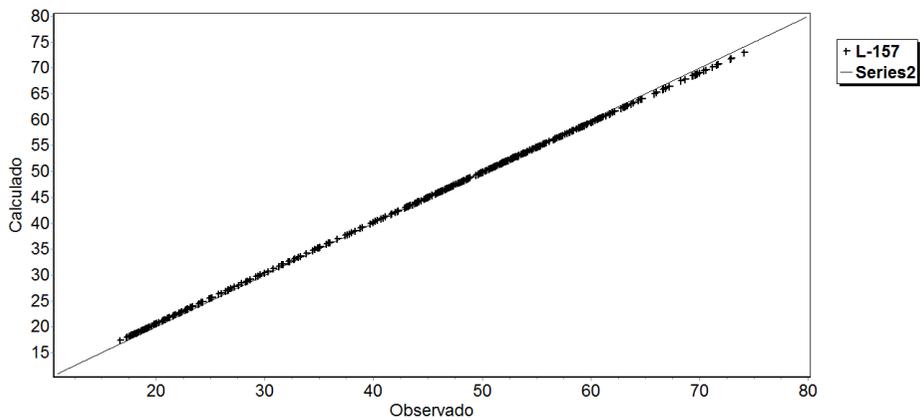


14 Gráfico de correlación de caudal – Distribución por demanda N72-M132

Simulación 1

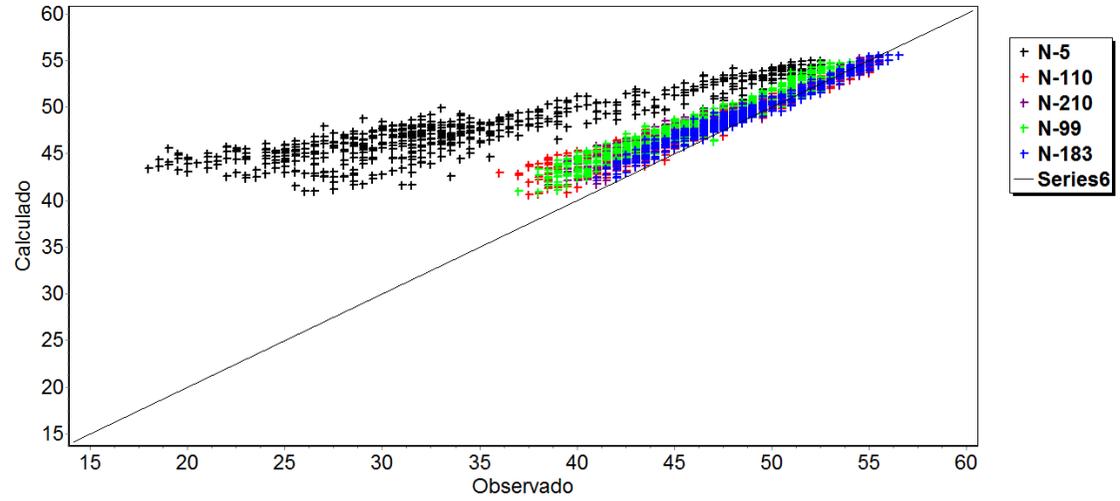


Simulación 9

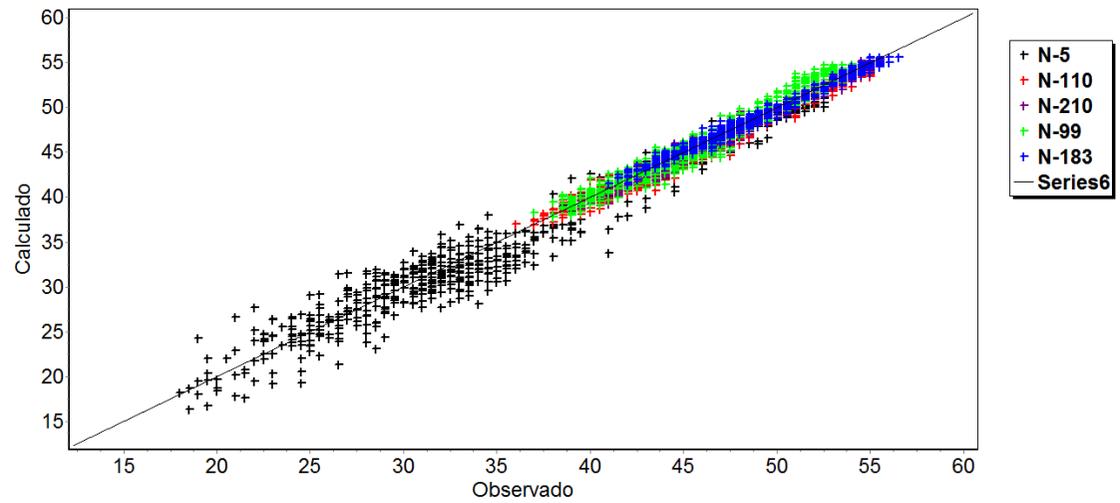


15 Gráfico de correlación de presión - Distribución por demanda N72-M132

Simulación 1

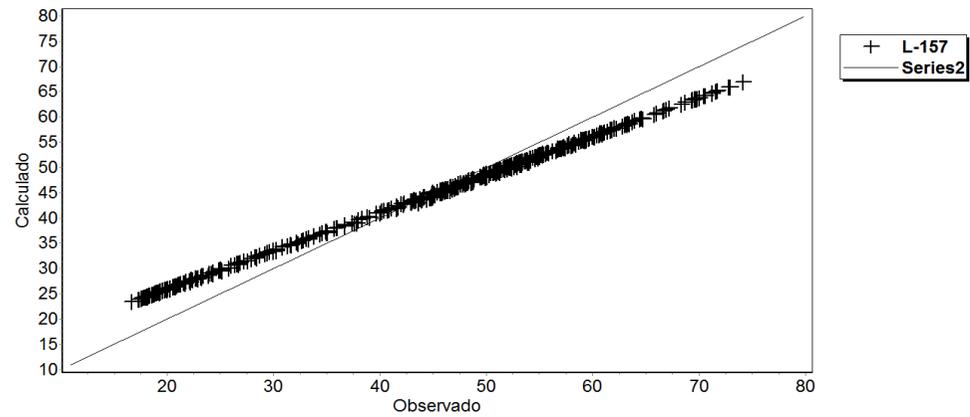


Simulación 9

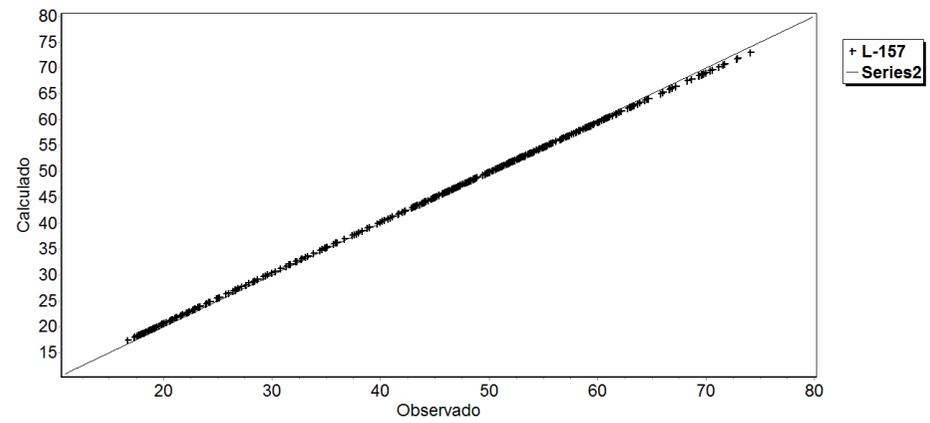


16 Gráfico de correlación de caudal - Distribución por número de conexiones N72-M132

Simulación 1

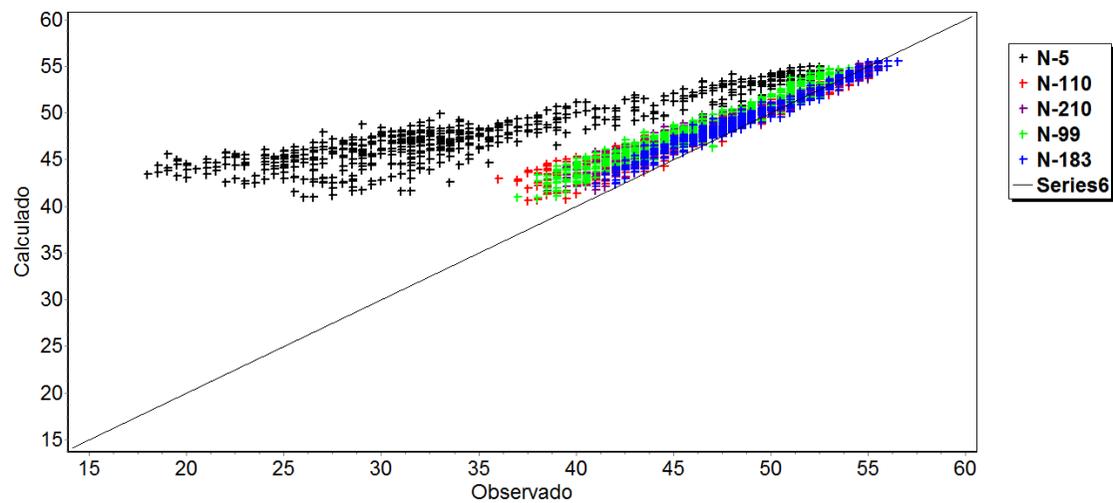


Simulación 8

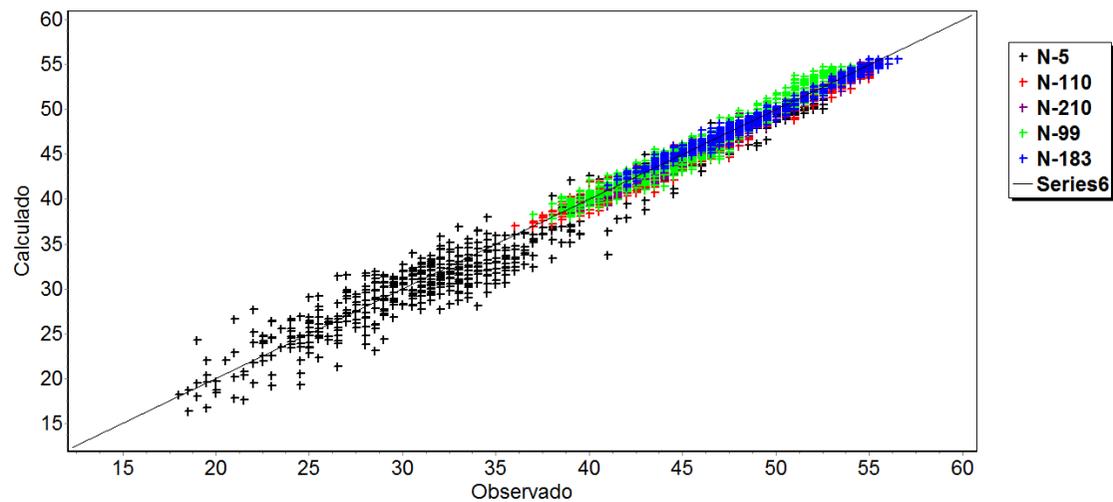


17 Gráfico de correlación de presión - Distribución por número de conexiones N72-M132

Simulación 1

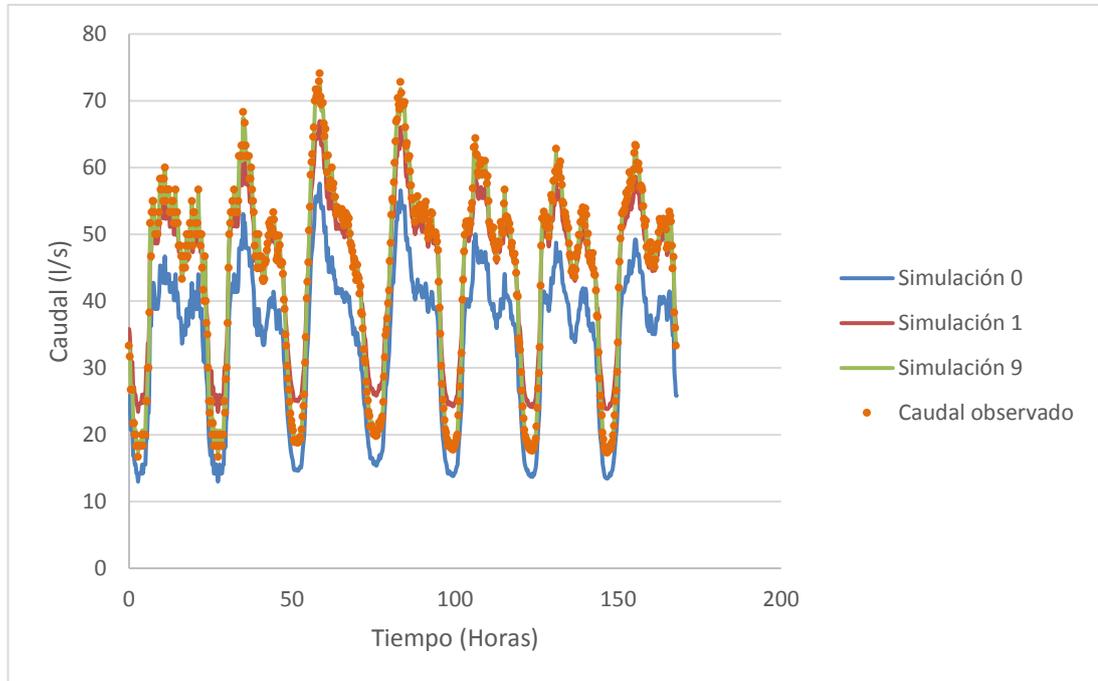


Simulación 8

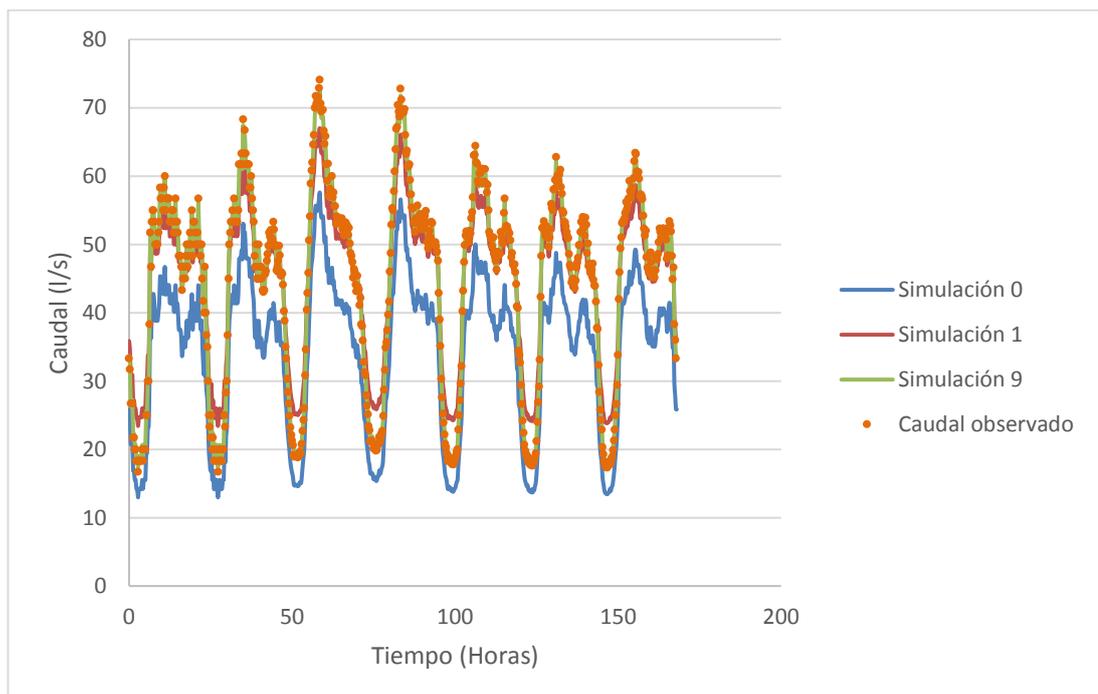


En la gráfica que se muestra a continuación se observa la variación del caudal de la simulación 0, 1, 9 y el caudal observado, lo que permitirá observar su variación hasta la calibración final del modelo.

