



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Máster en Ingeniería
Hidráulica y Medio
Ambiente

Título del Trabajo Fin de Máster:

*Método de los caudales mínimos nocturnos:
revisión de sus bases científicas, evaluación
de errores potenciales y propuestas para su
mejora*

Intensificación:

HIDRÁULICA URBANA

Autor:

Escobar Morales, Juan José

Director/es:

Dr. Cabrera Marcet, Enrique

Dr. Cobacho Jordán, Ricardo

Fecha: Julio, 2011



Título del Trabajo Fin de Máster:

Método de los caudales mínimos nocturnos: revisión de sus bases científicas, evaluación de errores potenciales y propuestas para su mejora

Autor: ***Escobar Morales, Juan José***

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	<i>Dr.Enrique Cabrera Marcet</i>	Fecha de Lectura	
Codirector1	<i>Dr.Ricardo Cobacho Jordán</i>		
Codirector2	-		
Tutor	-		

Resumen:

El nuevo contexto para las empresas de agua en el S.XXI, determinado por el cambio climático y las necesidades cambiantes de la sociedad, ha mostrado la obligación de preparar planes de gestión eficiente para las redes de distribución de agua, orientados a mejorar sustancialmente su operación y, especialmente, a disminuir los volúmenes de agua fugada.

Existen varias referencias internacionales en cuanto a metodologías de gestión de fugas de agua. En particular, en el Reino Unido se ha desarrollado el denominado Método de los Caudales mínimos Nocturnos (MNF, según sus siglas en inglés), de gran aceptación internacional a día de hoy, y sobre el que se enfocan las investigaciones contenidas en esta tesina.

La practicidad del MNF radica en su baja necesidad de datos iniciales, la facilidad de obtención de los mismos y la simplicidad de los cálculos que propone. Pero, quizá por los mismos motivos, se han detectado algunas inconsistencias en la base científica del mismo, pues se ha encontrado que los resultados generados (previsión de volúmenes fugados), no son del todo correctos.

Con el objeto de evaluar la magnitud de dichas inconsistencias, se han desarrollado los trabajos de investigación contenidos en esta tesina los cuales están divididos en tres temas principales. Cada una de ellos aborda de manera diferente las inconsistencias del NFM, forjando un análisis general de éste.

El primer análisis está enfocado inicialmente en la identificación detallada de las inconsistencias del NFM y la cuantificación del error inherente al mismo. Facilitando la base teórica para los siguientes desarrollos, en esta parte se han evaluado las variables tanto físicas como hidráulicas que más influyen en las redes de distribución con respecto al método. Por otro lado, también se han evaluado los escenarios más comunes en los sistemas de distribución, obteniendo una serie de recomendaciones para la aplicación del método en este tipo de casos.

El segundo análisis abarca las inconsistencias generadas por la falta de exactitud de los datos de consumo en la hora que el método es aplicado. De igual manera, se detallan los tipos de errores



posibles en los datos iniciales del método; decantándose en un exploración del error producido por una mala estimación del caudal fugado inicial, producto de la inexactitud del caudal consumido, y las posibles consecuencias de éste en los resultados (transmisión del error).

El tercer análisis, está enfocado en la selección del punto (nudo) de la red que mejor representa las características de la misma (AZP, por sus siglas en ingles). Esta tarea ha desarrollado un análisis riguroso de las posibles maneras de seleccionar dicho punto, de acuerdo a interpretaciones matemáticas del estado del arte en el tema. Este análisis, si bien no estudia el NFM como tal, busca mejorar las inconsistencias producto de la mala selección del AZP.

Aunque las conclusiones de cada parte se detallan en los capítulos respectivos, para lograr cohesionar todo el estudio del NFM, una visión general de las mismas es recogida en un capítulo final. Como conclusión general de esta tesina queda de manifiesto que, con indiferencia de cuán optimizada esté la formulación del método, conviene que su aplicación vaya precedida de un análisis del sistema, pues ello asegurará un error menor al que se tendría sin dicho análisis.

Palabras clave:

Gestión de fugas/ balance hídrico/ gestión de la presión/demanda nocturna de agua/abastecimiento/modelo matemático de red.

Abstract:

The new context of the Water Industry in the XXI century, determined by the weather change and the society's needs, have shown the obligation to prepare efficient management plans for the water distribution systems. These plans are oriented to substantially improve the water systems' operation, and especially, they are focused on diminish the volumes of the water leaks.

There are several international references concerning the management methodologies about water leaks. Particularity, it has been developed the Night Flow Method (NFM) in the United Kingdom which has had great international acceptance nowadays; and, It's the target for the research of this thesis.

The NFM practicality goes on its low necessity of initial data, the facility of the data obtaining, and the simplicity of its proposal calculus. However, due to the same arguments, maybe it has been detected some inconsistencies in the method's scientific base, for it has been found that the generated results (forecast of water losses) are not totally correct.

In order to evaluate the magnitude of those inconsistencies, it has been developed the research surveys contained in this thesis; they are divided in tree main subjects. Each one of those subjects approach differently to the NFM inconsistencies; therefore they make a general analysis of this issue.

The first analysis focuses on the detailed identification of the NFM inconsistencies, and the



quantification of the inherent error to itself. In this part it has been evaluated the fiscal and hydraulic variables that most influence the water distribution systems, facilitating, then, the theoretical base for the next developments. In the other hand, it also has been evaluated the most common distribution systems obtaining a series of recommendations for the method application in this cases.

The second analysis content the inconsistencies generated due to the lack of exact data regarding the night consumption by the time the method is applied. In addition, it has been detailed the possible error types in the initial method's data. It decanted into a scanning error produced by poor-estimations of water losses, product of inaccuracy of night consumption, and potential consequences in the results (transmission of error).

The third analysis focuses in the selection of the network point that best represents its characteristics (AZP). This assignment has led a rigorous analysis about the possible ways to select that point, according with the mathematical interpretations of the issue *state-of-the-art*. This analysis, indeed doesn't study the MNF itself, seeks to improve the inconsistencies that are the product of the bad selection of the AZP.

Nevertheless, each part conclusions are detailed in their chapters, in order to unite the entire NFM survey, a general vision of those conclusions is made in a final chapter. As a final conclusion of this thesis, it is clear that, no matter how optimized the method is, it's convenience that the NFM application should be preceded by a system analysis, because doing so will ensure a less amount of error.

Keywords:

leakage management/ water balance/ pressure management/ night consumption/ water supply/ mathematical water network

Resum:

El nou context per a les empreses d'aigua en el S.XXI, determinat pel canvi climàtic i les necessitats canviant de la societat, ha mostrat l'obligació de preparar plans de gestió eficient per a les xarxes de distribució d'aigua, orientats a millorar substancialment la seua operació i, especialment, a disminuir els volums d'aigua escapolida.

Existeixen diverses referències internacionals quant a metodologies de gestió de fugides d'aigua. En particular, en el Regne Unit s'ha desenvolupat el denominat Mètode dels Cabals mínims Nocturns (MNF, segons les seues sigles en anglès), de gran acceptació internacional a dia d'avui, i sobre el qual s'enfoquen les investigacions contingudes en aquesta tesina.

La utilitat del MNF radica en la seua baixa necessitat de dades inicials, la facilitat d'obtenció dels mateixos i la simplicitat dels càlculs que proposa. Però, potser pels mateixos motius, s'han detectat algunes inconsistències en la base científica del mateix, doncs s'ha trobat que els resultats generats (previsió de volums escapolits), no són del tot correctes.



Amb l'objecte d'avaluar la magnitud d'aquestes inconsistències, s'han desenvolupat els treballs d'investigació continguts en aquesta tesina els quals estan dividits en tres temes principals. Cadascun d'ells aborda de manera diferent les inconsistències del NFM, forjant una anàlisi general d'aquest.

La primera anàlisi està enfocada inicialment en la identificació detallada de les inconsistències del NFM i la quantificació de l'error inherent al mateix. Facilitant la base teòrica per als següents desenvolupaments, en aquesta part s'han avaluat les variables tant físiques com hidràuliques que més influeixen en les xarxes de distribució pel que fa al mètode. D'altra banda, també s'han avaluat els escenaris més comuns en els sistemes de distribució, obtenint una sèrie de recomanacions per a l'aplicació del mètode en aquest tipus de casos.

La segona anàlisi abasta les inconsistències generades per la falta d'exactitud de les dades de consum en l'hora que el mètode és aplicat. D'igual manera, es detallen els tipus d'errors possibles en les dades inicials del mètode; decantant-se en un exploració de l'error produït per una dolenta estimació del cabal escapolat inicial, producte de la inexactitud del cabal consumit, i les possibles conseqüències d'aquest en els resultats (transmissió de l'error).

La tercera anàlisi, està enfocada en la selecció del punt (nuc) de la xarxa que millor representa les característiques de la mateixa (AZP, per les seues sigles en anglès). Aquesta tasca ha desenvolupat una anàlisi rigorosa de les possibles maneres de seleccionar aquest punt, d'acord a interpretacions matemàtiques de l'estat de l'art en el tema. Aquesta anàlisi, si bé no estudia el NFM com a tal, cerca millorar les inconsistències producte de la incorrecta selecció del AZP.

Encara que les conclusions de cada part es detallen en els capítols respectius, per a assolir cohesionar tot l'estudi del NFM, s'arregla en el capítol final una visió general de les mateixes. Com a conclusió general d'aquesta tesina queda de manifest que, amb indiferència de quan optimitzada estiga la formulació del mètode, convé que la seua aplicació vaja precedida d'una anàlisi del sistema, doncs això assegurarà un error menor al que es tindria sense aquesta anàlisi.

Paraules clau:

gestió de fugides/ balanç hídric/ gestió de la pressió/demanda nocturna d'aigua/proveïment/model matemàtic de xarxa

**MÉTODO DE LOS CAUDALES MÍNIMOS NOCTURNOS: REVISIÓN
DE SUS BASES CIENTÍFICAS, EVALUACIÓN DE ERRORES
POTENCIALES Y PROPUESTAS PARA SU MEJORA**

CONTENIDO

1.	Introducción	6
1.1.	Justificación.....	6
1.1.	Antecedentes	8
1.2.	Objetivos de la tesina.....	9
1.3.	Organización del documento	10
2.	Método de los Caudales Nocturnos (<i>Night flow Method-NFM</i>)	12
2.1.	Historia.....	12
2.1.1.	Método del caudal mínimo ¿Nocturno o Diurno?	13
2.2.	Metodología para la aplicación del NFM.....	15
2.3.	Extensión del método a nivel mundial y sus implicaciones.....	19
2.3.1.	Relación con el Método PRESMAC.....	20
2.4.	Futuro del NFM en países de Latinoamérica	22
3.	Valoración del método de los caudales nocturnos	25
3.1.	El concepto del error para el Método de los Caudales Nocturnos.....	25
3.1.1.	Desviación del volumen de fugas diario	26
3.1.2.	Cálculo del error.....	28
3.1.3.	Maquetación de la metodología de análisis del error	31
3.2.	Casos prácticos.....	35
3.3.	Análisis del Método de los Caudales Nocturnos ante variables hidráulicas	36
3.3.1.	Caso 1.....	37
3.3.2.	Caso 2.....	47

3.4.	Análisis del Método de los Caudales Nocturnos para escenarios típicos	54
3.4.1.	Caso 3.....	55
3.4.2.	Caso 4.....	57
3.4.3.	Caso 5.....	61
3.5.	Crítica del procedimiento	63
4.	Evolución del error inicial en el NFM	65
4.1.	El concepto del error inicial para el NFM	65
4.2.	Estimación del Caudal Consumido a la hora del MNF ($Q_{\text{demandado}}$)	67
4.2.1.	Componentes del Uso de agua Nocturno.....	67
4.2.2.	Metodologías para la estimación del caudal consumido ($Q_{\text{demandado}}$) en la hora del mínimo nocturno	69
4.2.3.	Errores típicos en la estimación de consumos nocturnos.....	74
4.3.	Las posibles formas de incurrimientos del error del caudal consumido a la t_{MNF}	76
4.4.	Evaluación del error inicial cuando hay una mala estimación de la demanda en la hora del mínimo caudal nocturno	77
4.4.1.	Metodología para la evolución del error por mala estimación del caudal consumido en el NFM	78
4.4.2.	Cálculo del error en el NFM cuando se tiene un error en el caudal demandado	80
4.5.	Casos prácticos.....	84
4.6.	Análisis de los resultados.....	87
4.6.1.	Transmisión del error inicial del caudal consumido variando la magnitud de éste	87

4.7.	Análisis de la transmisión del error cuando se varia el N1	89
4.8.	Alternativas de mejora para disminuir el error inducido por el caudal consumido	91
4.9.	Crítica del Método de los Caudales Nocturnos.....	92
5.	Análisis del AZP (<i>Average Zone Point</i>)	93
5.1.	Importancia del AZP en el Método de los Caudales Nocturnos.....	93
5.2.	Selección del AZP.....	94
5.2.1.	La primera pauta para la selección del AZP (UK Water Industry) ..	95
5.2.2.	Estado de la cuestion en la selección del AZP	96
5.3.	Análisis sobre la selección del AZP en un DMA	97
5.3.1.	Ponderaciones para un solo parámetro (análisis de sensibilidad)..	98
5.3.2.	Ponderaciones varios parámetros (análisis de sensibilidad)	103
5.3.3.	Selección del nudo AZP.....	104
5.3.4.	Desarrollo de las simulaciones	106
5.4.	Resultados de los análisis para diferentes redes.....	108
5.5.	Alternativas de mejora en la selección del nudo AZP	113
6.	Conclusiones y desarrollos futuros.....	114
	Bibliografía	118
	Anexo 1, casos 3, 4, 5.....	122
	Anexo 2, Caso Real y Variaciones	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Control activo de fugas, en la gestión de fugas (estrategias de la IWA).....	12
Figura 2. Modelo de fugas, basado en el Método de los Caudales nocturnos (adaptado de Puust et al., 2010)	14
Figura 3. Componentes del caudal Nocturno (adaptado del UK Water Industry, 1994)	15
Figura 4. representación de las fuga en epanet	33
Figura 5.esquema gráfico del algoritmo de generación de fugas.....	34
Figura 6. Diagrama grafico del cálculo de errores	35
Figura 7. Topología de la red, caso 1	37
Figura 8. Curva de modulación de las demandas, (caso 1)	38
Figura 9. Correlación entre el error hora a hora variando el nudo AZP, (caso1)	42
Figura 10. Comparación de la evolución del error y el coeficiente de modulación de la demanda (caso1)	46
Figura 12.Correlación entre el error variando la hora de aplicación y el coeficiente de modulación, (caso1).....	46
Figura 13. Topología de la red, caso 2	47
Figura 14. Curva de Modulación de las demandas, (caso 2)	48
Figura 15. Correlación del error hora a hora variando el nudo AZP, (caso2).....	50
Figura 16. Detalle de la correlación hora a hora en el nudo óptimo sin cambiar el T_{MNF} (caso 2)	50
Figura 17. Correlación entre el caudal bombeado y el error del AZP óptimo, (caso 2).....	52
Figura 18.Correlación entre el error variando la hora de aplicación y el coeficiente de caudal bombeado (caso 2)	54
Figura 19. Variación de la presión y pérdida de carga en la hora T_{MNF} , (caso3).....	56
Figura 20. Variación de la presión y pérdida de carga en la hora de máximo consumo, (caso 3)	56
Figura 21.Variación de la presión en la hora T_{MNF} con gestión ineficiente, (caso4a)	58
Figura 22. Variación de la presión en la hora T_{MNF} con gestión de presiones, (caso4b).....	60
Figura 23. Topología de red compleja, (caso 5)	61
Figura 24. frecuencia de errores cambiando el nudo AZP, (caso 5)	62
Figura 25. Partes de la fórmula de extrapolación de volúmenes.....	66
Figura 26. Componente del caudal mínimo nocturno (Fantozzi, 2010).....	69

Figura 27. Consumo medio nocturno para usuarios no domésticos, (Arregui, 2004)	73
Figura 28. Metodología para evaluar el error del NFM, con un error inicial	80
Figura 29. Esquema de la red de análisis, (error inicial).....	84
Figura 30. Modulación de altura del embalse, (error en el caudal consumido).....	86
Figura 31. Modulación de la demanda (error en el caudal consumido).....	86
Figura 32. Transmisión del error en el NFM	89
Figura 33. evolución del error del NFM, para diferentes N1 y estimaciones iniciales de Q_d .	90
Figura 34. Distribución de cotas en una red	100
Figura 35. Esquema del módulo programado, para la evaluación del AZP	107
Figura 36. Presentación en pantalla de los resultados	108
Figura 37. variación general de los diferentes métodos para la selección del AZP	110
Figura 38. Variación espacial de la pérdida de carga y la densidad de tuberías para el caso 3.....	111
Figura 39. Variación de presión y cotas del caso 4	112

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

La gestión de las redes de distribución de agua busca abastecer de forma eficiente la población, sin dejar a un lado la sostenibilidad ambiental. Tradicionalmente, esta gestión ha estado dirigida desde la oferta: construcción y ampliación. Pero el nuevo contexto de las empresas de agua, el cambio climático y las necesidades cambiantes de la sociedad, han dejado ver la necesidad de preparar planes de gestión eficiente para las redes actuales. Estos planes deben estar orientados a mejorar sustancialmente su operación y disminuir los volúmenes de agua fugada en la red, que en algunos casos, a la fecha presenta valores alarmantes. Tal es el caso de Estados Unidos donde se ha llegado a 7 billones de galones diarios fugados: 26.5 Hm³/día, (ASCE, 2010).

Ante la creciente necesidad de mejorar las redes, se han elaborado metodologías de gestión de fugas de agua, muchas de ellas fundamentadas en el empirismo del conocimiento asociado a la operación. En el Reino Unido han nacido muchas de las metodologías para la gestión activa de fugas, como el denominado Método de los Caudales mínimos Nocturnos (NFM)¹, la cual es la práctica más utilizada internacionalmente. Y así su aplicación se ha extendido tanto en localización (su eficacia ha sido probada en otros países, como Brasil, Colombia,

¹ El Método de los Caudales mínimos Nocturnos, conocido en la literatura inglesa como *Night Flow Method o NFM*. Durante el documento se utilizará dicha abreviatura.

Mexico, etc.), como en alcance, al ser extrapolado a la gestión de presiones con el conocido método Simplificado Presmac (McKenzie, 2001).

Gracias a la practicidad del método y a la agilidad que proporciona en la gestión de una red (cálculo de volúmenes fugados), éste se ha vuelto una herramienta del día a día en muchas empresas de agua a escala mundial. Pero, quizá por los mismos motivos, también han ido saliendo a la luz, algunas inconsistencias en la base científica del mismo, pues se ha constatado que los resultados generados (previsión de volúmenes fugados), no son del todo correctos. Este error es consecuencia del tratamiento simplificado de las variables hidráulicas y físicas inherentes a la propia metodología del NFM; así como en las asunciones en el momento de aplicarlo, las cuales admiten conocer perfectamente el consumo nocturno de la red, mientras no consideran de manera explícita el error de los instrumentos de medida. Todo esto conduce a no alcanzar resultados del todo fiables en un método de uso rutinario en las empresas de distribución.

Un segundo problema asociado al NFM, es consecuencia de su metodología de cálculo, que recae sustancialmente en un punto de la red, el cual debe recoger las características medias (presiones) del sistema, denominado Punto Promedio del Distrito (AZP)². El problema de esta asunción es que se asocie el comportamiento «medio» del sector a dicho punto, no existiendo estudios rigurosos que analicen en qué casos tal supuesto proporciona resultados correctos y cuando se incurre en errores importantes.

Todo esto muestra necesidad de evaluar profunda y sistemáticamente este método con el fin de «regular» su uso en los sistemas de distribución, para así aumentar la exactitud de sus resultados.

² Punto Promedio del Distrito: conocido en la literatura inglesa como *Average Zone Point (AZP)* o también *Average Zone Pressure*. Durante el documento se utilizará dicha abreviatura

1.1. Antecedentes

El siglo XXI se está caracterizando por plantearle a la sociedad retos formidables: cambio climático, crisis económica mundial, catástrofes naturales, etc. Para dar una respuesta adecuada se requiere una nueva clase de gerente en las empresas de servicios públicos. Debe esforzarse por aumentar el rendimiento de la red, siendo responsable a su vez de la sostenibilidad del recurso hídrico. Esto crea grandes desafíos para la ingeniería hídrica, siendo el motor del campo denominado «gestión del recurso hídrico». A principios de la década de los años noventa un aumento de la sensibilidad ambiental propicia nuevas investigaciones, creándose las bases para la estructura de la gestión de fugas, pues ya no eran aceptables los distribuidores ineficientes y con actividades aisladas en sus contextos respectivos.

Muchos autores en los años noventa produjeron los pilares de estas metodologías con más de diez años de aplicaciones en el Reino Unido y Estados Unidos. Entre ellos se destaca Allan Lambert, quien presenta en «*Managing Leakage*» (UK Water Industry, 1994), los esquemas generales de la medición de caudales nocturnos para el cálculo de volúmenes fugados. Posteriormente otros autores hicieron valiosas contribuciones como: Thornton, (2008); y el Comité de Gestión de Presiones del Grupo de especialistas de Pérdidas de Agua de la Asociación Internacional del Agua (IWA). Pero desde la órbita de la gestión de fugas, la contribución más notable es la de McKenzie quien, en 2001, presenta el Método simplificado de Presmac, con el que crea un estándar internacional para la gestión de presiones y el control activo de fugas.

Todas estas contribuciones han estado enfocadas en primer lugar, al refinamiento de las teorías sobre el comportamiento de las fugas y a los parámetros más influyentes sobre éstas (como es el caso del exponente N1 y los coeficientes de fugas). En segundo lugar, a identificar nuevas estrategias para la disminución del volumen fugado por medio de sistemas inteligentes (control en tiempo real tipo SCADA para priorización de actuaciones, o sistemas expertos para la toma de la

decisión más acertada en la gestión de la red). Sin embargo, en los últimos años el interés ha vuelto de algún modo a sus orígenes, retomando las metodologías simples, puesto que la mayoría de los sistemas de distribución del mundo disponen de pocos datos, gestión ineficiente y problemas hidráulicos, según estudios del Banco Mundial en 2010. Por ello, desde el años 2008 el Grupo de Especialistas de Gestión y Operación Eficiente de la Asociación Internacional del Agua, ha creado la iniciativa «*Legitimate Night Use component of Minimum Night Flows Initiative*» con la intención de reevaluar los componentes del caudal mínimo nocturno y actualizar las metodologías. En la misma línea se encuentra el proyecto conjunto «NEPTUNE» de varias universidades europeas, enfocado a la gestión eficiente de la presión en sectores piezométricos. Disponible en la URL <http://centres.exeter.ac.uk/cws/projects/project-neptune>.

1.2. Objetivos de la tesina

El Objetivo Global de este estudio es *revisar los fundamentos hidráulicos del Método de los Caudales mínimos Nocturnos para valorar mejor la fiabilidad en los resultados*. Con el fin de alcanzar tal objetivo, se plantea lo siguiente:

- Repaso de la metodología del NFM, y su evolución con el tiempo.
- Revisión de los parámetros y particularidades del caudal nocturno que condicionan el método.
- Preparación de una estrategia de análisis para calcular el error del procedimiento, desde varias ópticas.
- Evaluación de los errores del método a partir de sus parámetros internos.
- Evaluación de los errores por incertidumbres externas.
- Propuestas de pautas científicas en la selección del AZP.
- Conclusiones, recomendaciones generales y desarrollos futuros a realizar en el marco una tesis doctoral.

1.3. Organización del documento

A continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de los capítulos de la presente tesina. Se estructura en dos grandes bloques, el primero de introducción y el segundo de análisis desarrollos.

El primer bloque lo componen dos capítulos, así:

- En el primer capítulo, además de revisar los antecedentes se describen los objetivos que se pretenden alcanzar en este trabajo.
- El capítulo segundo presenta un compendio de la evolución del método: de dónde surge sus primeros planteamientos y su estado actual. Por otro lado, muestra cómo el método es un estándar a nivel mundial con todas las implicaciones que conlleva.

El bloque de análisis y desarrollos lo conforman tres capítulos, que son:

- El capítulo tercero, describe los fundamentos conceptuales para el análisis del error del NFM. Lo hace presentando varios casos, en los que se analiza la variación del error modificando parámetros y escenarios.

Este capítulo, concluye con una evaluación de las tendencias de los errores del método y sus posibles correcciones.

- El capítulo cuarto, analiza el error del NFM cuando existen errores iniciales en la estimación del caudal consumido en horas del mínimo nocturno. Por ejemplo: permite concretar la evolución en el tiempo de éste como el punto de partida de una propuesta de mejora del método de los caudales mínimos nocturnos. Tiene como objetivo corregir este error en los resultados (volumen fugado).

- El capítulo quinto presenta en primer lugar la importancia del nudo AZP en el método, análisis que permite delinear diferentes propuestas técnicas para la selección del AZP.
- El capítulo sexto presenta las conclusiones y los desarrollos futuros.

2. MÉTODO DE LOS CAUDALES NOCTURNOS (*NIGHT FLOW METHOD-NFM*)

2.1. Historia

El NFM nace gracias a las pautas propuestas por el Grupo de especialistas en Pérdidas de Agua de la Asociación Internacional del agua (IWA, por sus siglas en ingles), dentro del marco de lo que se conoce como el Control Activo de fugas. En la literatura inglesa se conoce como *Active Leakage Control-ALC*, (Figura 1) cuyo propósito es reducir el tiempo durante el cual se encuentran activas las fugas que no muestran signos visibles ni producen reducciones significativas de la presión (Cabrera, 2004).

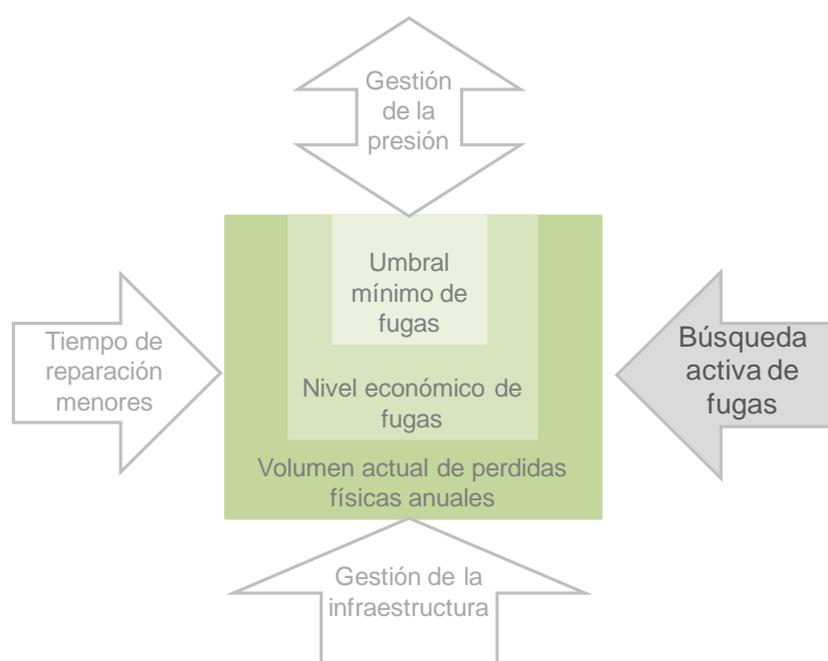


FIGURA 1. CONTROL ACTIVO DE FUGAS, EN LA GESTIÓN DE FUGAS (ESTRATEGIAS DE LA IWA)

Esta metodología inicialmente fue desarrollada en Reino Unido por *United Kingdom Water Industry Research- UKWIR* en el año 1994, donde presentó sus ya memorables informes «*Managing leakage*». Estos informes reunieron una serie de conceptos de la gestión de pérdidas y caudales nocturnos. Igualmente, la UKWIR después de haber presentado dichos informes, depuró estos conceptos, condensándolos y generando nuevos conocimientos en esta rama. Entre los informes más importantes se encuentran (Morrison, 2004):

- «*Leakage Estimation from Night Flow Analysis*»
- «*Estimating Legitimate Non-Household Night Use Allowances*»

Inicialmente, esta serie de recomendaciones fue dispuesta para los abastecimientos del Reino Unido, con el fin de mejorar la gestión, tanto en la distribución como en la disminución de pérdidas de agua. Al cabo de algunos años de uso y su simplicidad en la aplicación, ésta se popularizó a nivel mundial, llegando a ser adoptada por la Asociación Internacional del Agua (IWA), en sus «*Best Practices*», para el control activo de fugas.

En la actualidad, este método es uno de los más utilizados por las empresas de abastecimiento, en especial por los sistemas pobres en control, e información de la red, como es el caso de Suráfrica (McKenzie, 2001). Esto se debe a que su formulación sólo necesita la medición directa en dos puntos de la red: la entrada al sistema y el AZP.

2.1.1. Método del caudal mínimo ¿Nocturno o Diurno?

El NFM necesita como primer dato básico el conocimiento del caudal fugado de la red en una hora «objetivo». Esta hora, por facilidad y confianza recaerá en el momento donde el caudal consumido es mínimo, debido a que se presume una mejor precisión en la medición o estimación del consumo. Por otro lado, al tener el mínimo consumo, la presión en la red será la máxima y por ende mayor el volumen fugado (Figura 2).

Debido a estas dos características de la hora en cuestión, el caudal inyectado se puede disgregar fácilmente, como también obtener de forma más «exacta» el factor multiplicador que disminuirá el volumen fugado en las distintas horas cuando la presión es más baja.

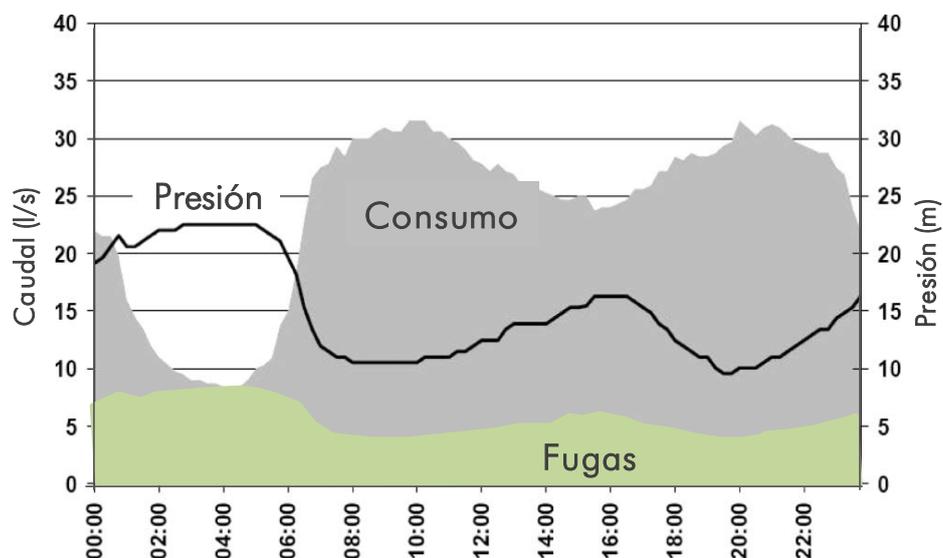


FIGURA 2. MODELO DE FUGAS, BASADO EN EL MÉTODO DE LOS CAUDALES NOCTURNOS (ADAPTADO DE PUUST ET AL., 2010)

De acuerdo a eso y después de varias investigaciones (Lambert, 2002; McKenzie, 2001; Thornton, 2008; entre otros), se postuló que la mejor hora para efectuar este tipo de análisis es entre las 2 y 4 de la mañana, puesto que la mayoría de las personas están dormidas y su consumo es excepcional y está enfocado al uso de la cisterna. Por otro lado, los establecimientos comerciales que en ese momento estén en funcionamiento serán pocos y fácilmente identificables.

Sin embargo, hay que comentar que este método puede aplicarse a cualquier hora, incluyendo los casos donde las demandas mínimas no correspondan con las horas nocturnas. Un ejemplo de este caso, sería la ciudad de Las Vegas donde los consumos máximos se dan en altas horas de la noche y los más bajos en horas de la mañana (Southern Nevada Water Authority, 2008).

2.2. Metodología para la aplicación del NFM

De acuerdo con la metodología desarrollada en el Reino Unido (*UKWIR, 1994a y 1994b*), el caudal mínimo nocturno está formado por una serie de términos (Figura 3), los cuales han sido reformulados en estos últimos años por el grupo de especialistas en pérdidas de la IWA (WLTF, por sus siglas en inglés). Estos términos serán comentados en profundidad en el Capítulo 4, sin embargo la esencia inicial de la distribución de usos sigue siendo la misma.

Caudal mínimo nocturno (MNF)	Caudal consumido	uso nocturno	Consumo excepcional
			Consumo residencial
			Consumo no residencial
	Pérdidas en la red de distribución	pérdidas nocturnas interiores	Pérdidas nocturnas totales
		Pérdidas acometidas	
		Pérdidas red	
	Pérdidas depósitos		

FIGURA 3. COMPONENTES DEL CAUDAL NOCTURNO (ADAPTADO DEL UK WATER INDUSTRY, 1994)

Para lograr entender el NFM, debemos dividir el caudal nocturno inyectado en la red, en dos componentes:

- El caudal consumido, obtenido de manera estimada, gracias a una serie de «valores patrones» producto del análisis estadísticos de innumerables casos, o simplemente medido en el abonado.
- El caudal fugado del sistema, el cual es calculado en función de los parámetros que tienen influencia sobre él, utilizando los principios *BABE* (*Burst And Background Estimate*), como una parte de la metodología citada anteriormente.

Ahora bien, la metodología del NFM para la evaluación del volumen de fugas está basada en un balance de agua durante la hora del caudal mínimo nocturno (t_{mnf} , por sus siglas en inglés³), según el cual, el caudal de fugas (Q_{fugado}) se obtiene como diferencia entre el caudal inyectado en el sector hidrométrico, ($Q_{inyectado}$) y el consumo nocturno de los usuarios ($Q_{demandado}$):

$$Q_{fugado} = Q_{inyectado} - Q_{demandado}$$

Una vez obtenido el caudal fugado en la hora del mínimo nocturno, es posible obtener el volumen de fugas diario del sector, pues este será la extrapolación del volumen de fugas en la hora del caudal mínimo nocturno, por medio de un factor multiplicador de éste. Para lograr tener un acercamiento correcto con la realidad hay que tener en cuenta que las variaciones de presión en la red, tanto espacial como temporalmente a lo largo del día, hacen que el volumen fugado sea menor que un volumen igual a 24 veces caudal fugado en la hora de mínima demanda. Ya que en las demás horas, el caudal demandado o consumido será mayor, obligando a una disminución de la presión y por lo tanto a una disminución de las fugas.

Ese factor multiplicador del caudal fugado se conoce como el factor hora-día (*Hour to Day Factor o HDF*) el cual, mientras no se esté realizando una gestión de presión en el sector, tendrá un valor inferior a 24. En el caso de que se realice algún tipo de control de presión, sí podrá ser mayor que 24, como se muestra en varios estudios en la monografía «Evaluación y control de pérdidas de agua en redes urbanas», (Cabrera, 2004):

En el Reino Unido se estima que los factores hora-día varían entre 15 y 30, con un valor promedio de 22 (Farley y Trow, 2003), mientras que en Sudáfrica se pueden encontrar valores entre 16 y 30 (McKenzie, 2001), aunque en la mayoría de sistemas varían entre 18 y 22 (McKenzie *et al.*, 2002).

³ TMNF: *Time of Minimum Night Flow*, en la nomenclatura inglesa.

En términos generales el factor hora-día, representa el cambio en el caudal fugado a través del tiempo y es proporcional a la variación de la presión de la red con respecto a la presión en la hora del caudal mínimo nocturno. Además esta variación de presión es aportada en exclusividad por el punto más representativo de la red (AZP), del cual comentaremos en mayor profundidad en el Capítulo 5 de este estudio.

Ahora bien, el caudal fugado en una hora determinada también puede representarse por medio de la presión elevada a un exponente, pues las fugas son dependientes de ésta, hecho que fue explicado por May en octubre de 1994, en su artículo, conocido como la teoría FAVAD (*Fixed And Variable Area Discharge paths*) o “los trayectos de descarga de área fija y variable”. Esta teoría demostró que el área transversal de algunos tipos de fugas (agujeros, roturas en tubos, juntas o accesorios) pueden variar también con la presión, mientras la velocidad del flujo seguía variando con la raíz cuadrada de la presión, dando lugar a diferentes tipos de fugas en los cuales el caudal (velocidad por área) podía variar con la presión tal como sigue (Garzón, 2006):

- Áreas fijas (por ejemplo, orificios en las paredes de tubos metálicos) tendrán exponente igual 0.5.
- Áreas que pueden variar a lo largo de un eje (típicamente fugas en juntas, accesorios) tendrán exponente igual 1.5.
- Áreas que pueden variar a lo largo de dos ejes (grietas en tuberías de plástico) tendrán exponente igual a 2.5.

Resumiendo lo anterior, se puede expresar matemáticamente como:

$$Q_{fugado} = K_f P^x$$

Donde:

Q_{fugado} : Caudal fugado a través de los defectos de la red;
 k_f : Coeficiente de fuga

P: Presión de la red
 X: Exponente de fuga (varía entre 0.5 y 2.5)

De acuerdo a estas dos maneras de presentar el caudal fugado de un sistema: la primera como un «caudal fugado patrón», multiplicado por un factor modulador horario (factor hora- día) y la segunda por medio de la variación de la presión en el tiempo elevada a un exponente, nació el NFM, el cual recoge estas dos ideas plasmándolas en una misma ecuación:

$$Q_{\text{fugado,NFM}}(t) = \left(Q_{\text{fugado}}(t_{\text{MNF}}) \right) \times \left(\frac{P_{\text{AZP}}(t)}{P_{\text{AZP}}(t_{\text{MNF}})} \right)^{N1} \quad \text{ECUACIÓN 1}$$

Donde:

$Q_{\text{fugado,NFM}}(t)$: Caudal fugado por la red según el NFM en la hora t, $t \neq t_{\text{mnf}}$;
 $Q_{\text{fugado}}(t_{\text{mnf}})$: Caudal fugado en la red a la hora del caudal mínimo nocturno;
 $P_{\text{AZP}}(t)$: Presión promedio horaria en el nudo AZP en la hora t, $t \neq t_{\text{mnf}}$;
 $P_{\text{AZP}}(t_{\text{mnf}})$: Presión promedio horaria en el nudo AZP, en la hora (t_{mnf});
 N1: exponente de la presión.

El exponente N1 representa la dependencia que tiene el caudal de fuga con respecto de la presión; éste como se comentó anteriormente fue producto de la teoría FAVAD. Hoy en día se han hecho innumerables prueba validando esta aproximación y acotando el rango de este exponente. A continuación se presentan los diferentes valores adoptados en los países con mayor desarrollo en este campo (Tabla 1):

TABLA 1. RESUMEN DE VALORES DE N1, PRODUCTO DE TEST EN CAMPO. (ADAPTADO DE PUUST ET AL., 2010)

País	Número de Zonas testeadas	rango del exponente N1	N1 promedio
Reino Unido (1970s)	17	0.7 a 1.68	1.13
Japón (1979)	20	0.63 a 2.12	1.15
Brasil (1998)	13	0.52 a 2.95	1.15
Reino Unido (2003)	75	0.64 a 2.83	1.01
Chipre (2005)	15	0.73 a 2.42	1.47
Brasil (2006)	17	0.36 a 2.95	1.4

2.3. Extensión del método a nivel mundial y sus implicaciones

Como ya se ha comentado, este método inicialmente fue creado para ser una ayuda complementaria en la gestión de fugas de los operadores de Reino Unido, sin embargo dado que era una metodología simple y con «elevada fiabilidad» ha llegado a ser rápidamente (aproximadamente 10 años) un patrón internacional.

La gran versatilidad de sus resultados ha servido para diferentes campos en la gestión de pérdidas de agua en sistemas de distribución de agua potable, como son:

- Identificador para conocer qué sectores hidrométricos (DMA) tienen los mayores índices de agua fugada, pues al conocer los volúmenes fugados de cada subsistema se puede seleccionar en dónde intervenir.
- Para evaluar el exceso probable del caudal nocturno, como consecuencia de roturas no comunicadas en los sectores hidrométricos (metodología propuesta por UKWIR, 1994).
- Gestión de presiones en los sectores hidrométricos, con el fin de reducir el caudal fugado en las horas de máxima presión, además de control activo de fugas (variación del método «PRESMAC, 2001»).