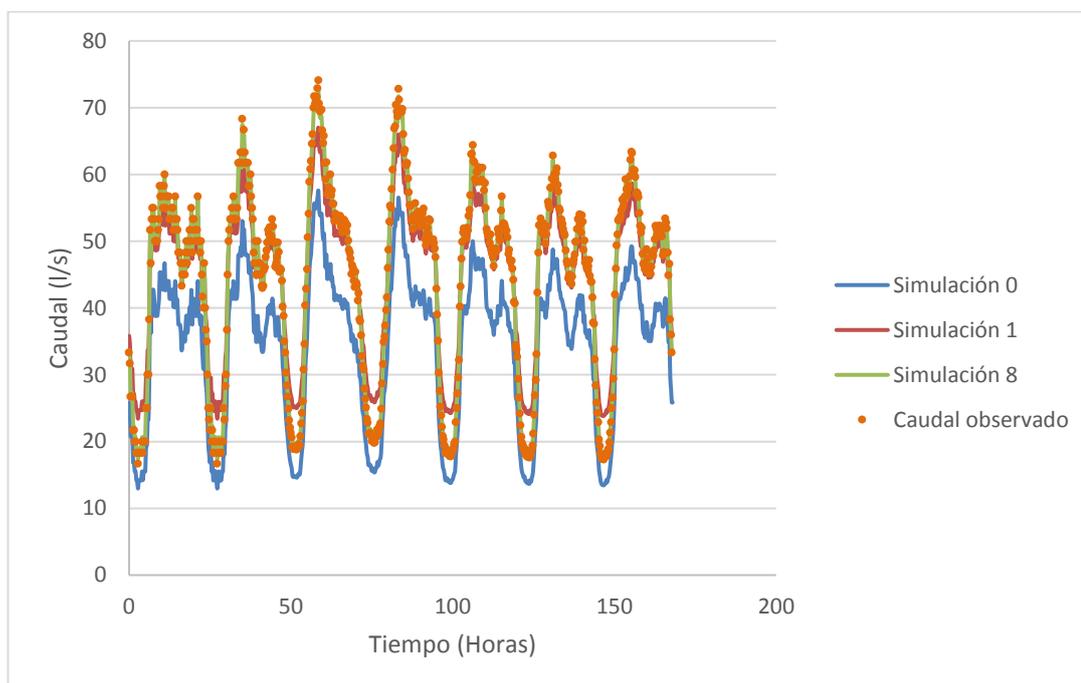
18 Variación de caudal - Distribución equitativa N72-M132



19 Variación de caudal - Distribución por demanda N72-M132



20 Variación de caudal - Distribución por número de conexiones N72-M132



3.5.2 Caso 2: distrito de medición N50-M31

Este caso de estudio posee algunas variantes en comparación con el anterior, el rendimiento volumétrico es más bajo, siendo del 41.3%. Es un sector más grande, el modelo está conformado por 374 nodos. En las 3 metodologías empleadas se requirió de 17 simulaciones para poder lograr la calibración del modelo. El caudal inyectado promedio del distrito es de 144.5 l/s, tres veces mayor al caso anterior.

A partir de la simulación 0 se obtuvo la presión media de la red y se obtuvo la estimación del primer emisor global de fugas de $13.2198 \frac{l}{s.m.c.a^{0.5}}$ para después ser repartido de acuerdo a las 3 metodologías planteadas.