Es de reconocer que este método ha sido la base conceptual para diversos estudios en el campo de la gestión de pérdidas, como lo muestra el último congreso sobre pérdidas en Brasil (*Water Loss 2010*), donde una gran parte de las ponencias contenían rasgos del método de los flujos nocturnos:

- Strategies to Integrate District Metered and Pressure Management Area Design Principles to Achieve and Benchmark Lowest Level of Leakage (Kenneth J. et al., 2010).
- Legitimate Night Use component of Minimum Night Flows Initiative (Fantozzi M. et al., 2010).

- Introducing Advanced Pressure Management at Enia utility (Italy): experience and results achieved (Fantozzi M. et al., 2010).

Si bien desde el año 1994, cuando la metodología dio a luz los constantes avances para comprobar la fiabilidad de las teorías, FAVAD y BABE dieron grandes impulsos en la extensión y practicidad del NFM. Al cabo de los años éste se ha tomado como un «dogma» de la ingeniería hidráulica (gestión de pérdidas), perpetuando la sensible falta de rigor teórico que el método tiene en su procedimiento.

La empresas de distribución de agua ya muestran gran interés por tener una mejor comprensión del método, en especial cuándo es viable utilizarlo y qué lo puede hacer fallar, entre otras, además de generar una metodología estandarizada y mejorada para aumentar su exactitud.

2.3.1. Relación con el Método PRESMAC

Una de las aplicaciones más importantes del NFM fue planteada por Ronnie McKenzie y Allan Lambert en el año 1999. Crearon un modelo para la gestión de la presión y el control activo de fugas, el cual fue desarrollado por «*Water Research Commission (WRC)*», incorporándolo a la Guía de Usuario para la gestión y control de la presión de Suráfrica.

PRESMAC⁴, permite hacer una estimación de la reducción de fugas por reducción de la presión en la red, mediante un análisis de los componentes basados en los principios BABE. Esto quiere decir que por medio de PRESMAC, es posible calcular qué reducción de la presión es necesaria para producir una disminución de las fugas hasta un nivel deseado.

Si bien este modelo está basado en los principios BABE y FAVAD, su base de cálculo está dada por NFM para los volúmenes fugados, siendo éste una parte de la

⁴ Pressure Management Program

metodología iterativa que PRESMAC ha desarrollado; donde se cambian las presiones iniciales de la red, disminuyéndolas hasta un valor dado, para obtener menores caudales fugados.

A continuación se presenta de forma resumida, la metodología de PRESMAC, para observar la relación intrínseca con el NFM.

Inicialmente se calculan las pérdidas de agua para el estado inicial de la red, por medio del NFM. Seguidamente, se evalúa por el método PRESMAC, el cual utiliza mismo punto de AZP como representante de la distribución de la presión a lo largo de toda la red. A su vez, este modelo tiene en cuenta un nuevo punto donde la presión tiene un valor mínimo crítico.

El método PRESMAC es un modelo iterativo, en el cual la presión en la entrada del sistema es disminuida hasta un valor, donde el punto crítico toca un límite preestablecido. En este proceso se deben volver a calcular los volúmenes fugados corregidos por la nueva presión del sistema. Este caudal fugado se expresa de manera similar al NFM, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_{fugado,PRV}(t) = Q_{fugado}(t) \times \left(\frac{P_{AZP,PRV}(t)}{P_{AZP}(t)} \right)^{N1}$$

Donde:

$Q_{fugado,PRV}(t)$: Caudal fugado por la red en la hora t , después de tener una regulación de la presión en la entrada del sistema;

$Q_{fugado}(t)$: Caudal fugado en la hora t , sin regulación del sistema;

$P_{AZP}(t)$: Presión promedio horaria en el nudo AZP en la hora t , sin regulación de la presión del sistema;

$P_{AZP,PRV}(t)$: Presión promedio horaria en el nudo AZP en la hora t , después de la regulación de la presión del sistema;

N1: exponente de la presión.

El subíndice PRV, representa la situación cuando la válvula reductora de presión está en marcha (*Pressure Reduction Valve*). El problema radica en que las nuevas presiones son desconocidas. Hay que tener conocimiento de dos situaciones importantes: la primera es que una bajada de presión en la entrada se traduce en

menor magnitud en el AZP y en segundo lugar, al disminuir la presión se debe tener cuidado de asegurar que las presiones en el punto crítico⁵ de la red, estén por encima del patrón elegido.

El proceso iterativo comienza por asumir que la caída de presión en AZP será igual a la que corresponde al punto de entrada. Con esta estimación de las presiones por hora en AZP, los nuevos caudales de fugas son calculados, y entonces es posible calcular la pérdida de carga entre los puntos de entrada y AZP y compararla con la estimación inicial. Si hay una discrepancia importante, se debe hacer una nueva iteración.

Cuando el proceso iterativo termina, la presión en el punto crítico puede ser calculada a partir de la pérdida de carga entre puntos de entrada y el punto crítico. Si la presión resultante en el punto crítico está por debajo del requisito mínimo de presión, la presión de entrada debe ser aumentada.

2.4. Futuro del NFM en países de Latinoamérica

Latinoamérica posee la cuarta parte de los recursos hídricos del planeta y abastece a un 6% de la población mundial (Benavides, 2008), otorgándole un referente mundial en necesidades y proyecciones futuras en la gestión del recurso hídrico, por eso es necesario tener en cuenta las necesidades de esta región en los desarrollos de los modelos de gestión, como es el caso del NFM.

Es necesario comprender el panorama no alentador, que evidencian los sistemas hídrico urbanos de la región, el cual ha sido terriblemente atacado por la falta de inversiones en infraestructura, consecuencia de la crisis de los ochenta (recordada como la década perdida), el imparable aumento demográfico sobre todo

⁵ Punto en la red donde se produce la mínima presión

en las grandes capitales y los problemas de salud de la región que culmina con el retorno del cólera en el 1991 (CYCED, 2007).

Estos tres grandes inconvenientes generan una deficiente gestión de la redes de agua, las cuales en su intento de seguir la expansión urbana, proveer agua tratada y tener un alto nivel de presión, dejaron a un lado el conocimiento hidráulico de las redes y, con él la renovación de la infraestructura, ya caduca por la expansión y la mala calidad.

Ahora bien, después de haber hecho un barrido del panorama de la región es claro que el posicionamiento del NFM está más que consolidado, pues es una herramienta para el mejoramiento continuo de los sistemas de gestión de estos países, además de su uso contra el desbordamiento del nivel de fugas en los sistemas:

- Es un método simple, el cual puede ser aplicado por un personal con poco conocimiento hidráulico, como son la mayoría de los operarios de mantenimiento de redes en Latinoamérica.
- Su metodología es ideal para sistemas con poca información sobre su infraestructura. Sin embargo, como se irá comentando en los diferentes capítulos, esta falta de información puede ser contraproducente para la fiabilidad de los resultados del método.
- Como se mencionó, el NFM tiene como gran uso el método PRESMAC, el cual es una excelente herramienta en la gestión de la presión (como primera aproximación en una red), puesto que es de uso gratuito.

Todo esto es clara evidencia de que el NFM seguirá siendo uno de los métodos con mayores adeptos en los países en desarrollo, además es de esperar avances en su optimización

Finalmente, después de esta revisión del pasado, presente y futura del NFM, se deja decantar el por qué de los análisis estrictos de los siguientes capítulos, buscando en futuro un «Protocolo de aplicación formal» de este método.

3. VALORACIÓN DEL MÉTODO DE LOS CAUDALES NOCTURNOS

3.1. El concepto del error para el Método de los Caudales Nocturnos

Como se ha mencionado en el anterior capítulo, es necesario hacer una valoración profunda del Método de los Caudales Nocturnos, que logre darle bases sólidas a las diferentes partes que componen la metodología y además aumente la exactitud de los resultados.

El NFM es una aproximación para obtener el volumen fugado en cada hora del día o bien el volumen fugado en un periodo dado. Sin embargo, debido a las aproximaciones y asunciones que éste tiene incorporadas, el volumen fugado resultante no será estrictamente el volumen fugado real de la red, sino un valor que rondará una horquilla alrededor del valor real.

En la actualidad, no se ha evaluado un rango estándar para esta diferencia, sin embargo algunos autores indirectamente le han atribuido un valor máximo del 10% hacia el lado conservador (McKenzie, 2001). La presente investigación mostrará que el rango no se puede definir concretamente, puesto que los errores en que el método incurre al predecir el volumen fugado, varían por las «características» de la red. Así el error será la desviación entre volumen fugado predicho por NFM y el volumen realmente fugado de la red.

Finalmente cabe recordar que el NFM, si bien es un método simplificado, está totalmente ligado a las variables hidráulicas propias de cada red. Esto genera que un análisis profundo del error de éste sólo sea posible en una red en concreto. Por

consiguiente, los análisis del error en términos globales, darán tendencias del comportamiento del NFM para estados o variables decisorias, susceptibles a variaciones puntuales.

3.1.1. Desviación del volumen de fugas diario

Entendido el concepto de error en el NFM, la importancia recae ahora en la «circunstancia» que lo produce en mayor o menor medida en la red. Al revisar el método, se encontró que la causa superior de error y propiamente de la variación de éste, está referida a su principal ventaja, esto es, al uso de un mínimo de información sobre la red (nudo AZP). Sin embargo, esta fuerte simplificación del sistema real conlleva que el volumen fugado calculado por el método esté afectado por un cierto «desajuste» con respecto al real, el cual depende enormemente de que el nudo AZP logre representar el comportamiento de todo sistema.

Entrando más en el método de NFM, se puede observar que al utilizar un nudo cuyas cualidades recojan todas las características de la red (AZP), como único parámetro de variación del volumen hora a hora, se está aplicando una ley general de distribución de presiones en los diferentes nudos del sistema; esto fue demostrado por García y col. (2006).

Esta ley de distribuciones de presiones en una red tiende a ser lineal y directamente proporcional para todos los nudos de la red, con respecto a la variación de la presión del nudo AZP. Esto quiere decir que la presión en un punto (n) del sistema estará condicionada o modulada por la variación de la presión en el AZP, siendo evidente que la asunción cometida es producto en sí de su formulación principal.

La realidad dista mucho de este tipo de distribuciones de presiones ideada por el método, debido a que la presión en un nudo es producto de las pérdidas de carga que el agua tiene en los n caminos hasta llegar al nudo, más la influencia de la

demanda que el nudo ejerza con respecto a la demanda general de la red, no por la simple variación de un punto característico de red.

Retomando a García, (2006), esta distribución se puede plantear matemáticamente por medio de la ecuación de fugas dependientes de la presión ya presentada en el Capítulo 2, la cual enfocada a un nudo específico de una red, será:

$$Q_{f,j}(t) = C_j \times P_j^{N1}(t) \quad \text{ECUACIÓN 2}$$

Donde:

- Q_{f,j}: caudal fugado para el nudo j en el instante t horas;
- C_j: Coeficiente de descarga para el nudo j;
- P_j(t): presión promedio para cada hora en el nudo j y en la hora t.;

Extrapolando la Ecuación 2 a la red y asumiendo que el caudal fugado (Q_f) estimado en la hora de aplicación del método es correcto y conocido, esta ecuación sería la multiplicación del vector de coeficientes de fugas de cada nudo por el vector de presiones del mismo. Por otro lado, al conocer el caudal de fugas total de la red en la hora t_{MNF} es razonable suponer que la distribución de presiones nodales también es conocida. De una forma matemática, puede expresarse como:

$$Q_f(t_{MNF}) = \sum_{j=1}^N Q_{f,j} = \langle C_1 | C_{AZP} | \dots | C_N \rangle \times \begin{bmatrix} P_1^{N1}(t_{MNF}) \\ P_{AZP}^{N1}(t_{MNF}) \\ \vdots \\ P_N^{N1}(t_{MNF}) \end{bmatrix} \quad \text{ECUACIÓN 3}$$

Donde:

- Q_f(t_{MNF}): Caudal fugado en la hora t_{MNF}, el cual es estimado y conocido;
- C_N: Coeficiente de descarga para el nudo N;
- P_N(t): presión promedio para la hora t, de los N nudos.
- N1: Exponente de fuga.

Remplazando la Ecuación 3 en la ecuación de los NFM (Ecuación 1), presentada en el Capítulo 2 donde (N) representa el número de nudos en el sistema, se obtiene la siguiente formulación:

$$Q_{f,NFM}(t) = \langle C_1 | C_{AZP} | \dots | C_N \rangle \times \left[\begin{array}{c} P_1^{N1}(t_{MNF}) \\ \frac{P_{AZP}^{N1}(t_{MNF})}{\vdots} \\ P_N^{N1}(t_{MNF}) \end{array} \right] \times \left[\frac{P_{AZP}(t)}{P_{AZP}(t_{MNF})} \right]^{N1}$$

Para simplificar un poco el sistema, tenemos ahora que:

$$Q_{f,NFM}(t) = \langle C_1 | C_{AZP} | \dots | C_N \rangle \times \left[\begin{array}{c} P_1^{N1}(t_{MNF}) \\ \frac{P_{AZP}^{N1}(t_{MNF})}{\vdots} \\ P_N^{N1}(t_{MNF}) \end{array} \right] \times K(t)$$

$$Q_{f,NFM}(t) = \langle C_1 | C_{AZP} | \dots | C_N \rangle \times \left[\begin{array}{c} \frac{P_1^{N1}(t_{MNF}) \times K(t)}{P_{AZP}^{N1}(t_{MNF}) \times K(t)} \\ \vdots \\ \frac{P_N^{N1}(t_{MNF}) \times K(t)}{P_N^{N1}(t_{MNF}) \times K(t)} \end{array} \right]$$

Donde:

- $Q_{f,NFM}(t)$: Caudal fugado calculado según el NFM, en la hora t ;
- C_N : Coeficiente de descarga para el nudo N ;
- $P_N(t)$: presión promedio para la hora t , de los N nudos.

Y de manera implícita, el NFM, estará asignando una presión en cada nudo de la red de la siguiente manera:

$$P_j(t) = P_j(t_{MNF}) \times \frac{P_{AZP}(t)}{P_{AZP}(t_{MNF})} \quad \text{ECUACIÓN 4}$$

Finalmente, de acuerdo a esta asignación de presiones nodales en el sistema, se puede concluir que en cuanto los nudos del sistema real se aproximen a esta distribución y en general a la variación hora a hora del AZP, el método tendrá un menor error, ajustándose a la realidad.

3.1.2. Cálculo del error

La evaluación del error como se mencionó antes, se consigue comparando los valores de volumen fugado obtenido por medio del NFM y el valor real del sistema. Para lograr tal cometido en este estudio, se tomó un modelo matemático de red

generado en Epanet como el sistema real, el cual por sus características hace posible obtener de manera rigurosa la variación de la presión y caudal en los nudos y tuberías en cualquier tiempo y lugar, teniendo un control excepcional tanto del sistema, como del propio análisis de las discrepancias.

La comparación entonces, estará dada por el volumen fugado calculado por el NFM y el volumen fugado encontrado del modelo de Epanet. Para lograr aseverar una buena coherencia y unión entre estos dos sistemas se asumió que la evolución de la presión en el AZP hora a hora es igual para el modelo del NFM y el modelo matemático de la red.

Ahora bien para calcular el error se tuvo también en cuenta un «principio básico» de este análisis, el cual es clave para el desarrollo matemático:

En la hora de aplicación del método (t_{MNF}) se tiene que el caudal fugado en esta hora calculado por el NFM y el caudal fugado propio del sistema real (Modelo matemático de red), es exactamente el mismo.

Esta asunción es importante pues se está aceptando que en la hora del mínimo nocturno los caudales han sido perfectamente medidos. Sin embargo, en el Capítulo 4, se analizará el caso de un error de partida en la estimación del caudal consumido.

Por otro lado, se utilizará como parámetro de error el «error relativo», por su gran estabilidad numérica en la algoritmia, además éste no posee unidad de medida, debido a que está corregido con la magnitud de la medición, dando una idea de la exactitud de la medida. Sin embargo, la ventaja principal de utilizar este tipo de error es la capacidad de comparar resultados entre una red y otra, puesto que son valores normalizados, posibilitando la validación de tendencias en diferentes redes.

Ahora sí, entrando propiamente en el cálculo del error, éste se desarrolló matemáticamente de la siguiente manera. Suponiendo que el volumen de fugas diarias obtenidas mediante Epanet es el valor real, el error relativo ε será,

$$\varepsilon = \frac{V_{f,NFM} - V_{f,epanet}}{V_{f,epanet}} = \frac{24 \times \bar{Q}_{f,NFM} - 24 \times \bar{Q}_{f,epanet}}{24 \times \bar{Q}_{f,epanet}} \quad \text{ECUACIÓN 5}$$

$$\varepsilon = \frac{V_{f,NFM} - V_{f,epanet}}{V_{f,epanet}} = \frac{24 \times \bar{Q}_{f,NFM} - 24 \times \bar{Q}_{f,epanet}}{24 \times \bar{Q}_{f,epanet}}$$

Dónde:

$V_{f,NFM}$: El volumen de fugas diarias obtenido por el método de los Caudales Nocturnos (*Night Flow Methodology-NFM*);

$V_{f,epanet}$: El volumen de fugas diarias obtenido por Epanet;

$\bar{Q}_{f,NFM}$: Caudal promedio de fugas durante el día, obtenido por el NFM;

$\bar{Q}_{f,epanet}$: Caudal promedio de fugas durante el día, por Epanet.

De acuerdo al principio básico, el caudal fugado en la hora del mínimo nocturno (t_{MNF}), será igual al caudal fugado obtenido por el modelo de Epanet (sistema real) entonces se cumplirá:

$$C_{NFM}(t_{MNF}) \times \bar{Q}_{f,NFM} = C_{epanet}(t_{MNF}) \times \bar{Q}_{f,epanet} \quad \text{ECUACIÓN 6}$$

Donde:

C_{NFM} : Coeficiente de modulación del caudal fugado para la hora t_{MNF} , obtenido por NFM, para toda la red;

C_{epanet} : Coeficiente de modulación del caudal fugado para la hora t_{MNF} , obtenido por Epanet, para toda la red.

La combinación de la, Ecuación 5 y la Ecuación 6 da como expresión:

$$\varepsilon = \frac{C_{epanet}(t_{MNF}) - C_{NFM}(t_{MNF})}{C_{NFM}(t_{MNF})} = \frac{C_{epanet}(t_{MNF})}{C_{NFM}(t_{MNF})} - 1$$

Por otro lado, los caudales fugados horarios del modelo Epanet pueden expresarse:

$$Q_{f,epanet}(t) = \sum_{j=1}^N C_j \times P_j^{N1}(t) = C_{epanet}(t) \times \bar{Q}_{f,epanet}$$

$$\sum_{j=1}^N C_j \times P_j^{N1}(t) = C_{epanet}(t) \times \frac{\sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^N C_j P_j^{N1}(t)}{24}$$

$$C_{epanet}(t) = \frac{24 \times \sum_{j=1}^N C_j \times P_j^{N1}(t)}{\sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^N C_j P_j^{N1}(t)} \quad \text{ECUACIÓN 7}$$

$$C_{epanet}(t) = \frac{24 \times \sum_{j=1}^N C_j \times P_j^{N1}(t)}{\sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^N C_j P_j^{N1}(t)}$$

Este planteamiento se puede aplicar de la misma forma al caudal fugado, calculado por el NFM:

$$Q_{f,NFM}(t) = C_{NFM}(t) \times \bar{Q}_{f,NFM} = Q_F(t_{MNF}) \times \frac{P_{AZP}^{N1}(t)}{P_{AZP}^{N1}(t_{MNF})}$$

$$C_{NFM}(t) \times \frac{Q_F(t_{MNF}) \times \frac{\sum_{t=1}^{24} P_{AZP}^{N1}(t)}{P_{AZP}^{N1}(t_{MNF})}}{24} = Q_F(t_{MNF}) \times \frac{P_{AZP}^{N1}(t)}{P_{AZP}^{N1}(t_{MNF})}$$

$$C_{NFM}(t) = \frac{24 \times P_{AZP}^{N1}(t)}{\sum_{t=1}^{24} P_{AZP}^{N1}(t)} \quad \text{ECUACIÓN 8}$$

Y por último, la combinación de la Ecuación 5, Ecuación 7 y Ecuación 8, será el error relativo como:

$$\varepsilon = \frac{[\sum_{j=1}^N C_j P_j^{N1}(t_{MNF})] \times [\sum_{t=1}^{24} P_{AZP}^{N1}(t)]}{[\sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^N C_j P_j^{N1}(t)] \times [P_{AZP}^{N1}(t_{MNF})]} \quad \text{ECUACIÓN 9}$$

3.1.3. Maquetación de la metodología de análisis del error

La formulación del error a simple vista no tiene mayor funcionalidad sin un análisis de la variación de éste, producto del cambio de los estados de las variables presentes en la redes. Para ejemplificar eso, se analizaron dos situaciones:

- La variación del error conforme se cambia el nudo AZP, admitiendo como posible AZP cualquier nudo de la red. Para esta situación se dejó constante la hora de aplicación del método (de 3 a 4 de la mañana). A su vez, se dividió en el error durante todo el periodo extendido (1 día) y el error que cometía el método durante cada hora.
- La variación del error cambiando la hora de aplicación del método durante el periodo extendido (24 horas), dejando como constante el nudo AZP óptimo, el cual es el que da menor error en la anterior situación para la red en análisis.

Para lograr tales propósitos se utilizó la plataforma MathLab, utilizando el modulo de Toolkit de Epanet, puesto que su lenguaje está enfocado a desarrollos matemáticos, disminuyendo los tiempos de cálculo y otorgando flexibilidad a la variables. En esta plataforma de desarrollo matemático se crearon dos módulos de simulación; el primero enfocado a la aplicación de fugas en la red, por medio de «válvulas de descarga de agua en función de la presión» y el segundo el cálculo del error para los dos casos antes comentados.

A continuación se presentan las diferentes metodologías seguidas por cada uno de los dos módulos, para lograr su cometido:

Modelación de las fugas en la red

Debido a la importancia de representar los efectos de una fuga y sus características (dependencia de la presión) en los modelos matemáticos de las redes en este estudio, se propuso la siguiente metodología de asignación de caudal fugado en el sistema. Es de recordar que estos modelos deben representar de la forma más exacta posible el comportamiento natural de un sistema real, puesto que los modelos analizados fueron tomados como la realidad de un sistema hidráulico.

Para lograr representar adecuadamente el evento de una fuga, se utilizaron emisores en los nudos de las redes, los cuales asemejan una válvula que descarga

a la atmósfera donde el caudal que entrega al medio depende de la presión del nudo (Figura 4).

El volumen fugado de todas las redes analizadas fue de un 30% con respecto al volumen total inyectado; en otras palabras todas las redes analizadas tienen un rendimiento global (η_g) del 70%.

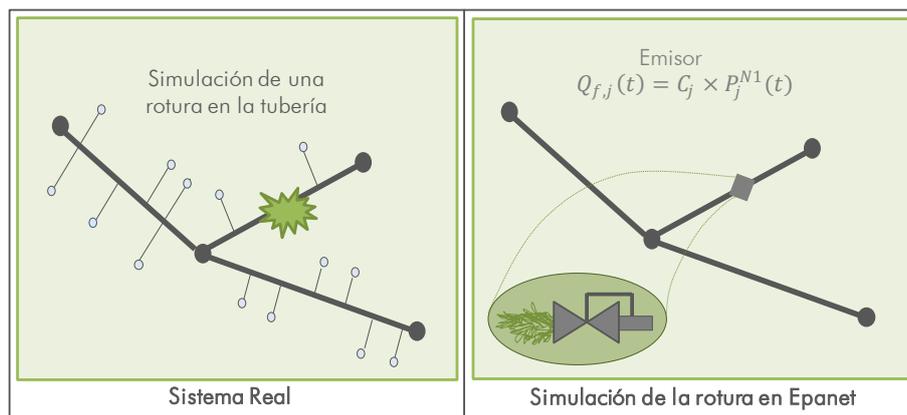


FIGURA 4. REPRESENTACIÓN DE LAS FUGA EN EPANET

Para lograr tal cometido, se utilizó una variación de la metodología propuesta por Almandoz, (2005), en la cual el objetivo principal es ajustar el coeficiente de cada emisor (Ecuación 1), para que el rendimiento global de la red tenga el valor deseado.

Las fugas en la red son eventos complejos de atribuir y casi imposible de predecir en los sistemas, pues dependen de muchas condiciones, tanto físicas como hidráulicas. Sin embargo, su distribución espacial, puede ser asignada de manera «convinciente» a variables como la longitud y el diámetro de las tuberías que converjan en el nudo, así como la edad, material, densidad de acometidas, etc. Aunque, por eficiencia en el análisis se utilizó el caso más simple, donde sólo se tomó como criterio la media longitud de las tuberías que llegan a cada nudo.

A continuación se presenta el esquema general de este método:

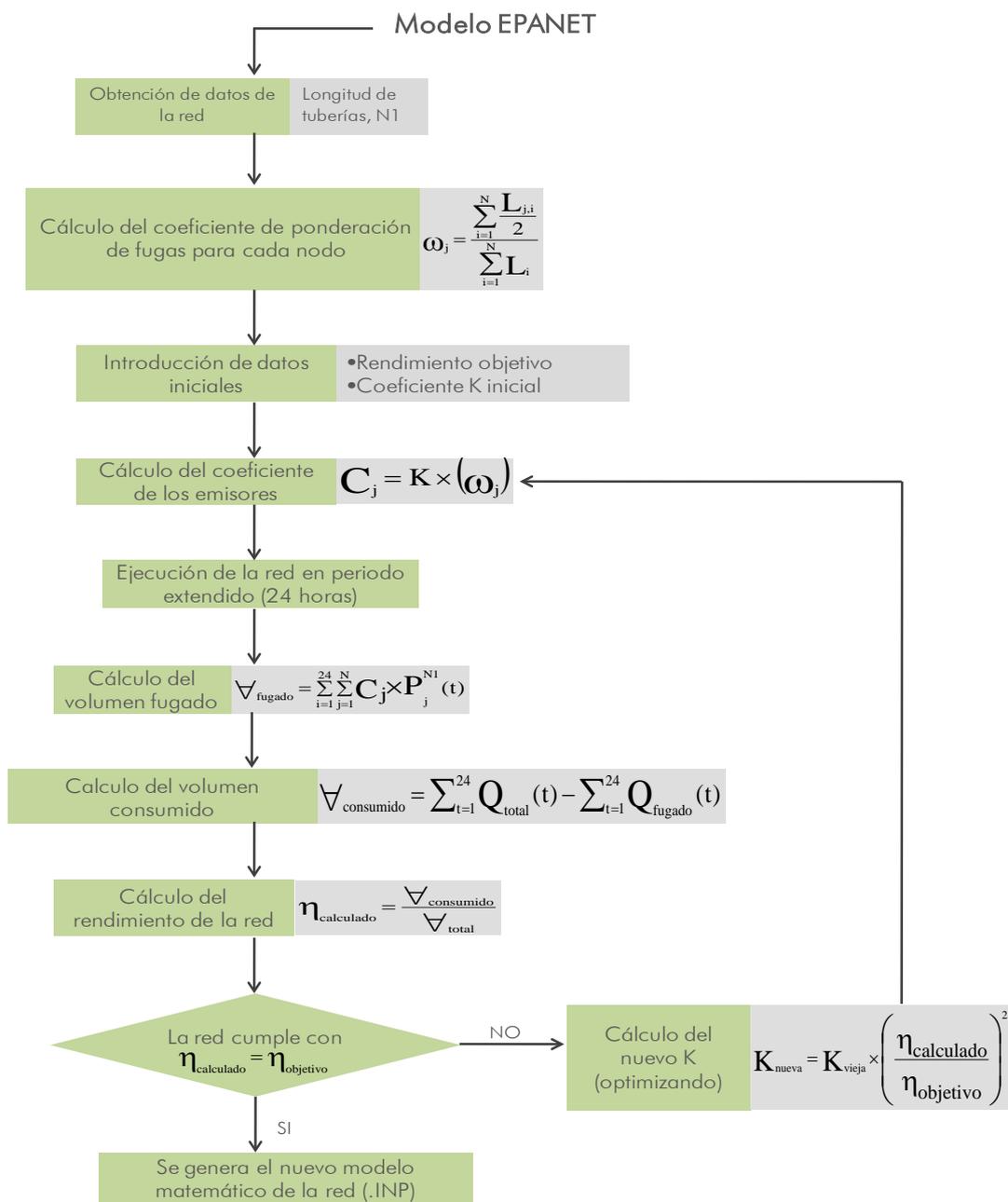


FIGURA 5. ESQUEMA GRÁFICO DEL ALGORITMO DE GENERACIÓN DE FUGAS

Cálculo de los errores del NFM

Anteriormente se explicó el desarrollo matemático para éste cálculo, sin embargo debido a la cantidad y complejidad de cálculos que el análisis demanda y uso de diferentes variables hidráulicas, fue imprescindible programar la herramienta en varios módulos con el fin de optimizar el algoritmo. Este módulo está dispuesto

para utilizar una red, cargada con válvulas de fugas (emitters). A continuación se presenta el flujo-grama:

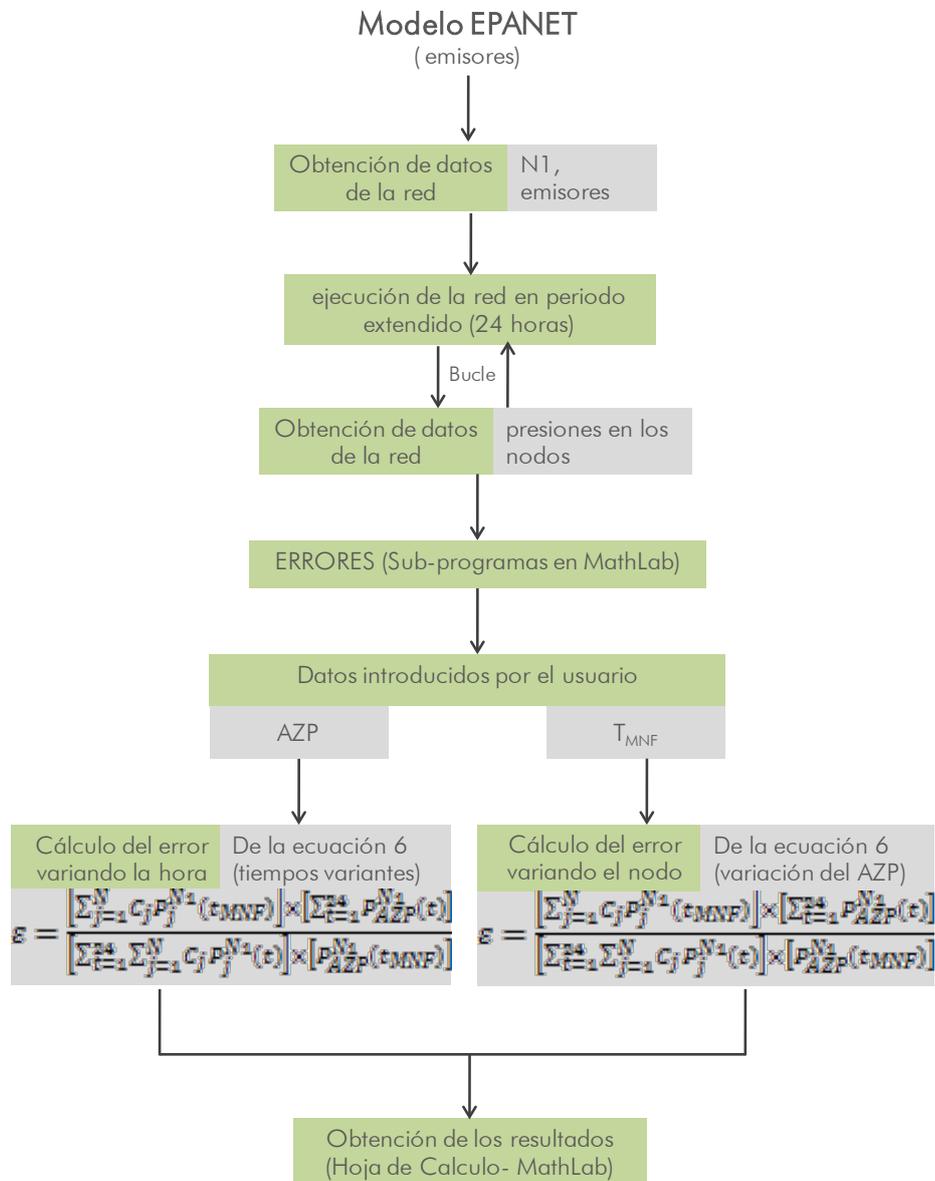


FIGURA 6. DIAGRAMA GRAFICO DEL CÁLCULO DE ERRORES

3.2. Casos prácticos

Si bien el cálculo del error, el cual es consecuencia de la concepción resumida de la realidad en las redes, es una tarea compleja y abstracta, en el sentido de correlacionar éste a variaciones hidráulicas presentes en las redes. Sin embargo, para lograr soslayar los diversos problemas y asegurar la generalidad de las

conclusiones en casi todos los tipos de red, se analizaron varios casos, de los cuales se eligieron los que mejor mostraban el comportamiento del NFM, para ser presentados en éste documento.

Los casos presentados están enfocados sobre dos ideas diferentes con la finalidad de hacer una evaluación rigurosa y completa al método:

- Los primeros casos mostrarán el comportamiento característico del método ante variables hidráulicas especiales, mostrando la influencia que puede tener una característica de comportamiento de ésta en el método.
- El segundo grupo de casos, mostrará el comportamiento del error del NFM ante escenarios típicos de operación de las redes. Cabe comentar que debido a la inmensa variedad de situaciones de operación existente, se eligieron las más recurrentes y consecuentes con los desarrollos futuros de este estudio (Capítulo 7).

Con estas dos formas de análisis, se asegura un buen acercamiento al funcionamiento del NFM y su precisión, incluso nos da un panorama del uso adecuado de este método en la gestión de fugas.

3.3. Análisis del Método de los Caudales Nocturnos ante variables hidráulicas

Existen innumerables variables, tanto hidráulicas como físicas, que determinan el comportamiento de las redes, más aún todas ellas funcionan al unísono con interrelaciones extremadamente complejas. El NFM aunque sólo depende de la presión, adquiere por medio de ésta, las características de las variables. Por ende, es necesario revisar el funcionamiento ante cada variable, cómo es afectado y en qué medida.

3.3.1. Caso 1

Este caso sintético tiene la particularidad de tener una configuración topológica simple y una hidráulica definida. Fue elegido pues muestra de forma directa como actúa el NFM. A continuación se encuentran los datos básicos de la red (Figura 7) cuyas propiedades se presentan en la Tabla 2 y Tabla 3.

En el ejemplo se han adoptado las siguientes hipótesis:

- $N1=1$
- Todos los nudos son residenciales y tienen la misma curva de modulación horaria (Figura 8).
- El coeficiente de rugosidad de todas las tuberías es el mismo 0.1 mm.

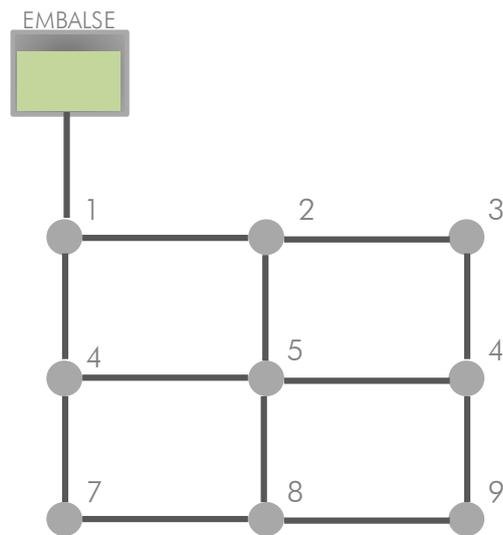


FIGURA 7. TOPOLOGÍA DE LA RED, CASO 1

TABLA 2. PROPIEDADES DE LOS NUDOS, (CASO 1)

Nudo	Cota [m]	Demanda [l/s]	C_f [lps/m ^{1.0}]
1	30	7.5	0.2617
2	22	7.5	0.0577
3	25	7.5	0.0693
4	28	7.5	0.0327

5	22	7.5	0.0654
6	22	7.5	0.0654
7	25	7.5	0.0577
8	25	7.5	0.0616
9	26	7.5	0.0327

TABLA 3. PROPIEDADES DE LA TUBERÍAS, (CASO 1)

Tuberías	Nudo inicial	Nudo final	Longitud [m]	Diámetro [mm]
12	1	2	1000	300
23	2	3	1000	250
45	4	5	1000	200
56	5	6	1000	150
78	7	8	1000	250
89	8	9	1000	250
14	1	4	500	300
47	4	7	500	250
25	2	5	500	200
58	5	8	500	200
36	3	6	500	250
69	6	9	500	250
99	EM	1	1500	400

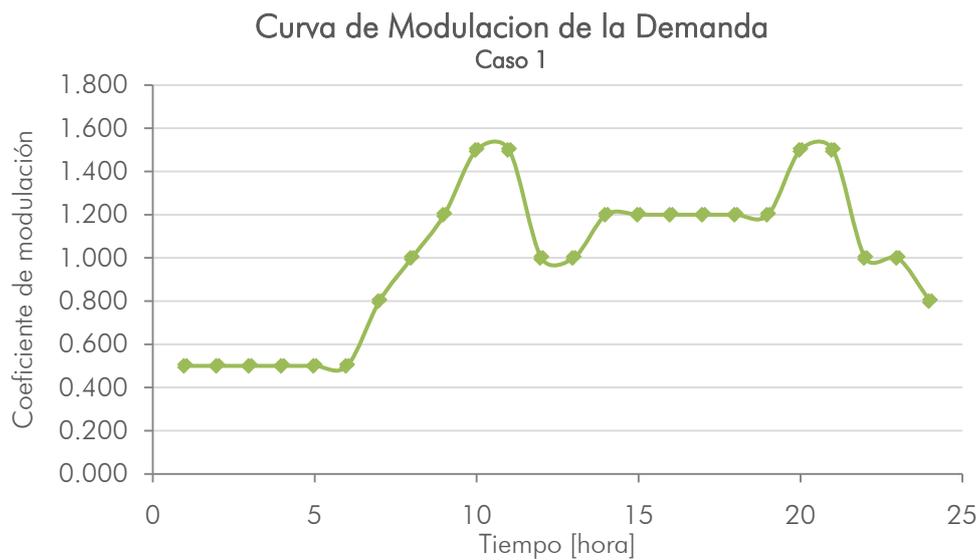


FIGURA 8. CURVA DE MODULACIÓN DE LAS DEMANDAS, (CASO 1)

Análisis de resultados

Como primer análisis se calculó el error del NFM cuando se varía la selección del AZP, entre los diferentes nudos de la red, obteniendo:

TABLA 4. ERROR VARIANDO EL NUDO AZP, (CASO1)

ID	Error nodo	Clasificación
1	0.604	
2	2.804	
3	-2.574	
4	-1.059	
5	1.506	
6	0.223	
7	-0.206	Mínimo
8	-1.971	
9	-4.283	Máximo

Observando la Tabla 4, se procedió a buscar por qué el nudo 7 tenía el menor error en el método, por lo cual se decidió revisar las presiones promedio de los diferentes nudos, con respecto a la presión promedio simple del sistema (sin ponderaciones), dando como resultado que la menor diferencia entre las dos presiones era obtenida igualmente por el nudo 7(Tabla 5). Esto llevó a confirmar uno de los principios del NFM:

En tanto el nudo AZP se comporte homogéneamente con el comportamiento general del sistema el NFM será más preciso en sus resultados.

Esto extrapolado a la única variable que utiliza el método, significa que lógicamente el NFM tendrá mayor o menor precisión, de acuerdo a cuán parecida sea la presión del nudo AZP con respecto a la presión promedio del sistema.

TABLA 5. VARIACIÓN DE LA PRESIONES PROMEDIO EN LOS NODOS

Promedio de presiones									
Nudo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Promedio	7.953	14.863	11.296	9.286	14.522	14.229	11.784	11.403	10.229
Promedio Sistema	11.730	11.730	11.730	11.730	11.730	11.730	11.730	11.730	11.730
Diferencia	3.777	3.134	0.433	2.444	2.793	2.500	0.055	0.327	1.500
Mínimo							SI		

Sin embargo, los errores del NFM en los otros nudos no seguían la relación antes descrita entre la magnitud del error y las diferencias entre la presión promedio del sistema y la presión promedio del nudo. Buscando un análisis más profundo de estas discrepancias se plantearon varias alternativas de presión promedio ponderada por la cota o el caudal, arrojando los mismos resultados. Debido a esto se procedió a analizar el error que el método producía cada hora durante el periodo extendido (1 día), teniendo fija la hora de aplicación del método y variando el nudo.