A continuación, se presenta la variación en la convergencia de los datos de caudal medido y simulado de los 3 métodos:

Tabla 17: Desviación entre los valores medidos y simulados de caudal método equitativo N50-M31

Simulación	Equitativo			Proceso de calibración realizado
	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio	
Simulación 0	59.68	84.872	85.291	Simulación para estimar emisor global de fugas
Simulación 1	141.19	10.4	11.587	Primera simulación con emisor global de fugas
Simulación 2	144.37	9.75	11.214	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 3	144.55	9.729	11.219	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 4	144.55	9.729	11.219	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 5	144.52	0.487	0.554	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 6	144.57	0.483	0.556	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 7	144.5	0.492	0.558	Distribución espacial de emisores de fugas
Simulación 8	144.57	0.486	0.56	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 9	134.09	10.46	10.779	Ajuste de coeficientes de pérdida en válvulas
Simulación 10	142.54	3.506	3.953	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 11	144.16	3.159	3.581	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 12	144.49	3.136	3.593	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 13	144.49	3.136	3.593	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 14	144.57	3.133	3.6	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 15	144.47	0.663	0.752	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 16	144.55	0.665	0.757	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 17	144.57	0.666	0.759	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas

Tabla 18: Desviación entre los valores medidos y simulados de caudal- método por demanda N50-M31

Simulación	Demanda			Proceso de calibración realizado
	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio	
Simulación 0	59.68	84.872	85.291	Simulación para estimar emisor global de fugas
Simulación 1	141.79	10.215	11.415	Primera simulación con emisor global de fugas
Simulación 2	144.44	9.708	11.176	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 3	144.56	9.693	11.18	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 4	144.51	0.436	0.495	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 5	144.57	0.431	0.496	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 6	143.91	0.721	0.85	Distribución espacial de emisores de fugas
Simulación 7	144.54	0.511	0.584	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 8	144.57	0.509	0.586	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 9	134.15	10.405	10.72	Ajuste de coeficientes de pérdida en válvulas
Simulación 10	142.57	3.468	3.909	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 11	144.17	3.128	3.547	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 12	144.49	3.106	3.559	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 13	144.56	3.104	3.564	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 14	144.57	3.104	3.566	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 15	144.48	0.679	0.77	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 16	144.55	0.681	0.775	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 17	144.57	0.682	0.777	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas

Tabla 19: Desviación entre los valores medidos y simulados de caudal- método por número de conexiones N50-M31

Simulación	Número de consumidores			Proceso de calibración realizado
	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio	
Simulación 0	59.68	84.872	85.291	Simulación para estimar emisor global de fugas
Simulación 1	141.22	10.389	11.576	Primera simulación con emisor global de fugas
Simulación 2	144.37	9.746	11.209	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 3	144.55	9.724	11.214	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 4	144.56	9.723	11.215	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 5	144.49	12.577	14.384	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 6	144.57	0.48	0.552	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 7	144.49	0.488	0.553	Distribución espacial de emisores de fugas
Simulación 8	144.57	0.481	0.554	Ajuste del emisor global de fugas
Simulación 9	134.12	10.427	10.743	Ajuste de coeficientes de pérdida en válvulas
Simulación 10	142.56	3.477	3.919	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 11	144.17	3.133	3.553	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 12	144.49	3.111	3.564	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 13	144.55	3.109	3.57	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 14	144.57	3.108	3.571	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 15	144.48	0.68	0.772	Ajuste y simulación del patrón de consumo
Simulación 16	144.55	0.682	0.777	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas
Simulación 17	144.57	0.683	0.779	Ajuste de sumatoria de emisores de fugas

Para el proceso de calibración de las perdidas menores en las tuberías se utilizaron los coeficientes de pérdida detallados a continuación:

Tabla 20: Descripción del coeficiente de pérdidas del distrito N50-M31

Línea	Diámetro [mm]	Coefficientes de pérdidas	Sector hidráulico	Tipo de válvula
L-141	250	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-229	300	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-231	400	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-332	300	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-529	400	50	ACUEDUCTO	seccionamiento
L-109	250	350	N50-308	abastecimiento
L-67	250	320	N50-308	interna
L-441	200	320	N50-308	interna
L-371	100	15	N50-309	abastecimiento
L-35	80	250	N50-312	interna
L-42	80	250	N50-312	interna
L-47	80	250	N50-312	interna
L-51	80	250	N50-312	interna
L-53	150	250	N50-312	interna
L-55	100	250	N50-312	interna
L-116	80	250	N50-312	interna
L-126	80	250	N50-312	interna

L-127	100	250	N50-312	interna
L-128	80	250	N50-312	interna
L-133	80	250	N50-312	interna
L-211	100	250	N50-312	interna
L-269	80	250	N50-312	interna
L-272	80	250	N50-312	interna
L-280	80	250	N50-312	interna
L-320	100	250	N50-312	interna
L-322	80	250	N50-312	interna
L-327	100	250	N50-312	interna
L-362	80	250	N50-312	interna
L-363	100	250	N50-312	interna
L-375	100	250	N50-312	interna
L-381	80	250	N50-312	interna
L-384	80	250	N50-312	interna
L-403	100	250	N50-312	interna
L-436	100	250	N50-312	interna
L-57	150	165	N50-312	abastecimiento
L-144	90	170	N50-314	abastecimiento
L-338	110	170	N50-314	abastecimiento
L-147	150	50	N50-315	abastecimiento
L-9	80	200	N50-313	interna
L-23	80	200	N50-313	interna
L-34	80	200	N50-313	interna
L-80	80	200	N50-313	interna
L-111	80	200	N50-313	interna
L-179	80	200	N50-313	interna
L-235	80	200	N50-313	interna
L-257	100	200	N50-313	interna
L-354	80	200	N50-313	interna
L-366	80	200	N50-313	interna
L-399	80	200	N50-313	interna
L-502	80	200	N50-313	interna
L-503	100	200	N50-313	interna
L-505	80	200	N50-313	interna
L-39	100	150	N50-313	interna
L-104	80	150	N50-313	interna
L-506	100	150	N50-313	interna
L-310	150	80	N50-313	abastecimiento

Para poder realizar la distribución espacial de fugas en la red, se usó un factor de uso nocturno equivalente a 0.5343, el cual se utilizó para poder obtener los factores de ponderación de cada sector para la asignación de fugas. A continuación, se presentan los caudales nocturnos junto con el factor de ponderación de cada sector.

Tabla 21: Descripción de caudal de consumo nocturno del distrito N50-M31

SECTOR HIDRAULICO	PRUEBA DE STEP TEST		USO NOCTURNO & FUGAS		FACTOR DE PONDERACIÓN	
	Caudal nocturno (l/s)	Presión (mca)	Uso nocturno estimado (l/s)	Caudal de fugas (l/s)	Indicador de fugas (l/s/(mca)^0.5)	Factor de ponderación%
N50-305	6.50	30.0	3.47	3.03	0.552661189	5.43%
N50-306	14.00	33.0	7.48	6.52	1.134951501	11.14%
N50-308	11.00	33.0	5.88	5.12	0.891747608	8.76%
N50-309	10.00	33.0	5.34	4.66	0.810679644	7.96%
N50-312	19.00	38.0	10.15	8.85	1.435383801	14.09%
N50-313	23.40	22.0	12.50	10.90	2.323329222	22.81%
N50-314	9.80	32.0	5.24	4.56	0.806784089	7.92%
N50-315	10.00	23.0	5.34	4.66	0.971051626	9.53%
ACUEDUCTO	17.5	42.0	9.35	8.15	1.257533726	12.35%
					10.18412241	100%

En la metodología equitativa fueron necesarias 17 simulaciones para poder alcanzar la calibración del modelo, en la simulación 0 se obtuvo la presión media de la red para poder estimar el primer emisor global de fugas, en la simulación 5 se efectuó el ajuste del patrón de consumo, en la simulación 7 se efectuó la distribución espacial de fuga, en la simulación 9 se ajustó los coeficientes de pérdidas de las válvulas, en la simulación 15 se realizó un segundo ajuste del patrón de consumo debido a la discrepancia de valores del caudal observado con el simulado el resto de simulaciones se efectuaron para

ajustar el emisor global de fugas dando como resultado en la simulación 17 un emisor global de $16.2765 \frac{l}{s.m.c.a^{0.5}}$

En la metodología referente al número de conexiones fueron necesarias 17 simulaciones para lograr la calibración del modelo siendo que en la simulación 0 se procedió a calcular la presión media de la red para poder estimar el primer emisor global de fugas, en la simulación 5 se ajustó el patrón de consumo, en la simulación 7 se procedió a distribuir espacialmente las fugas, en la simulación 9 se realizó el ajuste de los coeficientes de pérdidas en las válvulas, en la simulación 15 se realizó un segundo ajuste del patrón de consumo, el resto de simulaciones tuvieron como propósito ajustar el emisor global de fugas dando como resultado en la simulación 17 un emisor global de fugas de $16.2576 \frac{l}{s.m.c.a^{0.5}}$

En el caso de la metodología de repartición por demanda fueron necesarias 17 simulaciones para lograr calibrar el modelo siendo que en la simulación 0 se obtuvo la presión media de la red para poder estimar el primer emisor global de fugas, en la simulación 4 se produjo el ajuste del patrón de consumo, en la simulación 6 se produjo la distribución espacial de fugas, en la simulación 9 se procedió a ajustar los coeficientes de pérdidas menores de las válvulas, en la simulación 15 se ajustó nuevamente el patrón de consumo para poder ajustar el caudal, el resto de simulaciones fueron usadas para ajustar el emisor global de fugas obteniendo en la simulación 17 un emisor global de $16.2413 \frac{l}{s.m.c.a^{0.5}}$

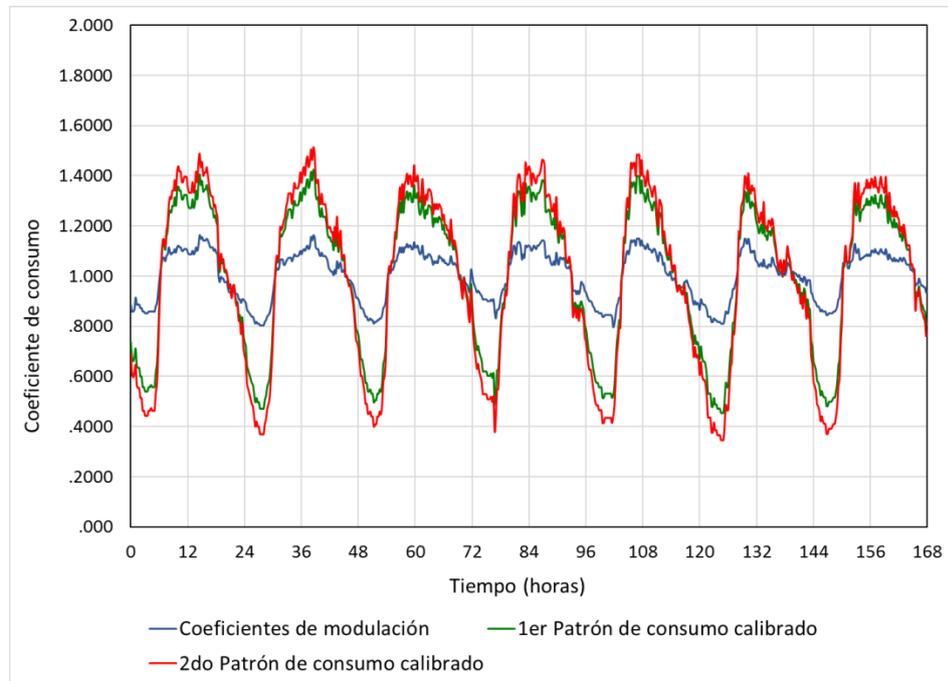
La variación entre la presión simulada y la observada en campo se ve afectada de gran manera luego de ajustar los coeficientes de pérdida en las válvulas:

Tabla 22: Ajuste de coeficiente de pérdidas en válvulas del distrito N50-M31

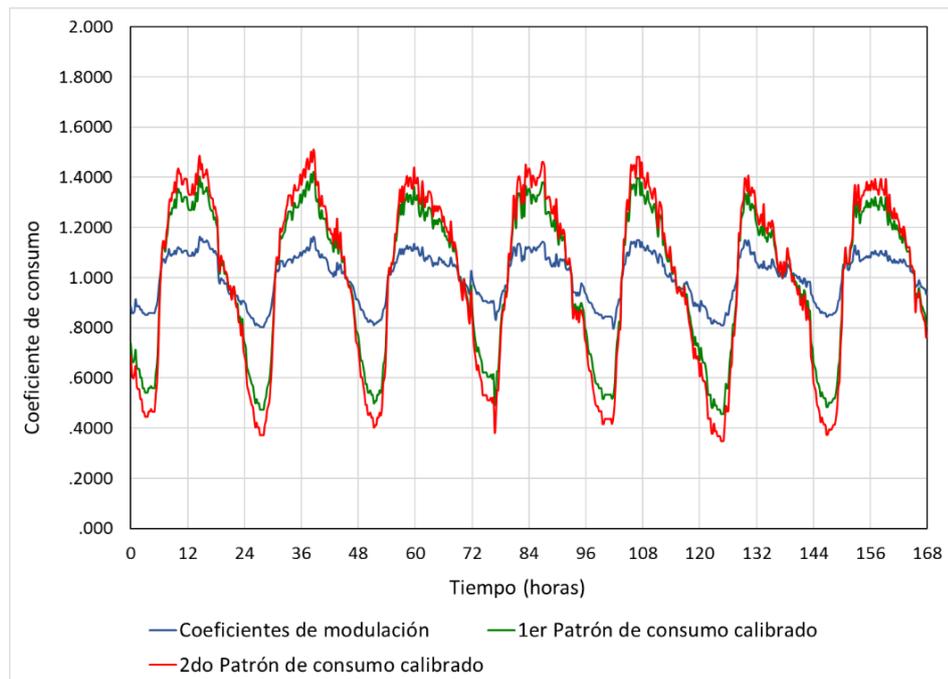
Metodología	Simulación	Nudo	Valor medio observaciones	Valor medio simulado	Error medio absoluto	Error cuadrático medio
Equitativo	Simulación 1	N-356	27.98	37.36	9.378	9.679
		N-196	29.51	33.83	4.317	4.631
		N-65	23.25	37.71	14.462	14.684
		N-134	13.65	35.39	21.743	21.87
		N-130	38.54	42.2	3.655	3.686
	Simulación 17	N-356	27.98	27.07	1.123	1.402
		N-196	29.51	29.01	0.595	0.719
		N-65	23.25	23.1	1.004	1.184
		N-134	13.65	13.69	1.007	1.279
		N-130	38.54	38.11	0.513	0.632
Número de conexiones	Simulación 1	N-356	27.98	37.97	9.984	10.267
		N-196	29.51	35.82	6.303	6.512
		N-65	23.25	37.87	14.616	14.836
		N-134	13.65	34.42	20.768	20.903
		N-130	38.54	42.22	3.681	3.712
	Simulación 17	N-356	27.98	26.25	1.752	2
		N-196	29.51	28.86	0.71	0.836
		N-65	23.25	23.28	0.973	1.161
		N-134	13.65	13.76	1.005	1.276
		N-130	38.54	38.09	0.529	0.649
Demanda	Simulación 1	N-356	27.98	37.23	9.243	9.547
		N-196	29.51	35.98	6.467	6.67
		N-65	23.25	38.83	15.584	15.788
		N-134	13.65	35.1	21.452	21.582
		N-130	38.54	42.33	3.786	3.816
	Simulación 17	N-356	27.98	26.85	1.25	1.536
		N-196	29.51	29.45	0.407	0.51
		N-65	23.25	23.3	0.983	1.173
		N-134	13.65	13.75	1.005	1.276
		N-130	38.54	38.12	0.505	0.624

A continuación, se muestra una gráfica que indica la variación entre el primer patrón utilizado, la primera y su segunda corrección de los 3 métodos:

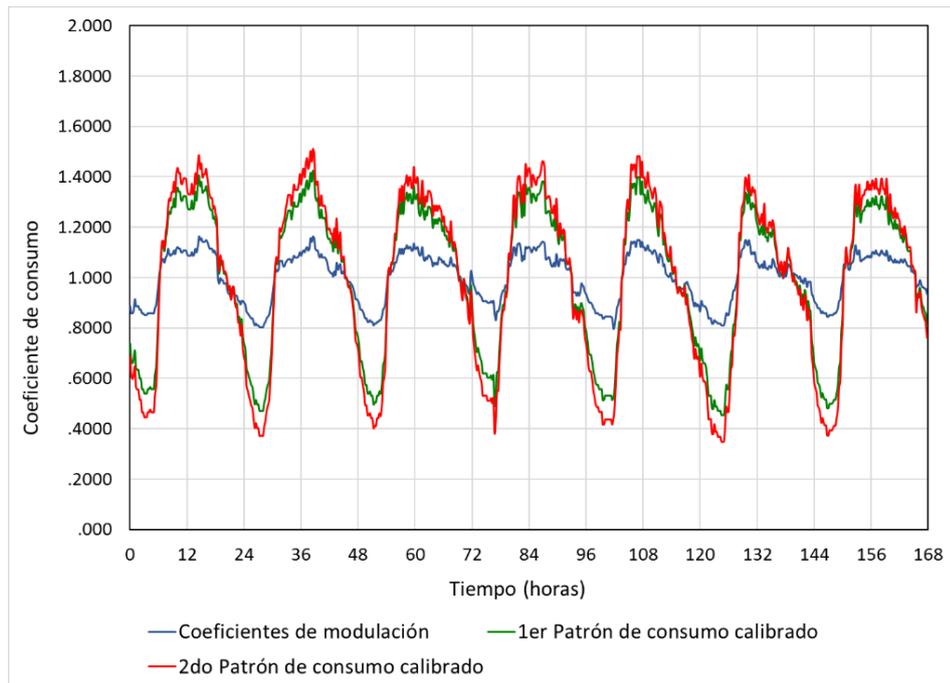
21 Variación entre los patrones de consumos - Distribución equitativa N50-M31



22 Variación entre los patrones de consumos - Distribución por demanda N50-M31



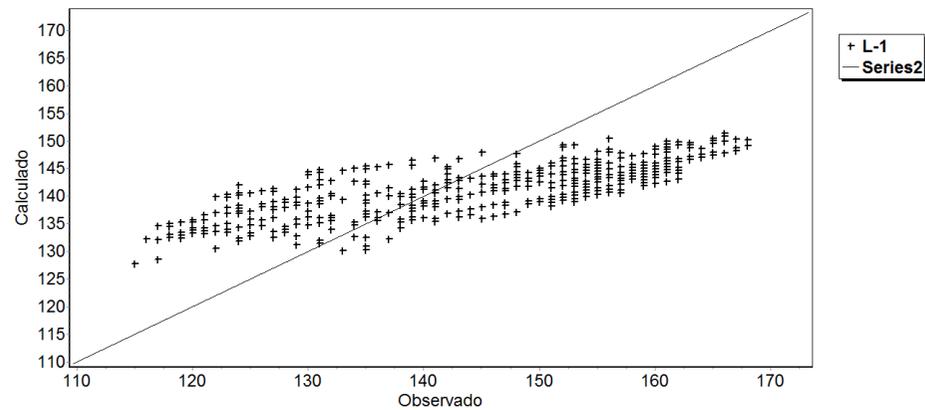
23 Variación entre los patrones de consumos - Distribución por número de conexiones N50-M31



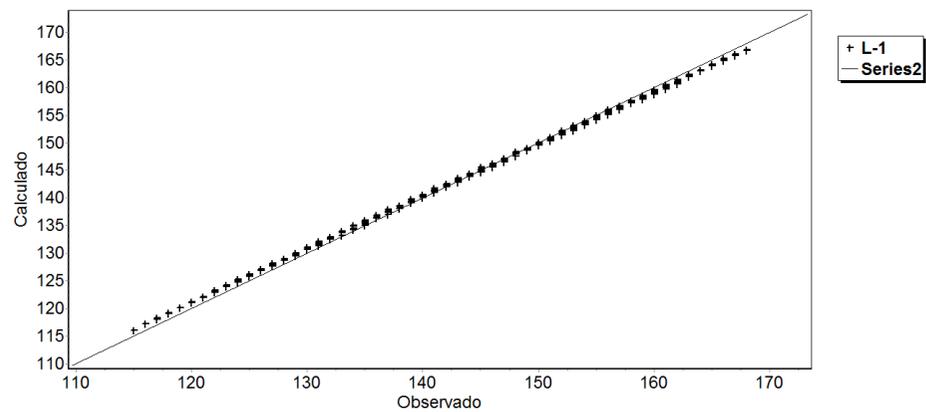
La variación entre la presión simulada y la observada en campo se ve afectada de gran manera luego de ajustar los coeficientes de pérdida en las válvulas. La corrección del patrón de consumo nos permite calibrar el caudal simulado con el observado, a continuación, se muestran gráficos de correlación en la primera y última simulación de caudal y presión:

24 Gráfico de correlación de caudal - Distribución equitativa por caudal N50-M31

Simulación 1

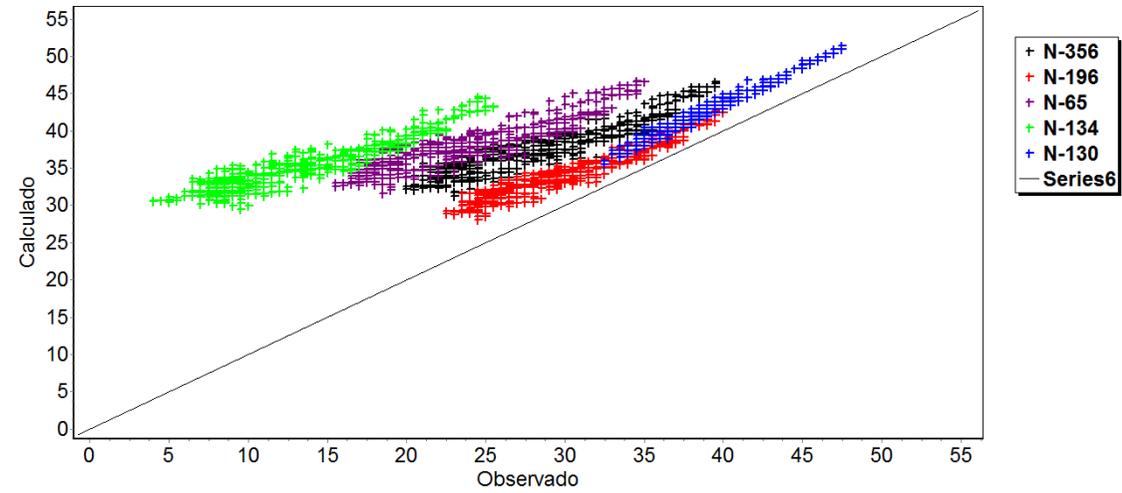


Simulación 17

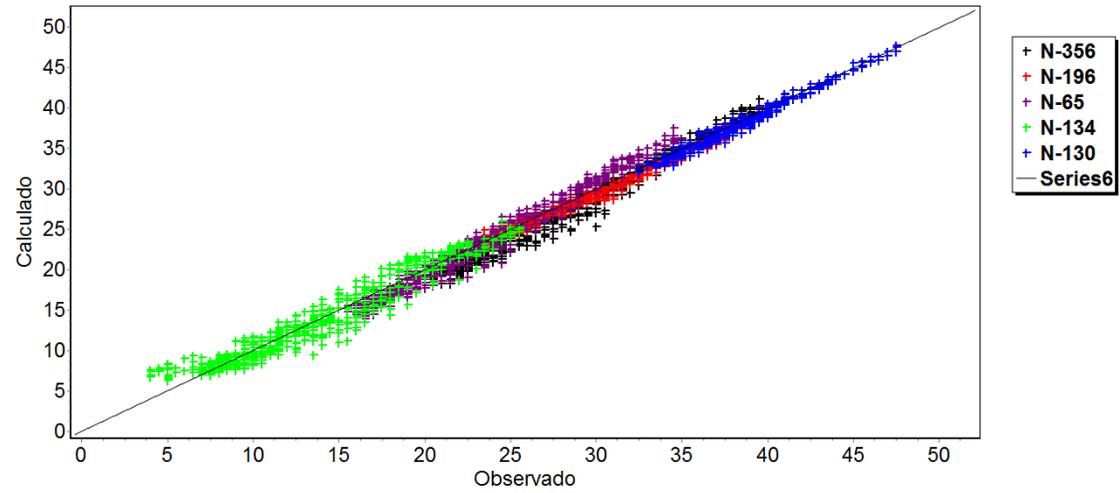


25 Gráfico de correlación de presión Distribución equitativa N50-M31

Simulación 1

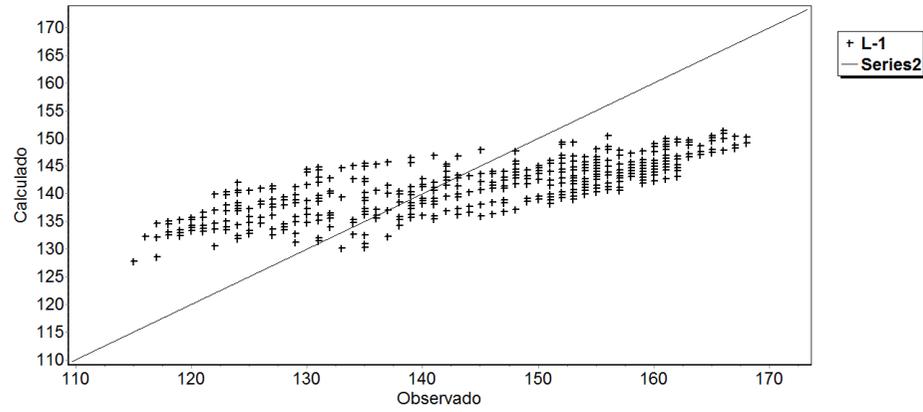


Simulación 17

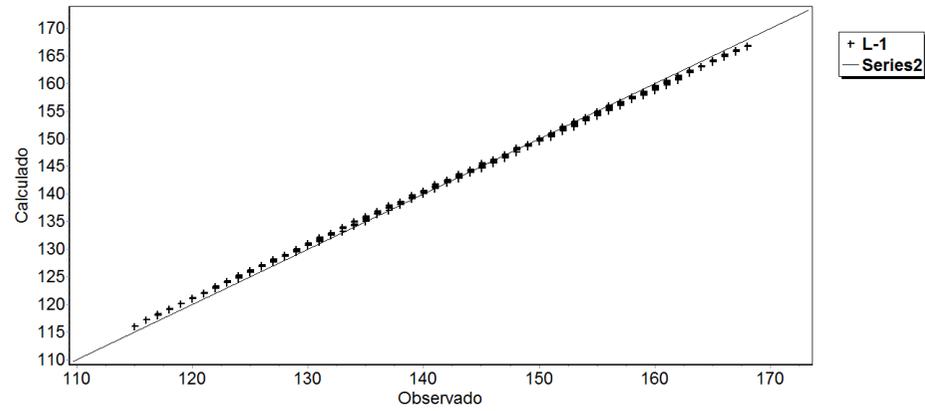


26 Gráfico de correlación de caudal – Distribución por demanda N50-M31

Simulación 1

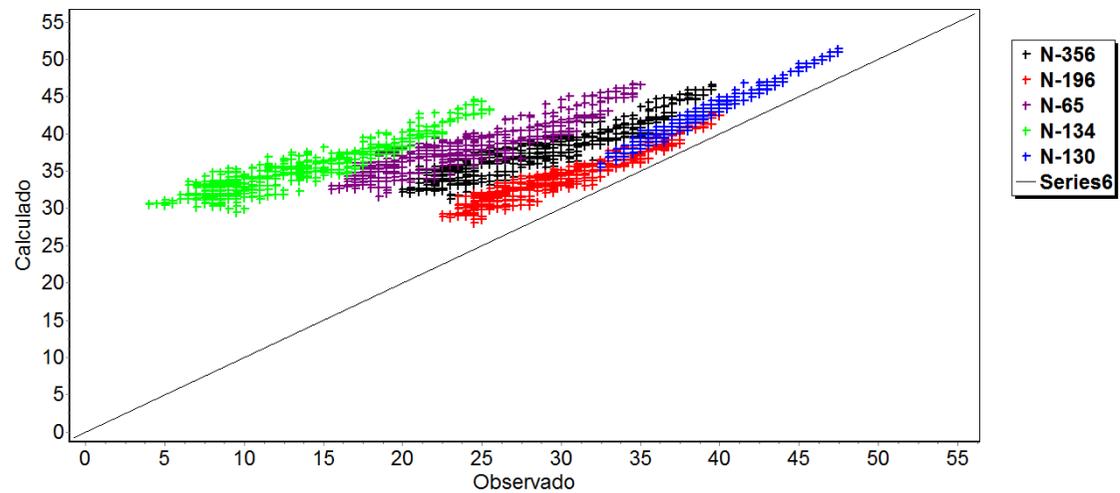


Simulación 17

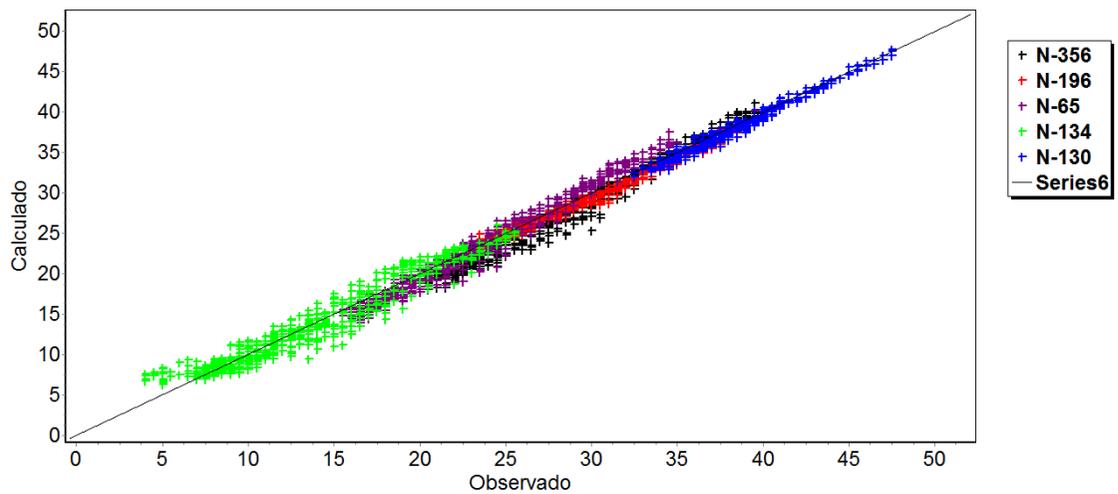


27 Gráfico de correlación de presión – Distribución por demanda N50-M31

Simulación 1

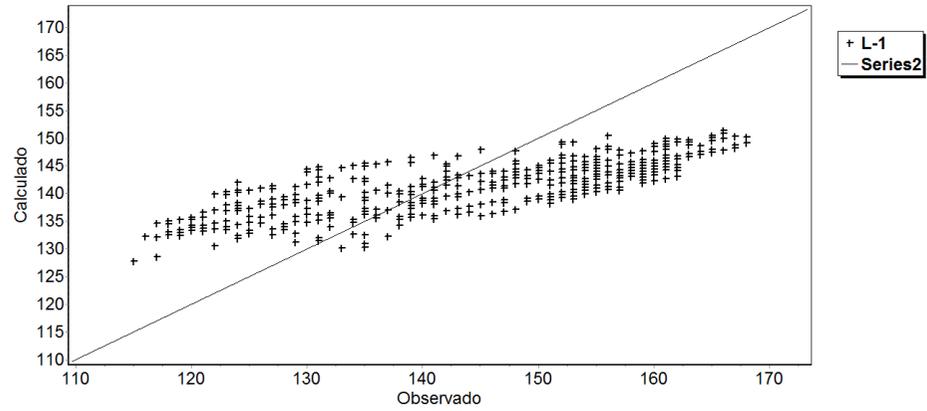