Indiscutiblemente se encontró que el método comete su máximo error cuando en la red circula el caudal máximo (Tabla 6), por ende el nudo 9 siendo el más alejado del embalse y el de mayor camino hidráulico, posee el mayor error. Esto sin olvidar que la variación de la presión en este caso está influenciada por la cota y las pérdidas por fricción, como muestra el comportamiento del nudo 2.

Este análisis más detallado de la variación del error del NFM para cada nudo, logra explicar el comportamiento «aleatorio» del error con respecto a la diferencia entre las presiones, mostrando dos argumentos claves:

- Las diferencias entre los promedios aritméticos de las presiones nodales y la presión media del sistema en un día, no es un parámetro concluyente, pues realmente la variación del error está dada por el acercamiento de la presión horaria del nudo con respecto a la presión media horaria sistema. En otras palabras, lo importante no es conseguir

un nudo cuyas medias aritméticas sean exactas a la media del sistema en el periodo de análisis, sino que su presión evolucione de la misma manera que la del sistema en el tiempo.

- Por otro lado y evitando ir en contravía con lo antes planteado, debido a la gran cantidad de variables presentes en las redes y los procesos hidráulicos en éstas, la presión promedio del sistema no es una media aritmética de presiones de la red, sino un concepto más amplio: la presión promedio del sistema es el valor medio de ésta, de acuerdo a alguno parámetro específico del universo hidráulico, teniendo diferentes valores igualmente verdaderos de acuerdo a las necesidades.

TABLA 6. VARIACIÓN DEL ERROR SOBRE EL VOLUMEN FUGADO HORA A HORA

Hora	Modulación	Nudos									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	N1
0:00	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1:00	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2:00	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3:00	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4:00	0.5	0.55	-0.24	-0.44	-0.06	-0.34	-0.45	-0.24	-0.38	-0.45	1.95
5:00	0.5	0.56	-0.24	-0.44	-0.06	-0.34	-0.45	-0.24	-0.38	-0.45	1.95
6:00	0.8	1.19	-0.52	-0.93	-0.12	-0.72	-0.98	-0.52	-0.82	-0.98	4.19
7:00	1	1.19	-0.52	-0.93	-0.12	-0.72	-0.98	-0.52	-0.82	-0.98	4.19
8:00	1.2	2.77	-1.22	-2.17	-0.29	-1.67	-2.26	-1.22	-1.91	-2.26	9.71
9:00	1.5	2.77	-1.22	-2.17	-0.29	-1.67	-2.26	-1.22	-1.91	-2.26	9.71
10:00	1.5	6.24	-2.72	-4.88	-0.66	-3.74	-5.09	-2.74	-4.27	-5.09	21.75
11:00	1	6.24	-2.72	-4.88	-0.66	-3.74	-5.09	-2.74	-4.27	-5.09	21.75
12:00	1	12.06	-5.23	-9.42	-1.28	-7.20	-9.81	-5.31	-8.23	-9.81	41.89
13:00	1.2	12.06	-5.23	-9.42	-1.28	-7.20	-9.81	-5.31	-8.23	-9.81	41.89
14:00	1.2	6.24	-2.72	-4.88	-0.66	-3.74	-5.09	-2.74	-4.27	-5.09	21.75
15:00	1.2	6.24	-2.72	-4.88	-0.66	-3.74	-5.09	-2.74	-4.27	-5.09	21.75
16:00	1.2	3.75	-1.64	-2.94	-0.39	-2.26	-3.06	-1.65	-2.58	-3.06	13.12
17:00	1.2	3.75	-1.64	-2.94	-0.39	-2.26	-3.06	-1.65	-2.58	-3.06	13.12
18:00	1.2	1.19	-0.52	-0.93	-0.12	-0.72	-0.98	-0.52	-0.82	-0.98	4.19
19:00	1.5	1.19	-0.52	-0.93	-0.12	-0.72	-0.98	-0.52	-0.82	-0.98	4.19
20:00	1.5	12.06	-5.23	-9.42	-1.28	-7.20	-9.81	-5.31	-8.23	-9.81	41.89
21:00	1	12.06	-5.23	-9.42	-1.28	-7.20	-9.81	-5.31	-8.23	-9.81	41.89
22:00	1	1.19	-0.52	-0.93	-0.12	-0.72	-0.98	-0.52	-0.82	-0.98	4.19
23:00	0.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Siguiendo con el anterior análisis se buscó qué tipo de relación tenía el error frente al cambio en la modulación, o sea, al cambio en la demanda de caudal de la red. Para esto se procedió a correlacionar el error con la variación de la modulación durante el día, dando como resultado una relación cuadrática entre estos dos, cuyo coeficiente de correlación aproximadamente ronda 0.98 en todos los nudos (Figura 9).

Este tipo de correlaciones altas y fuertes se tuvieron en algunas redes, mostrando que el error del NFM es en extremo dependiente de la variación de la demanda en la red, además da una idea de cómo el error es afectado en menor o mayor medida por las otras variables del sistema. Sin embargo, en el Caso 2 se verá que la demanda no siempre domina los sistemas de distribución.

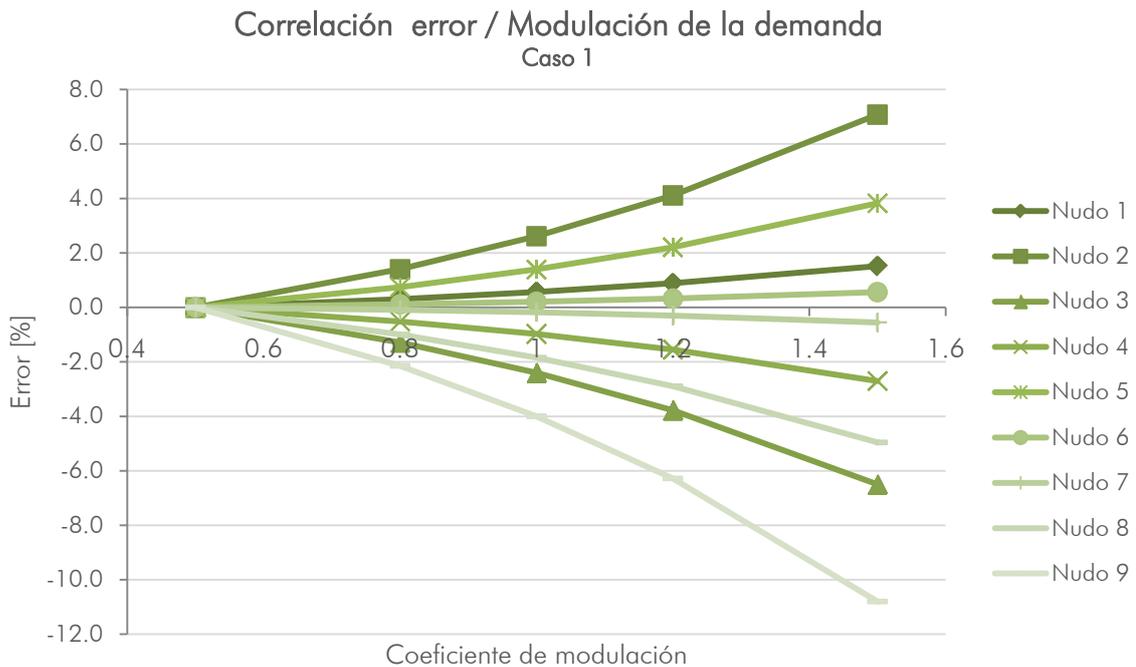


FIGURA 9. CORRELACIÓN ENTRE EL ERROR HORA A HORA VARIANDO EL NUDO AZP, (CASO1)

La correlación mencionada aparece porque el caudal fugado en los nodos es proporcional a la presión elevada a un exponente (Ecuación 2). Además la presión en los nodos puede ser representada como la presión en la cabecera de la red menos la pérdida por fricción hasta el nudo de análisis, siendo las pérdidas de

carga proporcionales al caudal circulante en la tubería elevado al cuadrado. Los caudales son proporcionales a la demanda del nudo y, a su vez, varían con los coeficientes de modulación. Esto de forma matemática se traduce en:

$$P_{j,epanet}(t) = P_{entrada}(t) - \sum_{i=1}^N h_{f,i}(t)$$

Sabemos que:

$$h_{f,i}(t) = f \times \frac{L * v^2}{D2g} = \frac{8fLQ_i^2(t)}{\pi^2 D^5 g} = K_i \times Q_i^2(t)$$

$$h_{f,i}(t) = K_i (C_m(t) \bar{Q}_j)^2$$

Ahora bien, sustituyendo las anteriores ecuaciones

$$P_{j,epanet}(t) = P_{entrada}(t) - \sum_{i=1}^N K_i (C_m(t) \bar{Q}_j)^2$$

Dónde:

- $P_{j,epanet}(t)$: Presión en el nodo j y la hora t ;
- $h_{f,i}(t)$: Pérdida de carga en la tubería i en la hora t ;
- $P_{entrada}$: Presión en el nodo de entrada a la red en la hora t ;
- $Q_i^2(t)$: Caudal circulante en la tubería i en la hora t ;
- $C_m(t)$: Coeficiente de modulación en la hora t ;
- \bar{Q}_j : Caudal promedio del nodo j .

Retomando la Figura 9, se observa que las curvas fluctúan considerablemente desde un error negativo a un error positivo, producto de las variables presentes y dominantes de la presión en el nodo en cuestión. Este tipo de variación deja la posibilidad de deducir:

- El método de los caudales nocturnos, puede llegar a estimar de forma alarmanentemente errónea (errores del 10% de sub-estimación), cuando se tiene los caudales picos en la red, indiferente el nudo que se tome como AZP.

- Indudablemente, el error en la estimación del volumen fugado hora a hora, manteniendo la hora de aplicación del método constante, muestra que el NFM es muy sensible al cambio o más bien selección del AZP en las redes.

En el Capítulo 5, se analizará en profundidad la variación del AZP y sus implicaciones en el método; no obstante al final de los casos se presentará la evaluación en conjunto de rango de variación del error, por el cambio de nudo.

Otro análisis importante planteado, fue la variación de error cambiando la hora de referencia. Este nace del planteamiento de que el método puede ser aplicado a cualquier hora del día, siempre y cuando se conozca de manera adecuada y precisa el caudal fugado en dicha hora. Para lograr estudiar esta variación y sus implicaciones en el error del NFM, se sustituyó la hora de referencia de aplicación del método, por las diferentes horas del día en la Ecuación 9, asumiendo que se conoce perfectamente el caudal consumido del sistema en cada una de las horas donde se aplica el NFM.

Se encontró una variación amplia con referencia al error promedio de las 24 horas, llegando a alcanzarse valores 18 veces el valor promedio. Sin embargo los valores son pequeños en general, pues está relacionado con la resistencia hidráulica de la red (pérdidas en las tuberías). Esto se puede observar en el modelo donde la hora punta de máxima demanda tiene una pérdida promedio en las tuberías de 0.98 m/Km, siendo baja. Esta característica se decantó, después de revisar varias redes con diferentes «resistencias hidráulicas», mostrando gran relación la magnitud del error con la variación de presiones en la red producto de estas pérdidas.

TABLA 7. ERROR VARIANDO LA HORA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO, (CASO 1)

hora	error hora	Clasificación
1	-0.206	
2	-0.206	
3	-0.206	
4	-0.206	
5	-0.206	
6	-0.206	
7	-0.116	
8	-0.027	
9	0.093	
10	0.349	Máximo
11	0.349	
12	-0.027	Mínimo
13	-0.027	
14	0.093	
15	0.093	
16	0.093	
17	0.093	
18	0.093	
19	0.093	
20	0.349	Máximo
21	0.349	
22	-0.027	Mínimo
23	-0.027	
24	-0.116	

Una de las partes más interesantes de esta investigación está basada en este punto, puesto que la variación del error hora a hora, no tiene una explicación sencilla debido a que éste no sigue una tendencia única para todas las redes, sino que está obligada por la «personalidad». En este caso en particular podemos ver una correlación muy fuerte entre el error y el coeficiente de modulación de la demanda como se muestra en las siguientes graficas:

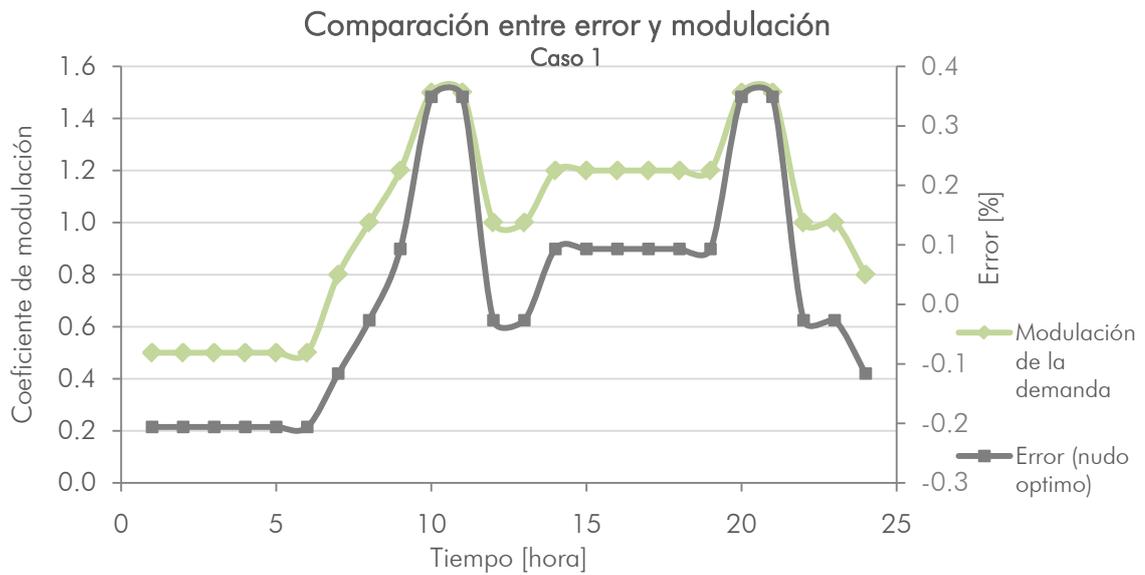


FIGURA 10. COMPARACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL ERROR Y EL COEFICIENTE DE MODULACIÓN DE LA DEMANDA (CASO1)

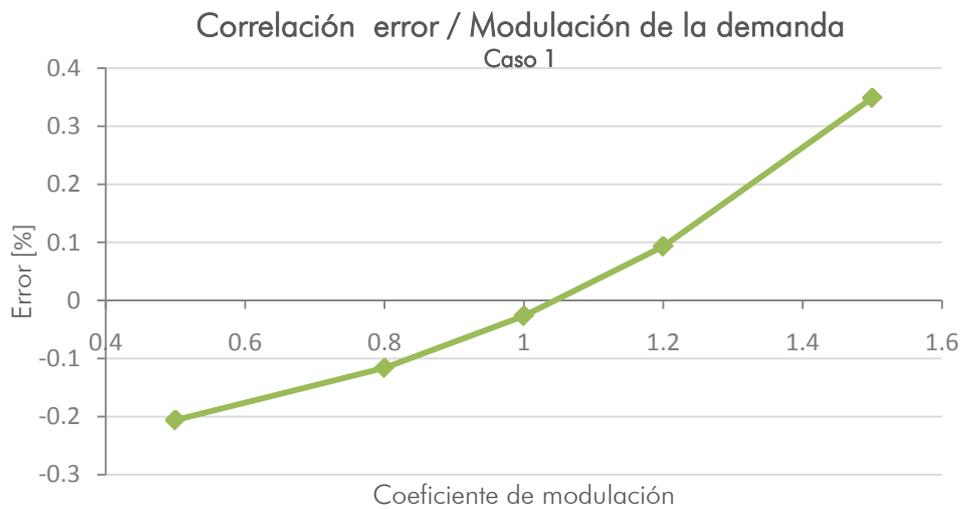


FIGURA 11. CORRELACIÓN ENTRE EL ERROR VARIANDO LA HORA DE APLICACIÓN Y EL COEFICIENTE DE MODULACIÓN, (CASO1)

Muchas de las redes analizadas muestran esta relación cuadrática entre el error y el coeficiente de modulación de la demanda, con un coeficiente de correlación igual a -0.9881, lo cual indica una fuerte relación inversa, igualmente producto de la proporcionalidad entre la presión de los nudos y las pérdidas de carga de las tuberías que surten el nudo.

3.3.2. Caso 2

Este caso fue elegido pues cuenta con una particularidad hidráulica: esta red tiene como sistema de inyección un grupo de bombeo, que afecta la variación de las presiones de la red, es decir «domina el sistema hidráulico» (Figura 12). Las características de la red son:

En el ejemplo se ha adoptado las siguientes hipótesis:

- N1=1
- Todos los nudos son residenciales y tienen la misma curva de modulación horaria (Figura 13).



FIGURA 12. TOPOLOGÍA DE LA RED, CASO 2

TABLA 8. PROPIEDADES DE LOS NUDOS, (CASO 2)

Nudo	Cota [m]	Demanda [l/s]	C_i [lps/m ^{1.0}]
1	5	10	0.140
2	5	10	0.117
3	5	10	0.070
4	5	10	0.093
5	5	10	0.140
6	5	10	0.093
7	5	10	0.070
8	5	10	0.117
9	5	10	0.070
N1	0	0	0.070

TABLA 9. PROPIEDADES DE LAS TUBERÍAS, (CASO2)

Tuberías	Nudo inicial	Nudo final	Longitud [m]	Diámetro [mm]
12	1	2	1000	250
23	2	3	1000	250
45	4	5	1000	200
56	5	6	1000	150
78	7	8	1000	250
89	8	9	1000	250
14	1	4	500	250
47	4	7	500	250
25	2	5	500	200
58	5	8	500	200
36	3	6	500	250
69	6	9	500	250
99	N1	1	1500	350

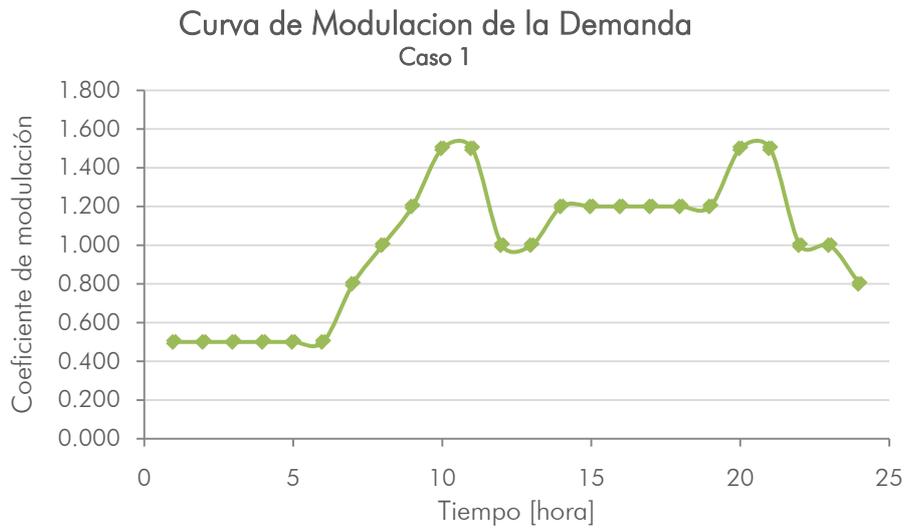


FIGURA 13. CURVA DE MODULACIÓN DE LAS DEMANDAS, (CASO 2)

Análisis de resultados

Variando la selección del nudo AZP entre los nudos de la red se encontró que el error para cada nudo es:

TABLA 10. ERROR VARIANDO EL NUDO AZP, (CASO 2)

ID	Error nodo	Clasificación
1	3.103	
2	-1.353	
3	-2.427	
4	-0.327	Mínimo
5	-1.861	
6	-2.529	
7	-1.364	
8	-2.125	
9	-2.529	
N1	10.817	Máximo

En general todos los nudos muestran un comportamiento homogéneo del error en el método, con excepción el nudo N1 el cual aproximadamente es 10 veces el error promedio del sistema. Si bien es un nudo atípico de la red, su ubicación estratégica, le otorga la facilidad de tener medición piezométrica, pues al hallarse en la salida del grupo de bombeo puede, llegado el caso, a ser el nudo AZP de la red. De esto podemos deducir que los puntos cercanos a las instalaciones de bombeo no llegan a ser adecuados para su uso como AZP en el NFM, puesto que no se comportan con el promedio diario del sistema, dando a errores grandes en los volúmenes fugados. Cabe mencionar que si un nudo no cumple en con los promedios diarios, mucho menos lo hará con los promedios horarios.

Se realizó el mismo análisis de la variación del error hora a hora, variando el nudo AZP y dejando constante la hora de aplicación del método. De acuerdo con los planteamientos iniciales, los nudos no tenían una correlación directa con los coeficientes de modulación, ver Figura 14 y Figura 15.

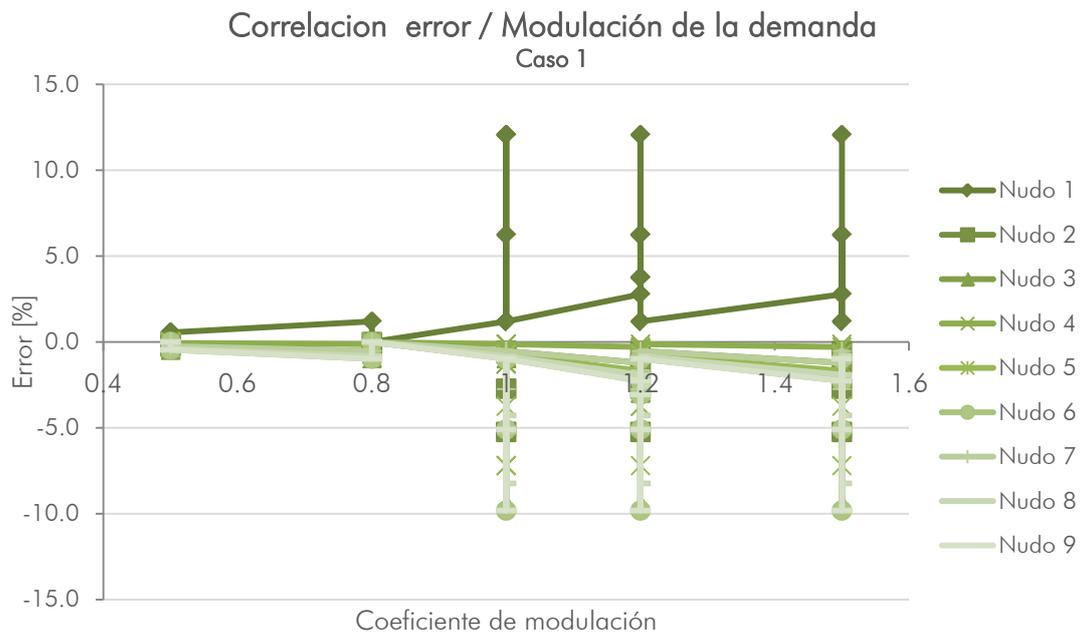


FIGURA 14. CORRELACIÓN DEL ERROR HORA A HORA VARIANDO EL NUDO AZP, (CASO2)

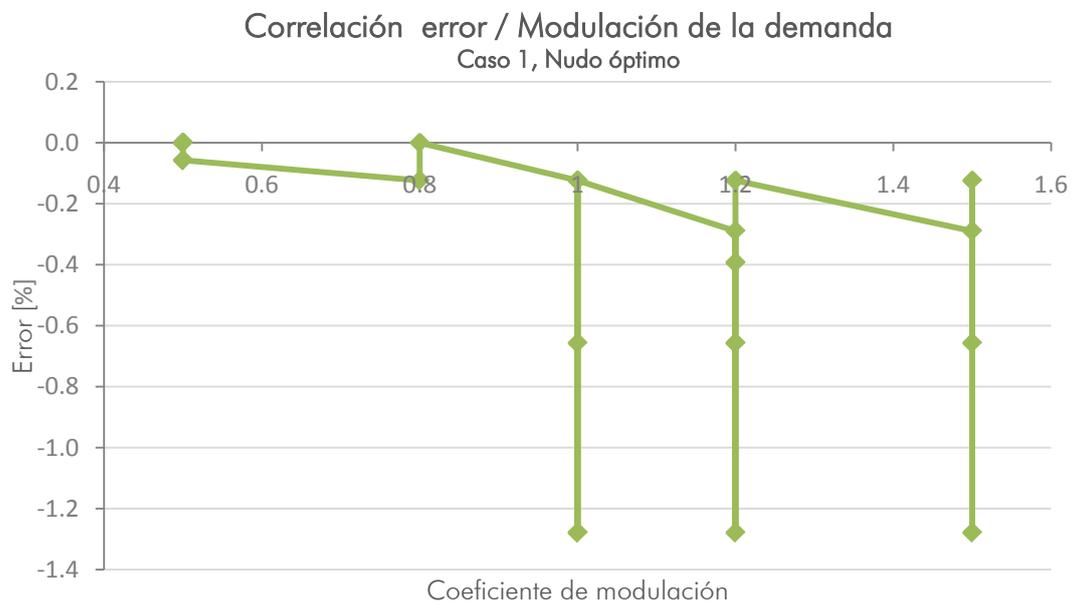


FIGURA 15. DETALLE DE LA CORRELACIÓN HORA A HORA EN EL NUDO ÓPTIMO SIN CAMBIAR EL T_{MNF} (CASO 2)

Esto es debido a que las redes con bombes directos, no tienen una dependencia fuerte entre las presiones de la red y el coeficiente de modulación de

la demanda. Dependen casi exclusivamente del caudal bombeado por el sistema, siendo la presión proporcional al cuadrado del caudal bombeado. De nuevo podemos plantear que la presión en los nudos puede ser representada por la altura en cabecera de la red (grupo de bombeo) menos la pérdida de carga hasta el nudo de análisis. Si bien las pérdidas de carga son proporcionales al caudal circulante elevado al cuadrado, la altura en cabecera es proporcional al caudal trasegado elevado al cuadrado, esto de forma matemática se traduce:

De nuevo tenemos:

$$P_{j,epanet}(t) = H_{entrada}(t) - \sum h_{f,i}(t)$$

Sin embargo la altura en la entrada está dada por:

$$H_b(t) = A - BQ_b^2(t) \rightarrow H_b(t) = H_o - BQ_b^2(t)$$

Sabemos que,

$$h_{f,i}(t) = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 D^5 g} = K_i (C_m(t) \bar{Q}_j)^2$$

Ahora bien, sustituyendo las anteriores ecuaciones:

$$P_{j,epanet}(t) = (H_o - BQ_b^2(t)) - \sum K_i C_m^2(t) \times \bar{Q}_j^2(t)$$

Después de haber hecho las anteriores sustituciones, se pueden deducir los siguientes comportamientos, asumiendo las consideraciones que el método de los caudales nocturnos utiliza.

Sabiendo que:

$$Q_b(t) = \sum_{j=1}^N Q_j(t)$$

Se tiene que,

$$Q_b(t) \gg Q_j(t)$$

$$P_{j,EPA}(t) \propto P_{AZP}(t) \propto (H_o - BQ_b^2(t))$$

Donde:

$P_{j,epanet}(t)$: Presión en el nodo j y en el instante t horas (calculado por Epanet);

$H_{entrada}(t)$: Altura en el nodo de entrada en el instante t horas;

$h_{f,i}(t)$: Pérdida de carga para la tubería i en el instante t horas;

$Q_i^2(t)$: Caudal circulante en la tubería i en la hora t ;

$C_m(t)$: Coeficiente de modulación en la hora t ;

\bar{Q}_j : Caudal promedio del nodo j

$Q_b(t)$: Caudal bombeado a t horas;

H_o : Altura máxima de las bombas.

Teniendo en cuenta esta variación, se obtuvo un coeficiente de correlación de -0.9720 en el AZP óptimo (Figura 16).

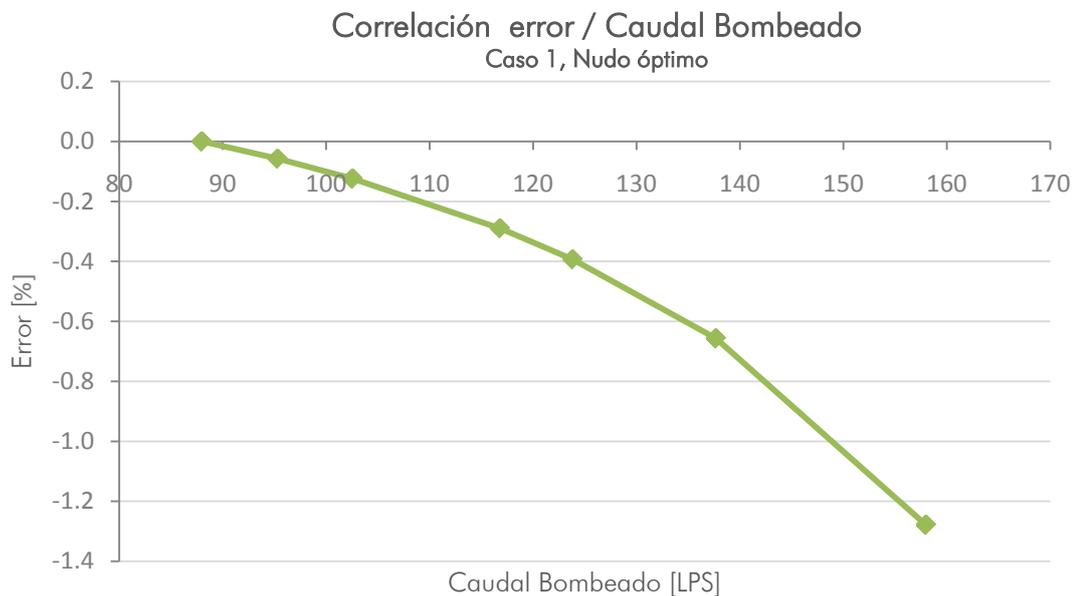


FIGURA 16. CORRELACIÓN ENTRE EL CAUDAL BOMBEADO Y EL ERROR DEL AZP ÓPTIMO, (CASO 2)

De este análisis queda claro que las redes con sistemas de impulsión no son buenas para aplicar el NFM, en tanto estos sistemas de bombeo no sean

regularizados durante el periodo de cálculo, puesto que la red estaría «dominada» por dos variables hidráulicas distintas.

Variación de la hora de aplicación del NFM

Analizando la variación del error, cuando se cambia la hora de aplicación del método (Tabla 11), se encuentra una semejanza con la con el caso 1. Sin embargo, este error también es dominado por el caudal bombeado, tendiendo una correlación cuadrática.

TABLA 11. ERROR DEL MÉTODO VARIANDO LA HORA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO, (CASO 2)

hora	error hora	Clasificación
1	-0.327	
2	-0.327	
3	-0.327	
4	-0.327	
5	-0.270	
6	-0.270	
7	-0.203	
8	-0.203	
9	-0.037	Mínimo
10	-0.037	
11	0.332	
12	0.332	
13	0.964	Máximo
14	0.964	
15	0.332	
16	0.332	
17	0.066	
18	0.067	
19	-0.203	
20	-0.203	
21	0.964	
22	0.964	
23	-0.203	
24	-0.327	

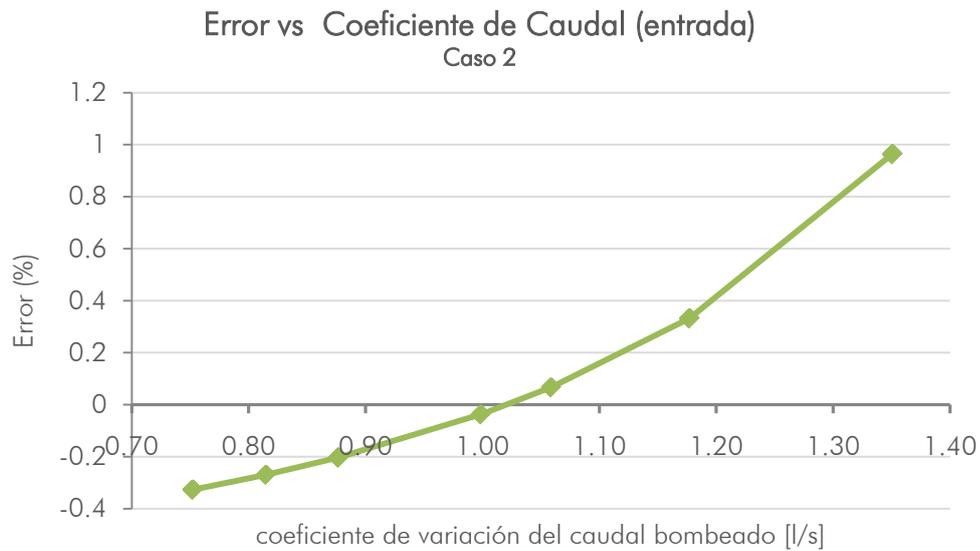


FIGURA 17. CORRELACIÓN ENTRE EL ERROR VARIANDO LA HORA DE APLICACIÓN Y EL COEFICIENTE DE CAUDAL BOMBEADO (CASO 2)

3.4. Análisis del Método de los Caudales Nocturnos para escenarios típicos

En la primera parte, observamos el comportamiento general del método ante variables importantes, sin embargo es necesario complementar éste con un análisis enfocados a escenarios «típicos» en los sistemas de distribución de agua y de acuerdo a los análisis de nuestra casuística (*ver Anexos*), se eligieron varios casos importantes que recogen en cierta medida la variabilidad real de las redes.

El NFM fue creado para redes «pobres», en gestión, infraestructura, conocimiento, etc. Este objetivo que persigue el método lo hace vulnerable ante su misma función, debido a que este tipo de redes mantienen una variabilidad de sus características hidráulicas totalmente incontrolada. A continuación se mostrarán los límites del método en tanto sea aplicado a redes poco controladas.

Como primer conjunto de escenarios, se evaluó el NFM para redes donde sus condiciones hidráulicas «operativas» generan una variación sustancial de la presión en diferentes puntos de la red, dando como resultado la selección de AZP falseados

y errores elevados en los volúmenes fugados. A continuación presentamos dos ejemplos claros de este tipo de redes, los cuales son habituales en sistemas de distribución de agua:

3.4.1. Caso 3

El primer escenario que se presenta, está enfocado a redes con grandes pérdidas de carga en varias de sus tuberías. Este contexto fue idealizado pues la mayoría de redes grandes tienen sectores bastante viejos como grandes pérdidas de carga. Además este fenómeno está presente en casi todas las capitales latinoamericanas, pues éstas se han masificado, aumentando rápidamente la demanda. Este aumento ha dejado los sistemas casi obsoletos, con grandes pérdidas de carga producto de diámetros reducidos de las tuberías «subdimensionadas» (CYTED, 2006).

Este problema, no tiene una solución inmediata, debido a que los altos costos de sustitución de redes hacen que sea imposible aplicar planes de renovación que sean mayor al 1 % del total de la longitud de tubería instalada. Este panorama generalizado y de larga estancia hace que sea obligatorio el análisis del NFM, con el fin de conocer el posible comportamiento de éste.

El caso está compuesto por dos embalses (*ver características en anexos*) cuyas características de demanda y topología logran producir pérdidas de carga considerables en algunas zonas de la red. El comportamiento hidráulico «especial» de esta red genera una distribución de presiones totalmente heterogénea con diferencias de 7 m.c.a. entre puntos de red (Figura 18 y Figura 19).

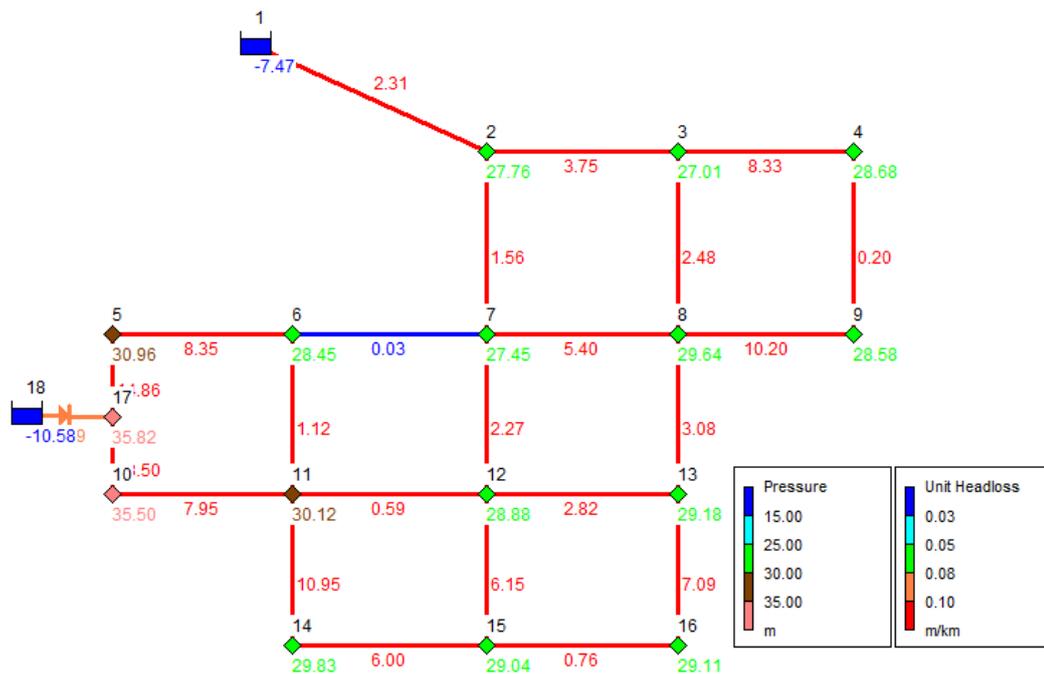


FIGURA 18. VARIACIÓN DE LA PRESIÓN Y PÉRDIDA DE CARGA EN LA HORA T_{MNF} , (CASO3)

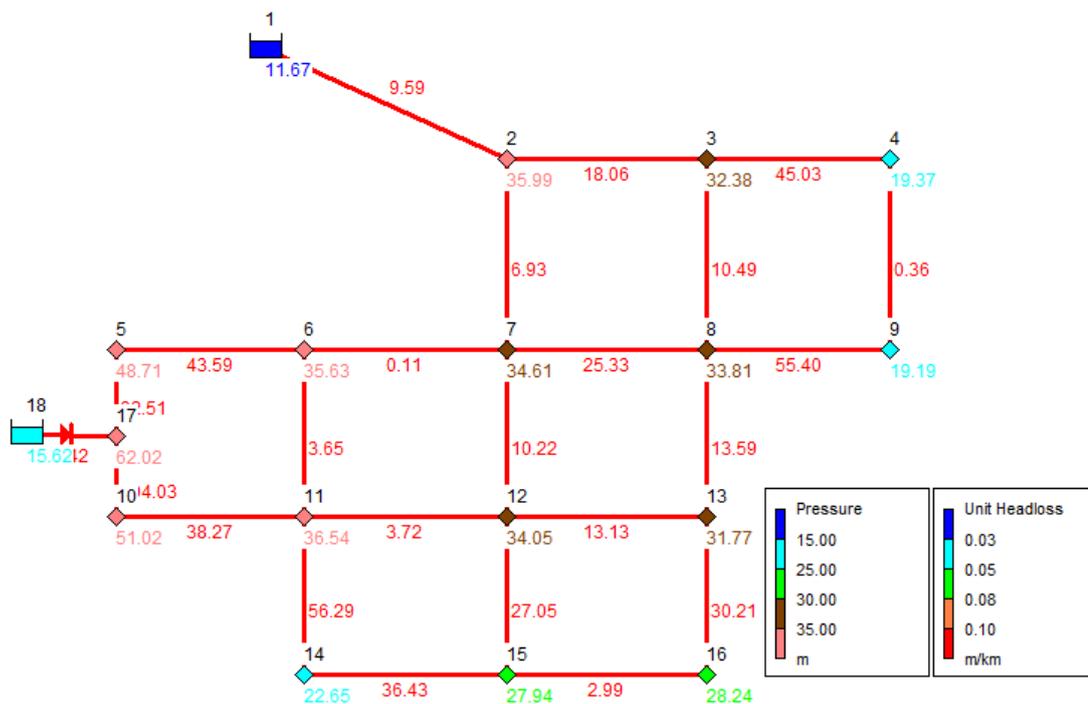


FIGURA 19. VARIACIÓN DE LA PRESIÓN Y PÉRDIDA DE CARGA EN LA HORA DE MÁXIMO CONSUMO, (CASO 3)

Las variaciones en los errores del método en este caso son alarmantes (Tabla 12). Si bien es un caso de estudio donde la red ha sido llevada a un nivel extremo, es muy posible que llegado el caso un sistema real pueda tener similares

condiciones de operación; teniendo una probabilidad de incurrir en errores hasta del 20% en la estimación del caudal fugado,

TABLA 12. ERROR VARIANDO EL NUDO AZP, (CASO 3)

ID	Error nodo	Clasificación
2	5.665	
3	1.504	
4	<u>-20.373</u>	<u>Elevado</u>
5	17.430	
6	3.890	
7	4.152	
8	-0.701	Mínimo
9	<u>-20.550</u>	<u>Elevado</u>
10	12.048	
11	2.402	
12	0.865	
13	-2.899	
14	<u>-16.711</u>	<u>Elevado</u>
15	-8.246	
16	-7.909	
17	<u>24.229</u>	<u>Elevado</u>

Esto resulta por la mala selección del nudo AZP, en la cual la variación de la presión durante el día, es dominada por la pérdida de carga en los caminos que recorre el agua hasta llegar al nudo. Esto deja en evidencia que el NFM debe ser cuidadosamente aplicado en sectores hidrométricos con diferencias considerables de pérdida de carga entre zonas del sistema.