Simulación 17

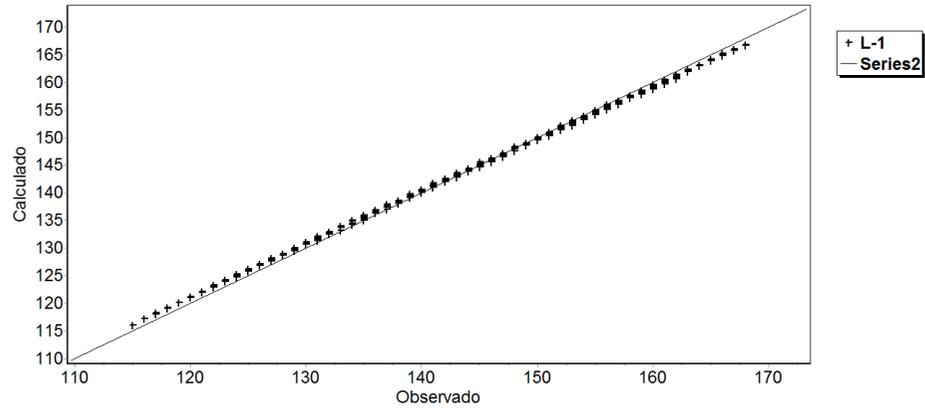


28 Gráfico de correlación de caudal - Distribución por número de conexiones N50-M31

Simulación 1

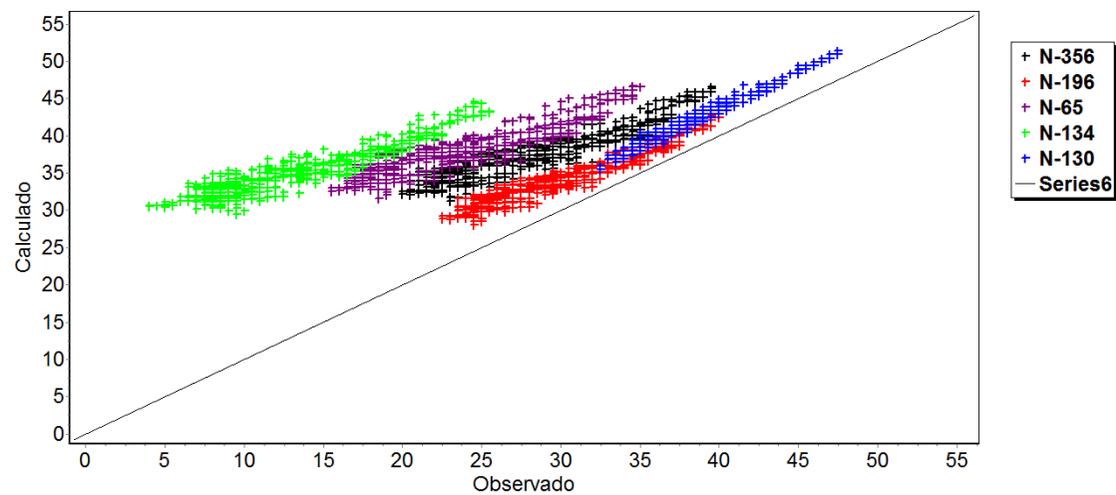


Simulación 17

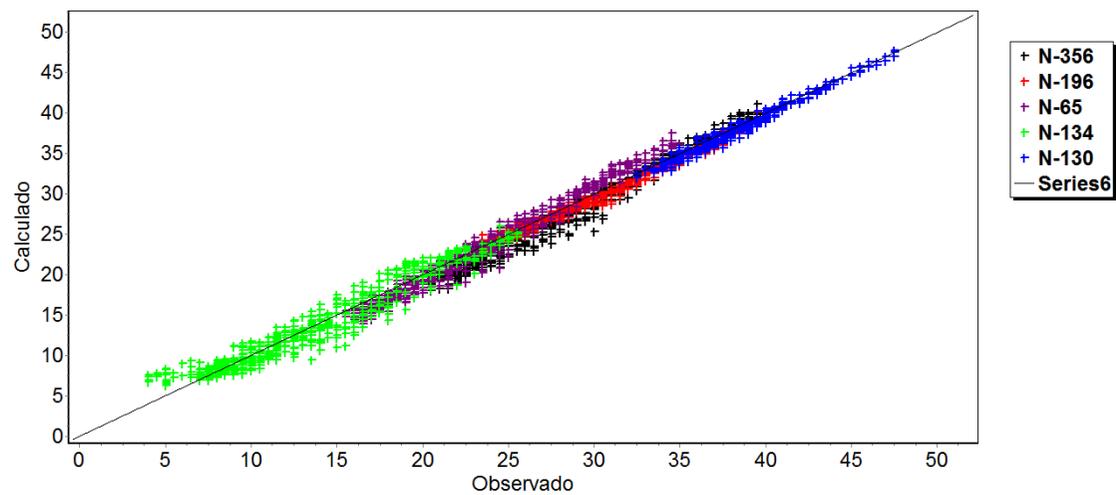


29 Gráfico de correlación de presión - Distribución por número de conexiones N50-M31

Simulación 1

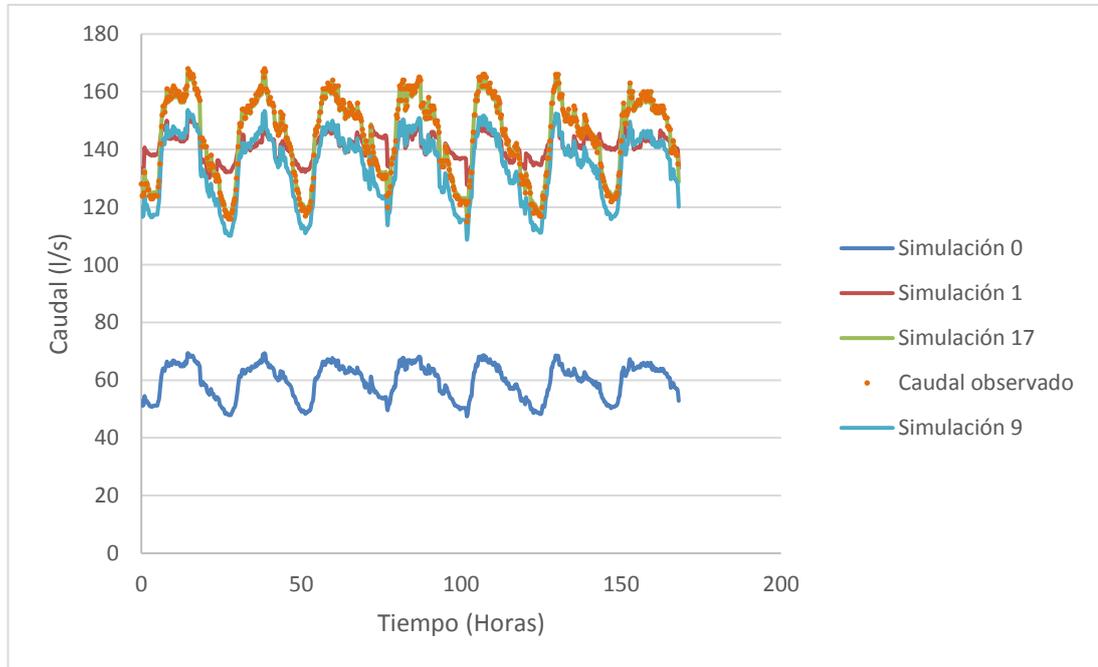


Simulación 17

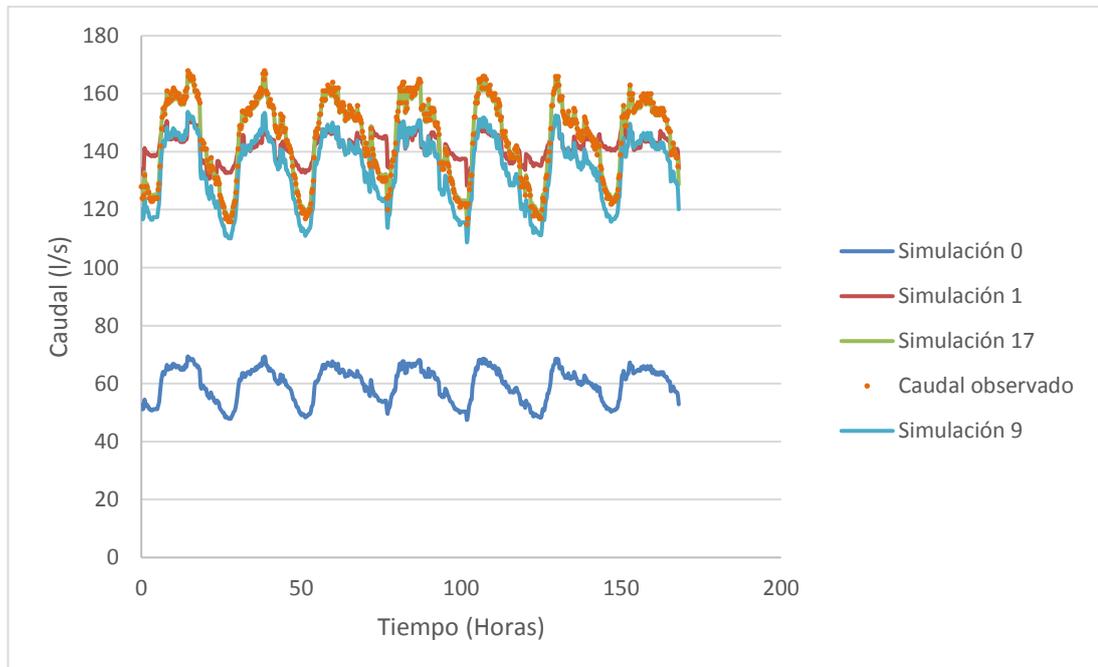


En la gráfica que se muestra a continuación se observa la variación del caudal de la simulación 0, 1, 9,17 y el caudal observado, lo que permitirá observar su variación hasta la calibración final del modelo.