3.4.2. Caso 4

Ahora bien, otro sistema en sintonía con el problema del comportamiento heterogéneo de la red, son los sistemas también muy típicos de zonas de montaña, donde existen grandes desniveles en tramos pequeños, los cuales son gestionados con un control de presiones.

Inicialmente se propuso analizar el sistema para una red pobre en gestión de presiones. Estas redes son comunes en países en desarrollo, especialmente en

sistemas pequeños que no pueden pagar personal entrenado para la operación y mantenimiento de dichos sistemas. Son muy típicos en la zona montañosa andina Colombiana.

Para reproducir este escenario, se ha preparado el caso 4, compuesto por dos sub-redes, las cuales están unidas por un tramo de red que consta de una válvula reductora de presión (VRP, por sus siglas en inglés) y una tubería, (ver características en anexos). Este caso ha sido dividido en dos escenarios, uno sin regulación de la presión y otro con regulación.

Nota: los nudos N1 y N2, son mecanismos ficticios usados en Epanet, cuya finalidad es conectar la válvula reductora de presión a la red, por lo cual no son tenidos en cuenta en los análisis.

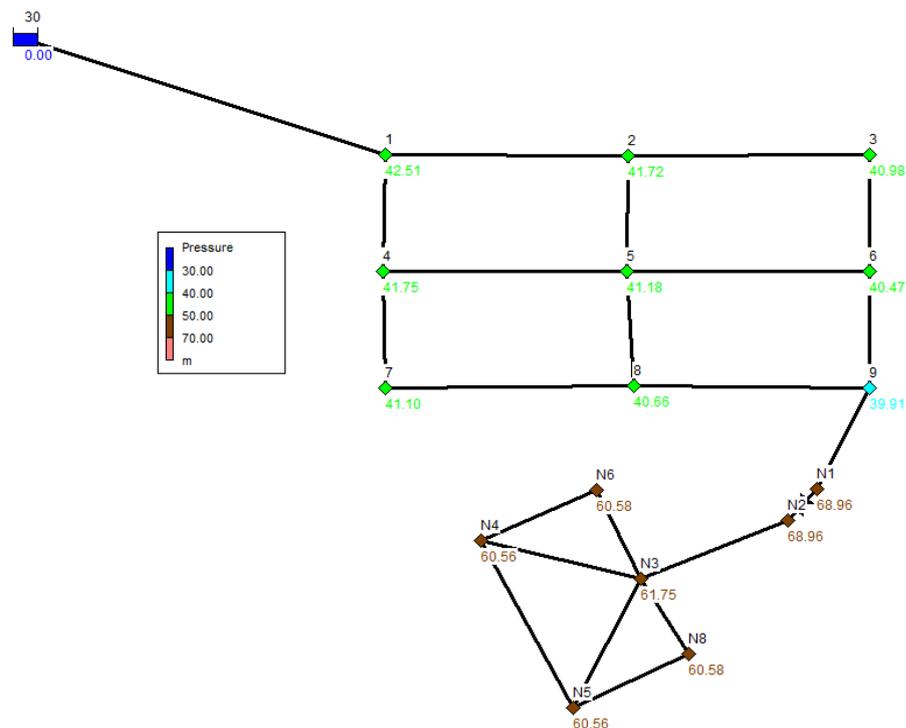


FIGURA 20. VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA HORA T_{MNF} CON GESTIÓN INEFICIENTE, (CASO 4A)

Como se muestra en la Figura 20, las presiones de la red tienen una variación drástica entre una sub-red y otra. Esta variación es transmitida al error del método, generando valores altos, indiferentemente de qué nudo AZP se elija, pues ninguno

representa adecuadamente el comportamiento de ésta. (Tabla 13) No representan este comportamiento debido a que la presión promedio ha sido falseada por el comportamiento heterogéneo de la cotas de los nudos. Esto produce que ninguna presión del sistema adquiera el comportamiento general de la red.

TABLA 13. ERROR VARIANDO EL NUDO AZP, (CASO 4A)

ID	Error nodo	Clasificación
1	10.473	Máximo
2	8.208	
3	6.155	
4	8.303	
5	6.746	
6	4.955	
7	6.461	
8	5.428	
9	3.805	
N1	3.706	No real
N2	3.706	No real
N3	-6.478	
N4	-8.616	
N5	-8.616	
N6	-8.620	
N8	-8.620	

Esta primera variante del escenario presenta la sensibilidad del método ante la falta de gestión de presiones (Tabla 13), una acción común en operadores de sistemas pequeños y más aun en sistemas que utilizan el NFM para el uso cotidiano del control de fugas. Sin embargo, estas dos situaciones conllevan a incurrir en errores hasta del 10% en el volumen fugado, generando al final un sobre costo en las empresas de distribución.

Ahora bien, para redes con un sistema de gestión de presiones adecuado (Figura 21), tampoco es la mejor alternativa a la hora de aplicar el NFM, puesto que los errores (Tabla 14), si bien son menores a los de un sistema sin gestión (Tabla 13), siguen siendo altos, pues hemos de recordar que el método por medio de un nudo representa el funcionamiento de la red y una válvula de regulación, genera un corte en el comportamiento homogéneo de los sistemas.

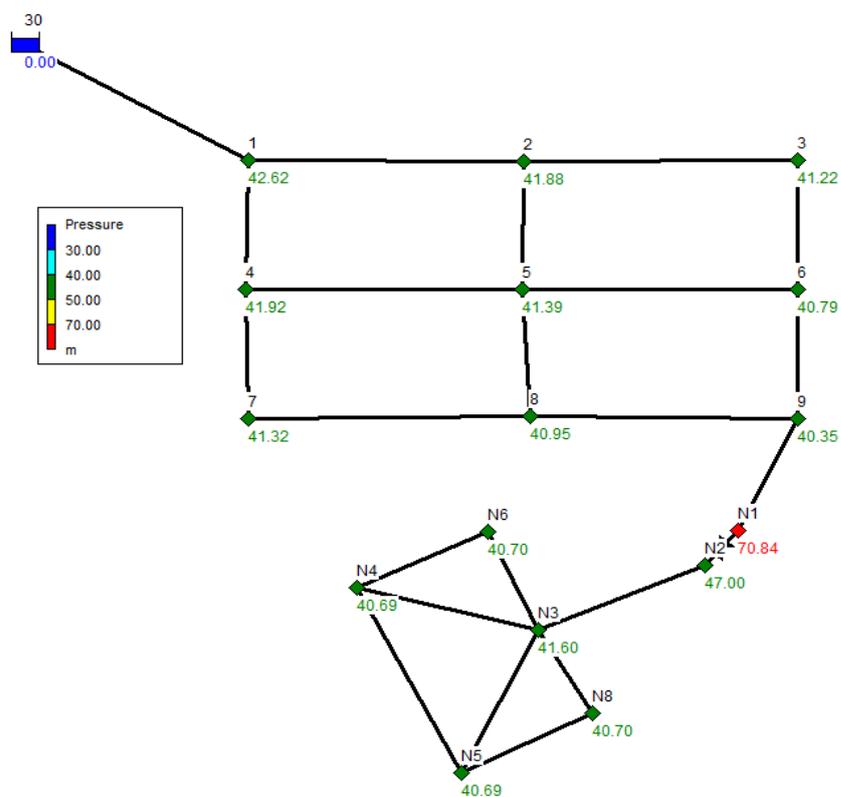


FIGURA 21. VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN LA HORA T_{MNF} CON GESTIÓN DE PRESIONES, (CASO4B)

TABLA 14. ERROR VARIANDO EL NUDO AZP, (CASO 4B)

ID	Error nodo	Clasificación
1	5.275	Máximo
2	3.011	
3	0.956	
4	3.107	
5	1.545	
6	-0.261	
7	1.264	
8	0.216	
9	-1.446	
N1	-1.832	No real
N2	11.814	No real
N3	-2.086	
N4	-5.030	
N5	-5.030	
N6	-5.033	
N8	-5.033	

En este tipo de sistemas aunque tienen un control en la presión adecuado, no es conveniente aplicar el método. Se recomienda que sistemas con dos sub-mallas deban ser evaluadas por separado, pues la presión debajo del sistema de control de presión tendrá otra modulación de la presión producto del sistema de regulación utilizado.

3.4.3. Caso 5

Otro escenario importante son las redes complejas. En éstas se puede encontrar un sinnúmero de singularidades hidráulicas, producto de varios tipos de curvas de modulación, infraestructuras hidráulicas (bombas, tanques, etc.). Algunos sistemas de distribución, por su complejidad y extensión cuentan con estos elementos o particularidades hidráulicas, llegando algunas veces a tener varios en un mismo sector hidrométrico.

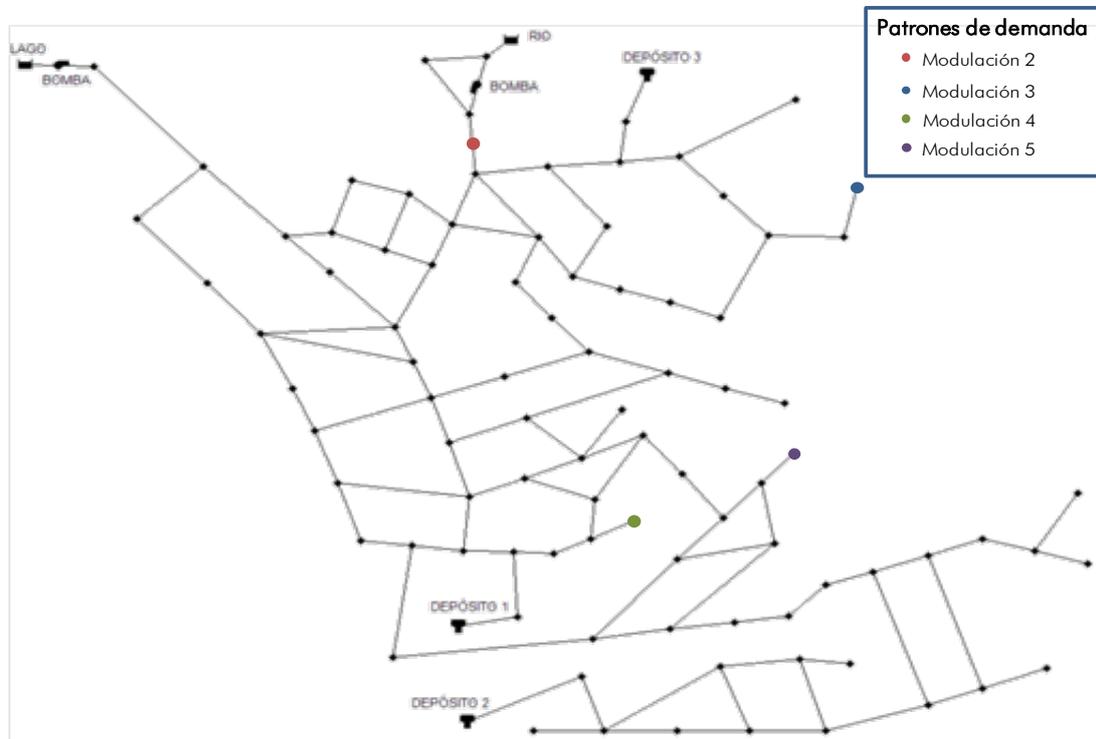


FIGURA 22. TOPOLOGÍA DE RED COMPLEJA, (CASO 5)

Para lograr observar esto se escogió un modelo matemático el cual tuviera varias de estas características (Figura 22)

Claramente el NFM, no está enfocado para este tipo de redes, pues llegado el caso y con una mala selección del AZP, se podría llegar a tener errores del 35% (Figura 23). Por ésto es recomendable acompañar el método con un análisis de hidráulica profundo por medio de un modelo matemático de red.

En el siguiente esquema se procesaron los errores del NFM variando el nudo AZP, en una distribución de valores de estos. Se encontró que aunque la mayoría de los errores están en torno a un error del 5 %, la variabilidad de los datos es muy alta.

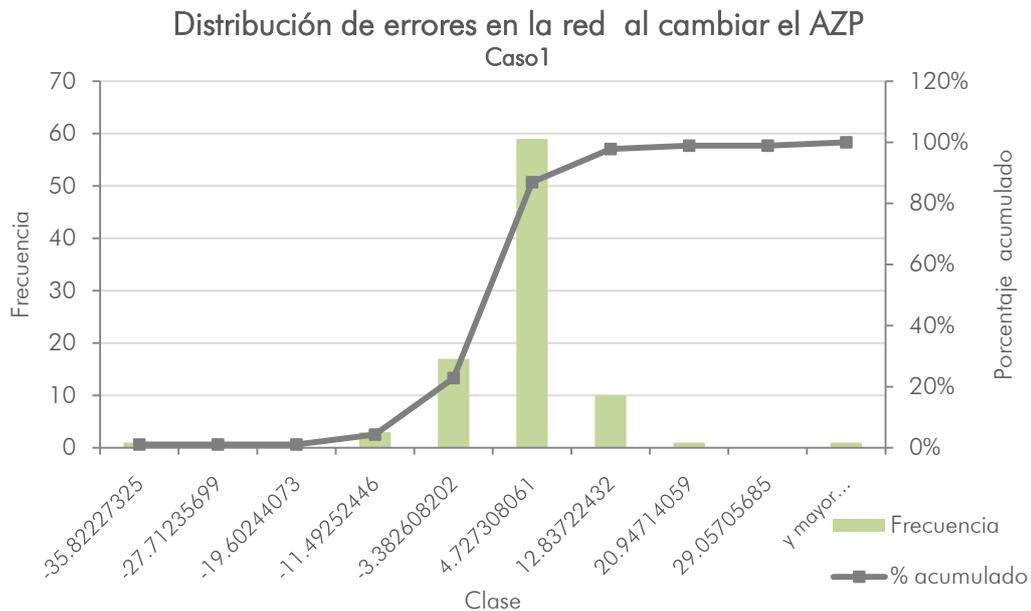


FIGURA 23. FRECUENCIA DE ERRORES CAMBIANDO EL NUDO AZP, (CASO 5)

3.5. Crítica del procedimiento

En este primer capítulo de análisis, el objetivo general fue conocer el comportamiento de NFM con respecto al error de sus cálculos a través de diferentes casos, presentados en orden de complejidad.

Los primeros dos casos hacen un barrido inicial del método cambiando las variables básicas de éste, como son el tiempo (tanto horario, como de aplicación de este), las cotas y los caudales. Con estos primeros análisis se encontró en términos generales, que el tipo de funcionamiento de una red (dependencia de la presión a un parámetro específico) es clave en la buena aplicación del método. Sin embargo el punto de inflexión entre un tipo y otro es confuso y poco estudiado.

Con un poco de indiferencia al escenario en que se esté operando la red, lo primero que se debe revisar de ésta es el comportamiento hidráulico; pues así se podrá a entender someramente cuál funcionamiento tiene el sistema.

Los otros casos están exclusivamente enfocados al análisis de la «bondad» del NFM ante escenarios típicos de operación y características topográficas de las redes. Aun cuando existe una gran cantidad de casuística sobre este tema, se abordó solo aquellas redes que para la investigación era lo más usual.

Cada escenario presentado confirmó que el NFM, creado para todo tipo de red, en realidad tiene límites marcados. Estos deben ser explorados y entendidos, puesto que ellos dan una clara idea del rango de error que se va tener en los resultados.

Una deducción importante del análisis de escenarios, corresponde al uso complementario de otros métodos para la evaluación eficiente del caudal fugado en redes. Existen dos tipos de sistemas, los primeros se pueden catalogar como «simples» y los segundos como «complejos».

Los sistemas simples, son redes cuya hidráulica no contiene situaciones extremas (posiblemente redes bien dimensionadas o sobredimensionadas). Tampoco tienen sistemas hidráulicos especiales (tanques de quiebre o de cola, bombes, etc.), haciéndolos perfectos para el uso del NFM, pues los errores que éste cometerá tendrán una horquilla pequeña.

Ahora, los sistemas complejos, se pueden describir como sistemas con poca gestión presiones, topografías quebradas o sistemas totalmente heterogéneos (diferentes actividades de consumo marcadas). Estos sistemas por su envergadura no deben solo utilizar el NFM, pues seguramente incurrirían en grandes errores, sino que debe complementarse con análisis más profundos del método para cada caso en particular.

Finalmente, como conclusión general de este capítulo, se encuentra que el NFM es capaz de adaptarse a la gran diversidad de sistemas y variaciones de parámetros hidráulicos, siempre y cuando el nudo AZP logre recoger la variación del sistema en el tiempo y a su vez la red tenga un comportamiento homogéneo.

4. EVOLUCIÓN DEL ERROR INICIAL EN EL NFM

4.1. El concepto del error inicial para el NFM

Como se ha comentado anteriormente, el NFM está comprendido por un estudio de campo y una serie de cálculos simples. Sin embargo, una de las claves de la exactitud del método es la estimación del caudal consumido, pues se parte de la base de que el método es aplicado a una hora de referencia tal que conocemos a la «perfección» el caudal consumido por los abonados de la red.

El caudal consumido puede ser estimado de dos formas posibles:

- Haciendo una estimación del consumo por medio del número de abonados y acometidas entre otros parámetros (UK Water industry, 1999b)
- Haciendo mediciones nocturnas de consumos a todos los abonados presentes en el sector, o bien, a una muestra de abonados e infiriéndola a toda la población (Thornton, 2008).

Esto significa que en la hora del caudal mínimo nocturno (t_{MNF}) los consumos de la población, se conocen con exactitud. Además se espera que no existan consumos excepcionales durante la medición. Sin embargo, este tipo de asunciones en la realidad no son fiables, puesto que la extensión de un distrito hidrométrico (*District Metered Area-DMA*) puede llegar a tener varios kilómetros,

como es el caso en Latinoamérica, cuya dimensión óptima está ligada al principio de recuperación de costes (Garzón, 2010), dando lugar a innumerables patrones de consumo nocturno producto de la variación sociocultural que el sector contenga. Por otro lado, también son usuales sectores hidrométricos con sistemas hidráulicos que distorsionan las inyecciones nocturnas como son los aljibes, muy habituales también en abastecimientos españoles (Pardo, 2010). Todas estas situaciones, por demás complejas en los sistemas reales, aumentan considerablemente la incertidumbre en los cálculos de los caudales demandados.

Reformulando este supuesto inicial, es casi seguro tener un error producto de las innumerables variables que envuelven las redes, con indiferencia de la hora en que éste sea aplicado. Entonces el error inicial será de una u otra manera transferido al volumen total de fugas del sistema en 24 horas, puesto que este volumen es la suma de los diferentes volúmenes hora a hora que el NFM calcula y cada uno de ellos es influenciado por este error. Si se observa detalladamente la formulación del NFM (Figura 24) se encuentra que el error está presente en la parte «fija» del sistema matemático y es inducido en las diferentes horas por la parte variable de éste.

$$Q_{\text{fugado, NFM}}(t) = \left(Q_{\text{fugado}}(t_{\text{MNF}}) \right) \times \left(\frac{P_{\text{AZP}}(t)}{P_{\text{AZP}}(t_{\text{MNF}})} \right)^{N1}$$

Volumen
fugado
con error

Modulación del
volumen fugado

FIGURA 24. PARTES DE LA FÓRMULA DE EXTRAPOLACIÓN DE VOLÚMENES

En la actualidad, el método de los caudales nocturnos es una de las herramientas esenciales para la gestión activa de fugas, siendo la base para muchos de los protocolos de actuación en pro de la reducción de fugas en sectores Hidrométricos, como PRESMAC en Suráfrica. Sin embargo es de destacar la falta

de profundidad en los análisis sobre las implicaciones que tiene este error inicial en el método. Es común asumir que este error no existe en la hora de la medición. Por ende, es necesario conocer cuán fiable y sensible es el método ante la presencia de un error en el caudal demandado y su transmisión al final en volumen fugado.