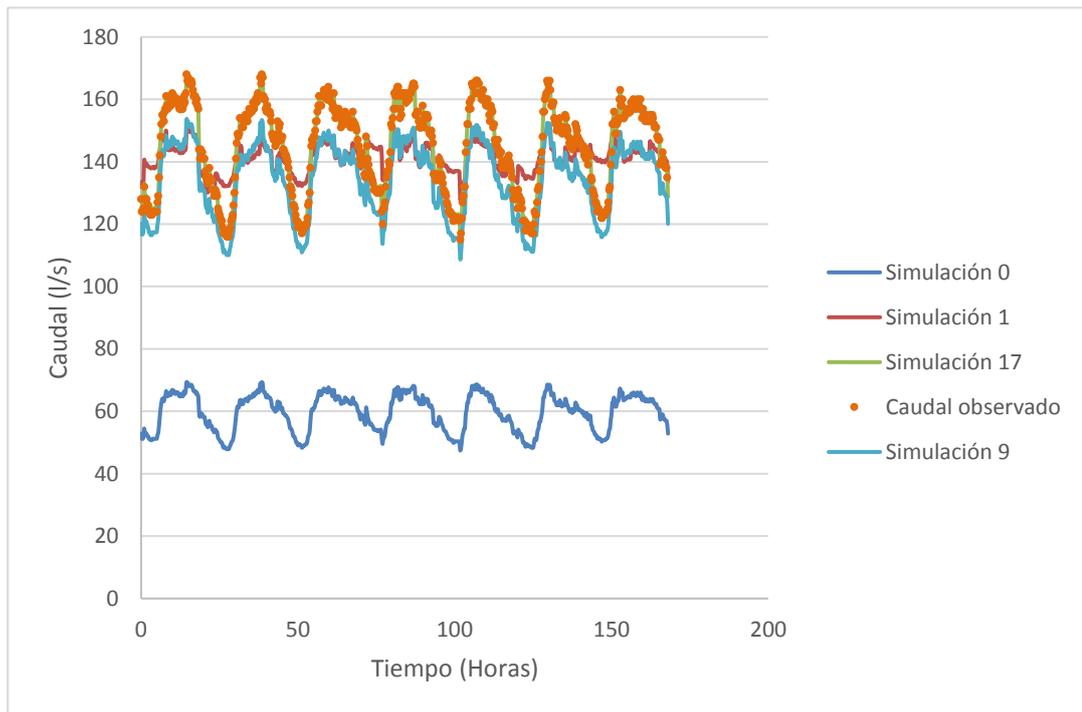
30 Variación de caudal - Distribución equitativa N50-M31



31 Variación de caudal - Distribución por demanda N50-M31



32 Variación de caudal - distribución por número de conexiones N50-M31



Conclusiones

El objetivo de este trabajo fue realizar una comparación entre diversas metodologías para la distribución de fugas a través del emisor global de fugas. Para lo cual el marco teórico se ha visto enfocado en temas tales como lo que es un modelo hidráulico, como construirlo y como calibrarlo.

La metodología de distribución de este emisor global planteado en (Molina, 2014) consistía en asignar las fugas tomando en consideración la longitud de tubería que llegaba a cada nodo de la red y repartirla en proporción a la misma.

En este trabajo se procedió a desarrollar tres metodologías las cuales se centran en distribuir las fugas de manera equitativa, por demanda y número de conexiones en cada nodo

Se escogieron 2 casos de estudio con diferente rendimiento volumétrico, que son los mismos que fueron trabajados en (Molina, 2014). A continuación, se presentan dos tablas es las cuales se detallan el número de iteraciones y la descripción de cada una para las cuatro metodologías y los dos casos de estudio:

Tabla 23: Descripción de simulaciones del distrito N72-M132

DISTRITO N72-M132			
EQUITATIVO	#CUENTAS	DEMANDA	LONGITUD DE TUBERIA
SIMULACION (0)	SIMULACION (0)	SIMULACION (0)	SIMULACION (0)
SIMULACION (1) Ajuste emisor	SIMULACION (1) Ajuste emisor	SIMULACION (1) Ajuste emisor	SIMULACION (1) Ajuste emisor
SIMULACION (2) Ajuste emisor	SIMULACION (2) Ajuste emisor	SIMULACION (2) Ajuste emisor	SIMULACION (2) Ajuste emisor
SIMULACION (3) Ajuste emisor	SIMULACION (3) Ajuste de Cc	SIMULACION (3) Ajuste de Cc	SIMULACION (3) Ajuste emisor
SIMULACION (4) - Ajuste Cc	SIMULACION (4) - Ajuste emisor	SIMULACION (4) - Ajuste emisor	SIMULACION (4) - Ajuste Cc
SIMULACION (5) Ajuste emisor	SIMULACION (5)Dist. Espa.	SIMULACION (5) - Dist. Espa.	SIMULACION (5) Ajuste emisor
SIMULACION (6) - Dist. Espa.	SIMULACION (6) Ajuste k(θ)	SIMULACION (6) Ajuste emisor	SIMULACION (6) - Dist. Espa.
SIMULACION (7) - Ajuste k(θ)	SIMULACION (7) Ajuste emisor	SIMULACION (7) Ajuste k(θ)	SIMULACION (7) Ajuste emisor
SIMULACION (8) Ajuste emisor	SIMULACION (8) Ajuste emisor	SIMULACION (8) - Ajuste emisor	SIMULACION (8) - Ajuste k(θ)
SIMULACION (9) Ajuste emisor		SIMULACION (9) Ajuste emisor	SIMULACION (9) Ajuste emisor
			SIMULACION (10) Ajuste emisor

Tabla 24: Descripción de simulaciones del distrito N50-M31

DISTRITO N50-M31			
EQUITATIVO	#CUENTAS	DEMANDA	LONGITUD DE TUBERIA
SIMULACION (0)	SIMULACION (0)	SIMULACION (0)	SIMULACION (0)
SIMULACION (1)) - Ajuste emisor	SIMULACION (1) Ajuste emisor	SIMULACION (1) Ajuste emisor	SIMULACION (1) Ajuste emisor
SIMULACION (2) Ajuste emisor	SIMULACION (2) Ajuste emisor	SIMULACION (2) Ajuste emisor	SIMULACION (2) Ajuste emisor
SIMULACION (3) Ajuste emisor	SIMULACION (3) Ajuste emisor	SIMULACION (3) Ajuste emisor	SIMULACION (3) Ajuste emisor
SIMULACION (4) Ajuste emisor	SIMULACION (4) Ajuste emisor	SIMULACION (4) - Ajuste Cc	SIMULACION (4) Ajuste emisor
SIMULACION (5) - Ajuste Cc	SIMULACION (5) - Ajuste Cc	SIMULACION (5) Ajuste emisor	SIMULACION (5) - Ajuste Cc
SIMULACION (6) Ajuste emisor	SIMULACION (6) Ajuste emisor	SIMULACION (6) - Dist. Espa.	SIMULACION (6) Ajuste emisor
SIMULACION (7) - Dist. Espa.	SIMULACION (7) - Dist. Espa.	SIMULACION (7) Ajuste emisor	SIMULACION (7) - Dist. Espa.
SIMULACION (8) Ajuste emisor	SIMULACION (8) Ajuste emisor	SIMULACION (8) Ajuste emisor	SIMULACION (8) Ajuste emisor
SIMULACION (9) - Ajuste $k(\theta)$	SIMULACION (9)- Ajuste $k(\theta)$	SIMULACION (9) - Ajuste $k(\theta)$	SIMULACION (9) Ajuste emisor
SIMULACION (10) Ajuste emisor	SIMULACION (10) Ajuste emisor	SIMULACION (10) Ajuste emisor	SIMULACION (10) - Ajuste $k(\theta)$
SIMULACION (11) Ajuste emisor	SIMULACION (11) Ajuste emisor	SIMULACION (11) Ajuste emisor	SIMULACION (11) Ajuste emisor
SIMULACION (12) Ajuste emisor	SIMULACION (12) Ajuste emisor	SIMULACION (12) Ajuste emisor	SIMULACION (12) Ajuste emisor
SIMULACION (13) Ajuste emisor	SIMULACION (13) Ajuste emisor	SIMULACION (13) Ajuste emisor	SIMULACION (13) Ajuste emisor
SIMULACION (14) Ajuste emisor	SIMULACION (14) Ajuste emisor	SIMULACION (14) Ajuste emisor	SIMULACION (14) Ajuste emisor
SIMULACION (15)- Ajuste Cc No.2	SIMULACION (15)- Ajuste Cc No.2	SIMULACION (15)- Ajuste Cc No.2	SIMULACION (15) Ajuste emisor
SIMULACION (16) Ajuste emisor	SIMULACION (16) Ajuste emisor	SIMULACION (16) Ajuste emisor	SIMULACION (16) Ajuste emisor
SIMULACION (17) Ajuste emisor	SIMULACION (17) Ajuste emisor	SIMULACION (17) Ajuste emisor	SIMULACION (17) - Ajuste Cc No.2
			SIMULACION (18) Ajuste emisor
			SIMULACION (19) Ajuste emisor

En las tablas 23 y 24 se puede comprobar que todas las metodologías propuestas tienen aproximadamente la misma rapidez de convergencia que la propuesta por (Molina, 2014) por lo que se puede concluir que se puede utilizar para el proceso de calibración el método equitativo, ya que es el más sencillo y rápido en comparación con los otros debido a que solo se requiere conocer la cantidad de nodos de demanda en el modelo para poder así ejecutar la distribución de las fugas.

La parte esencial dentro del proceso de calibración, en lo que a calibración del emisor global de fugas se refiere, es mantener el uso del indicador de fugas, mediante el criterio del caudal mínimo nocturno, de esta forma no afectara en sobre manera que tipo de metodología de repartición de emisor utilicemos en cuanto este paso no sea omitido.

Las metodologías planteadas han sido probadas en distritos de medición en donde los usuarios comerciales e industriales no tienen un peso muy significativo sino los usuarios residenciales, por lo que no se ha visto afectado el tiempo de convergencia de la calibración al haber asumido un único patrón de consumo para todo el modelo, por lo que se debería ejecutar a futuro una nueva simulación probando estas metodologías planteadas pero con la presencia significativa de usuarios de tipo comercial e industrial.

Bibliografía

- AWWA- ECAC Engineering Computer Applications Committee. (1999). *Calibration Guidelines for Water Distribution System Modeling*. New Orleans.
- Bartolín, H. (2013). *CONFECCIÓN DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA DESDE UN SIG Y DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Bennis, S., Farés, R., Guemouria, N., & Dubois, M. (2011). Theoretical modeling and experimental validation of leakage in drinking water networks. *American Water Works Association*, 61-72.
- Boulos, P., & Ormsbee, L. (1991). Explicit network calibration for multiple loading. *Civil Engineering Systems, Taylor & Francis*.
- Burrows, M. T. (2008). *An Integrated Model to Evaluate Losses in Water Distribution Systems*. Springer Science and Business Media B.V.
- Cabrera, E. (s.f.). *BALANCES HÍDRICOS EN REDES DE AGUA. EL CRITERIO DE LA INTERNACIONAL WATER ASSOCIATION (IWA)*. Valencia: Instituto Tecnológico del Agua.
- Cabrera, E., Almandoz, J., Arregui, F., & García-Serra, J. (1999). Auditoría de redes de distribución de agua. *Ingeniería del Agua*, 291-303.
- Cabrera, J. (s.f.). Calibración de modelos hidrológicos. *Universidad Nacional de Ingeniería*, 1-7.
- Carbonell, A., & Martínez, F. (s.f.). *COMBINACIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS Y SIG PARA LA GESTIÓN EFICIENTE DE REDES*. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1-16.
- Cassa, A., Van Zyl, J., & Laubscher, R. (2010). A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes. *Urban Water Journal*, 109-120.
- Colombo, A., Karney, B., & ASCE, M. (2009). Leaks and Water Use Representation in Water Distribution System Models: Finding a Working Equivalence. *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 234-239.

- Colombo, A., Karney, B., & ASCE, M. (2009). Leaks and Water Use Representation in Water Distribution System Models: Finding a Working Equivalence. *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 234-239.
- Distribution, M. T. (2008). *An Integrated Model to Evaluate Losses*. Springer Science and Business Media.
- Giustolisi, O., Savic, D., & Kapelan, Z. (2008). Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks. *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 626-635.
- Giustolisi, O., Savic, D., & Kapelan, Z. (2008). Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks. *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 626-635.
- Gonelas, V. K. (2014). *Accurate water demand spatial allocation for water*. Taylor & Francis.
- Journal AWWA. (2013). Committee Report: Defining model calibration. *Journal AWWA*, 60-63.
- Kapelan, Z. (2002). *Calibration of water distribution systems hidraulyc models*. s.n.: Universidad de Exeter.
- Lambert, A. y. (2000). *Losses from Water Supply Systems: Standard*.
- Martínez, F., Conejos, P., & Vercher, J. (1999). Developing and integrated model for water distribution systems considering both distributed leakage and pressure-dependent demands. *Proceedings of the 26th ASCE Water Resources Planning and Management Division Conference*, 1-14.
- Martins, K., & Hussain, F. (2008). MODELOS DE ANÁLISE HIDRÁULICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA CONSIDERANDO DEMANDA DIRIGIDA PELA PRESSÃO E VAZAMENTOS. *Eng. sanit. ambient.*, 153-162.
- Matthew D. Jolly, A. D. (2013). *Research Database of Water Distribution System Models*. Journal of Water Resources Planning and Management.
- May, L. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*. s.n.: McGraw-Hill.
- Molina, X. (2014). *METODOLOGIA PARA LA CALIBRACION PRELIMINAR DE MODELOS DE REDES DE DISTRIBUCION DE AGUA MEDIANTE*

LA UTILIZACION CONJUNTA DE DEMANDAS Y CONSUMOS
DEPENDIENTES DE LA PRESION. VALENCIA.

- Núñez, T., Escobar, C., & Cárdenas, C. (2014). MODELACIÓNBAJO AMBIENTE DE FUGAS Y SU CORRELACIÓN ENTRE ELDISEÑO, LA CONSTRUCCIÓN, LA OPERACIÓN Y LAS PÉRDIDAS TÉCNICAS Y COMERCIALESEN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE. *Agua, saneamiento y ambiente* , 14-35.
- Obradovic, D. (2000). Modelling of demand and losses in real-life water distribution systems. *Urban Water 2*, 131-139.
- Obradovic, D. (2000). Modelling of demand and losses in real-life water distribution systems. *Urban Water 2*, 131-139.
- Ormsbee, L. (1989). Implicit network calibration. *Journal of Water Resources*, Vol. 115.
- Ormsbee, L., & Wood, D. (1986). EXPLICIT PIPE NETWORK CALIBRATION. *J. Water Resour*, 166-182.
- Preis, A., Whittle, A., Ostfeld, A., & Perelman, L. (2011). Efficient Hydraulic State Estimation Technique Using Reduced Models of Urban Water Networks. *Journal of water resources planning and management*, 343-351.
- Rossmann, L. (2000). *EPANET 2 Manual del usuario*.Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Solano, C. (2012). *Recopilación, Análisis y Evaluación de las metodologías de calibración de modelos de RDAP empleadas en algunas ciudades de Colombia*.Bogotá: Universidad de los Andes.
- Speight, V. (2008). DEVELOPMENT OF MODEL CALIBRATION GUIDANCE. *Water Distribution Systems Analysis*, 1-8.
- Speight, V., & Khanal, N. (2009). Model calibration and current usage in practice. *Urban Water Journal*, 23-28.
- Speight, V., & Khanal, N. (2009). Model calibration and current usage in practice. *Urban Water Journal*, 23-28.
- Takahashi, S., Sadarriaga, J., & Vega, C. (2008). Calibración de redes de distribución con métodos de inteligencia artificial. *XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, 1-10.

- Teixeira, S. L. (2006). *Modelação e análise de sistemas de*. Instituto Regulador de Águas e Resíduos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Van Zyl, C., & Clayton, C. (2007). The effect of pressure on leakage in water distribution systems. *Proceedings of the ICE Water Management, Vol. 160 No. 2*, 109-114.
- Walski, T., & ASCE, A. (1983). TECHNIQUE FOR CALIBRATING NETWORK MODELS. *J. Water Resour*, 360-372.
- Walski, T., Bezts, W., Posluszny, E., Weir, M., & Whitman, B. (2006). Modeling leakage reduction through pressure control. *American Water Works Association* , 147-155.
- Walski, T., Chase, D., Savic, D., Grayman, W., & Beckwith, S. (2003). Advanced Water Distribution Modeling and Management. *Civil and Environmental Engineering and Engineering Mechanics Faculty Publications*, 75-132.
- Wu, Z. Y. (2007). Pressure Dependent Demand Optimization for Leakage Detection in Water Distribution Systems. *Proceeding of Computing and Control for Water Industry*, 1-12.
- Wu, Z., Sage, P., & Turtle, D. (2010). Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System. *JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT*, 116-128.
- Wu, Z., Sage, P., & Turtle, D. (2010). Pressure-Dependent Leak Detection Model and Its Application to a District Water System. *JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT*, 116-128.
- Zheng, W., Walski, T., Mankowski, G., Gurrieri, R., & Tryby, M. (2002). Calibrating Water Distribution Model Via Genetic Algorithms . *AWWA IMTech Conference* , 14-17.
- Zheng, W., Walski, T., Mankowski, R., Herrin, G., Gurrieri, R., & Tryby, M. (2002). Calibrating Water Distribution Model Via Genetic Algorithms. *AWWA IMTech Conference*, 1-10.



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **ARÉVALO CASTRO CHRISTIAN XAVIER**, con C.C: # **(0301711818)** autor/a del trabajo de titulación: **Comparación de metodologías para la distribución espacial del emisor global de fugas en modelos hidráulicos de 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: **Arévalo Castro, Christian Xavier**

C.C: **0301711818**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Comparación de metodologías para la distribución espacial del emisor global de fugas en modelos hidráulicos de redes de distribución de agua potable		
AUTOR(ES)	Christian Xavier, Arévalo Castro		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Mélida Alexandra, Camacho Monar		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	16 de marzo de 2018	No. DE PÁGINAS:	114
ÁREAS TEMÁTICAS:	Modelación hidráulica, calibración de modelos hidráulicos y redes de distribución de agua potable		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Modelos hidráulicos, simulación, metodologías, calibración, emisor global de fugas.		

RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):

En el presente trabajo se ha abordado el tema de la calibración de modelos hidráulicos de redes de distribución de agua potable en el que se enfoca el proceso de repartición de fugas, tomando como punto de partida la metodología de calibración planteada por (Molina, 2014), agregando una variable, la misma que consiste en definir nuevos métodos de repartición debido a la dificultad del ya planteado.

Se modelarán dos casos de estudio, en los que se aplicara la metodología de calibración mencionada dentro de la cual se usaran las tres metodologías de repartición del emisor global de fugas las cuales son de manera equitativa, por número de conexiones y por demanda.

De esta manera se buscará comprobar cuál de estas metodologías es la más conveniente a utilizar dentro del proceso de calibración, teniendo en cuenta la rapidez de convergencia en la calibración y el número de variables a calcular. Definiendo de esta forma el método más rápido y sencillo de ejecutar.



**Presidencia
de la República
del Ecuador**



**Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes**



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593969209082	E-mail: christiancubico@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Clara Glas Cevallos	
	Teléfono: +593-4 -2206956	
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		