4.2. Estimación del Caudal Consumido a la hora del MNF ($Q_{\text{demandado}}$)

Como se comentó anteriormente, existen varias metodologías para disgregar los caudales mínimos nocturnos. Antes de ahondar en estas, es importante conocer los componentes del uso de agua nocturno.

4.2.1. Componentes del Uso de agua Nocturno

Desde hace más de 15 años, cuando se presentaron los principios BABE, también se desarrolló en Reino Unido (*UK Water Industry, 1994a a 1994g*), una serie de investigaciones con el objetivo de calcular los componentes de las pérdidas reales. Estos conceptos fueron desarrollados de tal manera que pudieran ser aplicados internacionalmente con cualquier nivel de detalle y desde entonces han sido aplicados con éxito tanto en el Reino Unido como en otros países, tales como Estados Unidos, Canadá, Bolivia, Colombia, Sudáfrica, etc.(Cabrera, 2004).

En la actualidad el Grupo Especialista en Pérdidas de Agua (IWA-WLSG, por sus siglas en inglés), se ha puesto en la tarea de crear una terminología internacional y útil para el análisis de los consumos nocturnos, producto de la creciente necesidad de las empresas de distribución a escala mundial. Éstas buscan insaciablemente directrices sobre la forma de calcular el uso nocturno para sus sistemas de agua, teniendo en cuenta las circunstancias específicas de cada sistema.

En el año 2010 el WLSG entregó el primer informe definitivo para la nueva terminología, con el fin de difundir ésta en el ámbito internacional. La terminología

para los componentes de la MNF se desarrolla sobre una base gradual, aumentando el detalle conforme va aumentando su profundidad. *Grado 1* es el más simple, *Grado 5* el más detallado. Cada uno de estos grados pueden ser apropiados en diversas circunstancias a nivel internacional, dependiendo de cuán altas o bajas sean las fugas nocturnas y qué sistema de estimación es utilizado para encontrar el caudal fugado (Fantozzi, 2010)

Grado 1: es el más simple, donde se crea la dicotomía principal entre fugas de red⁶ y consumo de los abonados. Entonces el caudal nocturno (MNF, por sus siglas en inglés) ahora será la suma, consumo nocturno (*Night Consumption- NC*) y fugas nocturnas (*Utility Night Leakage- UNL*).

$$\text{Fuga mínima nocturna en la red UNL (m}^3\text{/hora) = MNF-NC}$$

Grado 2: En este nivel, la terminología del caudal mínimo nocturno se fracciona de nuevo. Ahora la estimación del consumo nocturno (NC, por sus siglas en inglés) será dividida en las estimaciones separadas del consumo nocturno (*Night Use- NU*) por el abonado y la fuga nocturna del abonado (*Customer Night Leakage- CNL*).

Grado 3: Este comprende la disgregación de las fugas nocturnas del abonado (CNL, por sus siglas en inglés) en fugas internas (*inside Buildings-CNLI*) del edificio y fuera del edificio (*Outside Bilding- CNLO*).

A su vez las fugas del sistema, son divididas en dos subniveles: uno pertenece a las fugas detectables, ya sea por un programa activo de fugas, o reportadas a la empresa (*Detectable Burst Leakage- DL*). En el otro subnivel se encuentran las fugas no detectables conocidas como fugas de fondo que por sus características es económicamente inviable su reparación (*Undetectable Background Leakage- BL*).

Grado 4 y 5: son los grados más disgregados del caudal nocturno. Es de aclarar, que estos niveles de detalle en un sistema de distribución hace que sea imposible

⁶ Entiéndase como fugas de red, todo tipo de pérdidas de agua que se encuentre enmarcado dentro del sistema de tuberías, hasta llegar a las acometidas.

la estandarización de métodos de estimación en este nivel, debido a que muchos de los factores contemplados, son propios del sector, la empresa y tipo de infraestructura.

A continuación, se presentará en su totalidad el conjunto de términos que componen el caudal nocturno, con las nuevas terminologías propuesta por la IWA:

	GRADO 1	GRADO 2	GRADO 3	GRADO 4	
Caudal mínimo nocturno (MNF)	Caudal consumido (NC)	uso nocturno (CNU)	Consumo excepcional (ENU)	Uso del acueducto	
				No residencial residencial	
		perdidas nocturnas (CNL)	Consumo estimado (ANU)	No residencial residencial	
			Fuera de las propiedades (CNLI)	Inodoros, grifos y plomería	
			Fuera de las propiedades (CNLO)	Tuberías y aljibes	
	Perdidas en la red de distribución (UNL)			Fugas por roturas detectables (DL)	Perdidas por fugas no reparadas (DLU)
					Perdidas por fugas reportas (no Reparadas)
				Fugas por roturas no detectables (BL)	Perdidas en acometidas (BLR)
					Perdidas en las tuberías de distribución (BLM)
					GRADO 5

FIGURA 25. COMPONENTE DEL CAUDAL MÍNIMO NOCTURNO (FANTOZZI, 2010)

4.2.2. Metodologías para la estimación del caudal consumido ($Q_{demandado}$) en la hora del mínimo nocturno

Es interesante observar el estado del arte que existe sobre el tema propiamente; el cual es poco. Una de las causas de esto es el desconocimiento de la importancia y sensibilidad que puede producir una mala estimación de este parámetro en el

NFM. Por otro lado, hay que recordar que el estudio del patrón de consumo es un «ciencia joven» en la ingeniería, pues los primeros estudios empezaron en los años sesenta (Arregui et al., 2007). Esto crea gran déficit de información en cuanto a la influencia que el consumo y sus tendencias tiene en las diversas metodologías en que éste participa.

En la actualidad, las empresas de distribución de agua tienen dos formas «estándar» de calcular éste:

- Medición en campo: tradicionalmente, consiste en hacer una medición del caudal consumido en las residencias u otro uso específico que tuviera una probabilidad de uso nocturno (centros de ocio), durante varias noches. Esto normalmente se hace con data-loggers programables y contadores de pulso clase C o D. Este tipo de estudios sirven para conocer los patrones de consumo y los volúmenes promedios consumidos de la población.

El costo total de estudios como estos es considerable debido a que se deben tener en cuenta los costos del personal de instalación y desmontaje, los equipos y el procesamiento de la información y hace imposible que este sistema sea aplicable para el total de la población. Una vez se tiene la información procesada y pulida, se debe extrapolar a toda la red (entiéndase red como una DMA).

Sin embargo, hoy en día algunos abastecimientos tienen instalados contadores electrónicos «los cuales ya no son un mero instrumento para permitir la facturación a los clientes, sino una herramienta que proporciona mayor información sobre el consumo de agua, mejor servicio a los clientes y contribuye a mejorar la eficiencia de los sistemas de abastecimiento» (Veiga, 2008). Estos sistemas electrónicos son especialmente buenos para el análisis de consumos nocturnos porque:

- Gran parte de la población está siendo censada, aumentando considerablemente la fiabilidad de la muestra.
 - Son programables, guardando la información o mandándola por tele-lectura, a la hora del consumo mínimo nocturno. Por otro lado, el error del contador en este caso es pequeño (Arregui et al, 2010).
- Estimación de consumos: en términos generales es la forma más común de calcular los consumos nocturnos, debido a su facilidad y bajo coste. Ésta inicialmente fue planteada por UK Water Industry en el año 1994, después de haber hecho una serie de mediciones y análisis estadísticos de los consumos de varios abastecimientos de Reino Unido. La Tabla 15 es una adaptación del documento antes comentado.

TABLA 15. HOJA DE CÁLCULO DEL CAUDAL MÍNIMO NOCTURNO (ARREGUI, 2004)

Caudal entregado a los Usuarios					
		Número de usuarios	Sub-Total (l/h)	Total (l/h)	
Suma de consumos Nocturnos Excepcionales	Domésticos				
> 500 l/h individualmente	No domésticos				
Consumo nocturno doméstico estimado:					
a. 1,7 l/viv./h * Número de viviendas					
b. 0,6 l/hab./h * Número de habitantes					
Consumo nocturno no doméstico estimado:					
a. Simplificado:		A			
8 l/usuario/h * Número de usuarios		B			
		C			
b. Detallado:		D			
Clasificado por Grupos A a E**		E			
Total entregado a los usuarios:					

Fugas latentes a 50 m (AZNP)					
	Estado	l/Km/h	Longitud (Km)	Sub-total (l/h)	Total(l/h)
Tubería de Distribución	Bueno	20			
	Medio	40			
	Malo	60			
	Estado	l/viv./h	Número usuarios	Sub-total (l/h)	
Acometidas	Bueno	2,0			
	Medio	4,0			
	Malo	6,0			
SUMA					
AZNP (m.c.a.)					
Factor (FPC)*					
Total de fugas latentes:					
Caudal mínimo nocturno inevitable(l/h) (consumos+ fugas latentes)					

*(FPC) este factor corrector fue propuesto con el fin de estandarizar los valores de caudales nocturnos, refiriéndolos a una presión de 50 m.c.a., resultando dichos coeficientes (Tabla 16).

TABLA 16. FACTOR CORRECTOR DE LA PRESIÓN, TOMADO DEL MANAGING LEAKAGE, 1994

Factor Corrector de la presión									
AZNP (m)	20	30	40	50	60	70	80	90	100
PCF	0.329	0.53	0.75	1	1.27	1.57	1.88	2.23	2.59

**Los consumos nocturnos no domésticos de forma detallada se clasifican en los siguientes rangos:

Categoría	Tipo de Usuario	Consumo medio (l/usuario/h)
A	Estaciones de policía/ bomberos, centralitas, bancos, iglesias, jardines e instalaciones de tratamiento de agua	0.9
B	Tiendas, oficinas, talleres, lavanderías, grandes propiedades domésticas, pensiones, garajes, estaciones de servicio, campings, granjas y corrales	6.2
C	Hoteles, escuelas, cafés, restaurantes, tabernas, residencias y establos	12.6
D	Hospitales, fábricas, baños públicos y lugares de trabajo	20.5
E	residencias de ancianos, minas y canteras	60.6

FIGURA 26. CONSUMO MEDIO NOCTURNO PARA USUARIOS NO DOMÉSTICOS, (ARREGUI, 2004)

También la metodología plantea de forma simple el cálculo de la variabilidad que pueda existir en los consumos tanto residenciales como especiales (Tabla 17). Esta estimación fue producto de los análisis estadísticos de los consumos medidos en el informe, donde el caudal nocturno consumido será generado por porcentaje (p) de hogares (N) «activos» del conjunto de hogares presentes en el sector, del cual el número de propiedades activas sigue una distribución Binomial, cuya desviación estándar es:

$$\sqrt{Np(1-p)}$$

Donde:

p: porción de hogares activos, 17%;
N: número de hogares

Ahora bien la variabilidad de los consumos nocturnos también tendrá este tipo de tendencia por lo cual, la desviación estándar del consumo nocturno doméstico estimado será:

$$(\text{consumo}) \times \sqrt{Np(1-p)}$$

Donde:

p: porción de hogares activos;
 N: número de hogares;
 Consumo: tipo de consumo de los hogares (l/hr).

Y de acuerdo a las mediciones hechas en el estudio, se tiene que la proporción normal de hogares activos es 17%, cuyo caudal promedio es 10 litros/hora:

$$\left(10 \frac{l}{hr}\right) \times \sqrt{(N \times 0.17 \times (0.83))} \rightarrow 3.8 \sqrt{(N)} \frac{l}{hr}$$

De igual manera sucede con el caudal nocturno no doméstico estimado, el cual tiene el mismo comportamiento de la distribución Binomial, donde la porción de consumos activos en horas nocturnas es del 33 % con un caudal promedio de 24 l/hr. Matemáticamente es representado por:

$$\left(24 \frac{l}{hr}\right) \times \sqrt{(N \times 0.33 \times (0.67))} \rightarrow 11 \sqrt{(N)} \frac{l}{hr}$$

TABLA 17. ANEXO DE LA HOJA DE CÁLCULO DEL CAUDAL MÍNIMO NOCTURNO

Desviación Estándar de una media (l/h)	Sub Total (l/h)	Total (l/h)
Consumo domestico estimado	$3,8\sqrt{N_v}$	
Consumo no domestico estimado	$11\sqrt{N_{usu.}}$	

4.2.3. Errores típicos en la estimación de consumos nocturnos

Si bien, la estimación de consumos en un sistema de distribución es difícil de establecer para usuarios domésticos (Arregui et al., 2007), aún más lo es acotar la demanda a una hora específica del día. Haciendo una revisión rápida de los diferentes métodos descritos en párrafos anteriores, se encuentra que todos los métodos tienen una elevada incertidumbre sobre los hábitos nocturnos, dejando en entredicho la estimación de su valor (volumen demandado) en la red.

Todos los métodos basados en la medición de caudales están sujetos a los errores que el parque de medidores contiene, en especial en los casos del mínimo nocturno, donde existen los mayores errores de sub-medición. Por otro lado, el registrar caudales, como volúmenes en lapsos de tiempo generan distorsiones en la variación del caudal, que sin duda hay que tener en cuenta.

Los otros métodos de estimación denominados de «cálculo rápido» del caudal consumido, utilizan tablas adaptadas de valores del *Managing leakage* (UKWIR, 1994) llegando a incurrir en grandes errores con respecto al caudal realmente consumido. Estas tablas fueron diseñadas a partir de análisis estadísticos de ciudades que por su sistema sociocultural tienden a ser similares en configuración urbana y tipología de red. Esto significa que muchos de los valores presentados en las tablas recogían las características propias del entorno y que no son necesariamente viables alrededor del mundo.

Indudablemente, estos métodos son utilizados en países en desarrollo, por su bajo coste. Sin embargo el modelo urbanístico de dichos países queda totalmente diferenciado de los países desarrollados, teniendo una densidad de población y sistemas de conexiones diferentes, muchas de ellas clandestinas. «Las coberturas de servicio de agua potable para Iberoamérica es 89%, donde el crecimiento de la cobertura es lento, evidenciando que los países rezagados encuentran dificultades para cumplir los Objetivos de Desarrollo del Milenio» (CYCED, 2007). Esta clara evidencia muestra que estas estimaciones no calzarán adecuadamente en las realidades de muchos países en desarrollo como son los latinoamericanos.

4.3. Las posibles formas de incurrimientos del error del caudal consumido a la t_{MNF}

De acuerdo con lo antes analizado queda decantado que el caudal consumido es una variable esencial para el método de los consumos nocturnos y peor aún, este puede estar sujeto a grandes errores en su estimación. Por ende es necesario evaluar la transmisión de un error de partida en el caudal consumido y la sensibilidad del método frente a cambios de éste.

Inicialmente y de acuerdo a esto, se pueden dar dos circunstancias cuando incurrimos en un error del caudal fugado para el cálculo del volumen fugado en un día:

- *El primer caso*, se puede suponer que conocemos totalmente el caudal consumido a la hora del análisis de mínimos nocturnos, además de una buena medición del caudal inyectado en la zona; por ende conoceríamos correctamente el caudal fugado a la hora del mínimo nocturno; pero las presiones en el AZP son erróneas.

Este caso en particular no es frecuente, puesto que la presión en el punto del AZP debe ser medida, tendiendo un error mínimo; sin embargo, el error que se produzca por una mala elección del AZP y este no represente «la personalidad» de la red, es muy usual y será tratado en el Capítulo 5.

- *El segundo caso*, el cual abarcaremos en esta unidad, consiste en un error en valor del caudal fugado, producto de una mala estimación del caudal consumido en la hora del análisis del caudal mínimo nocturno (t_{MNF}); teniendo esta vez una buena medición de las presiones y el caudal inyectado.

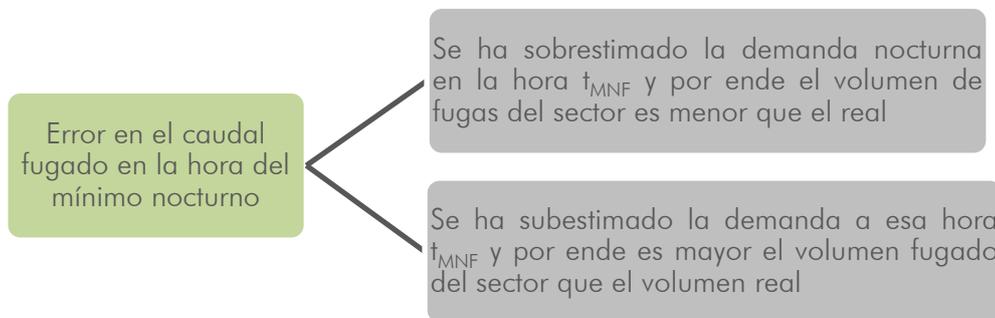
Este segundo caso, es sin duda alguna el problema más habitual para los operadores de las redes de distribución, puesto que el caudal consumido a la hora del mínimo nocturno es estimado de forma rápida. Al equivocarse en la estimación

del caudal consumido a la hora del mínimo nocturno, se está introduciendo un error de partida en el caudal fugado en esa misma hora, debido a que se debe cumplir que el caudal inyectado o total (Q_{total}) es la suma de estos dos caudales anteriores (Q_{fugado} y $Q_{demandado}$).

Debido a que el NFM, es una predicción aproximada del volumen fugado en 24 horas, por medio de un volumen fugado inicial a la hora t_{MNF} , el introducir un error en este volumen inicial, generará una tergiversación del volumen final de magnitud apreciable.

4.4. Evaluación del error inicial cuando hay una mala estimación de la demanda en la hora del mínimo caudal nocturno

Para evaluar el error inicial, se han propuesto dos situaciones yuxtapuestas, las cuales de alguna manera evalúan el método para todas las posibles variaciones en el caudal demandado.



Para lograr estas dos situaciones, se partió de la base en la cual se conoce los caudales inyectados, consumidos y fugados en la red, los cuales se encontraron por medio del modelo matemático de la red.

Una vez han sido conocidos los caudales reales de la red, se aplicaron las siguientes suposiciones (casos) con el fin de abarcar las diferentes posibilidades de incursionar en el error:

- Caso1: se asume que el caudal consumido es 1.2 veces el caudal consumido real de la red (20% de sobrestimación).
- Caso 2: el caudal consumido será 1.1 veces el caudal consumido real de la red (10% de sobrestimación).
- Caso 3: el caudal consumido será 0.9 veces el caudal consumido real de la red (10% de subestimación).
- Caso 4: se tiene un 20 % de subestimación del caudal consumido con respecto al caudal consumido real de la red.
- Caso 5: este caso, fue creado como control y transición de los errores; en este caso no se induce ningún error, el caudal consumido del caso es igual al caudal consumido real.

Estos errores en la estimación del caudal consumido se traducen en el caudal fugado por medio del principio de conservación de masas, donde se debe cumplir siempre:

$$Q_{inyectado} = Q_{demandado} + Q_{fugado}$$

Entonces, al cambiar el caudal consumido un porcentaje (mala estimación), el caudal fugado equilibrará este error, para siempre tener el mismo caudal inyectado o total. Una vez se obtengan los caudales fugados en la hora T_{MNF} , se podrá calcular el error que el NFM incurre en el volumen fugado para un día.

4.4.1. Metodología para la evolución del error por mala estimación del caudal consumido en el NFM

Para evaluar la transmisión de este error producto del caudal consumido en el NFM, se propuso una metodología de evaluación la cual incluyera las anteriores situaciones (Figura 27).

Para este análisis, al igual que en el capítulo anterior, se utilizó la plataforma de MathLab, para programar el modulo de Toolkit de Epanet. Con esto se consiguió variar los valores iniciales del NFM y hacer los diferentes cálculos matemáticos para la obtención del error del método para esta situación.

El modulo de cálculo está compuesto por siete bloques diferenciados:

- En primer bloque, se obtienen los datos necesarios, para los cálculos de los análisis (presiones y caudales en todos los nudos), además de las tuberías de inyección de la red.
- El Segundo bloque, se calculó el *factor hora- día*, para el AZP, el cual igualmente es conocido para la red en cuestión, por medio del análisis hecho en el capítulo 3.
- Al tercer bloque le corresponde la obtención del volumen inyectado, fugado y consumido de la red, para la hora T_{mnf} y el total de 24 horas.
- En el cuarto bloque, está dividido en dos etapas: en la primera se generan los casos antes mencionados, y en la segunda se calculan los volúmenes por medio del NFM para 24 horas.
- Finalmente el quinto bloque corresponde al cálculo del error del método y la explotación de los diferentes resultados intermedios y finales.

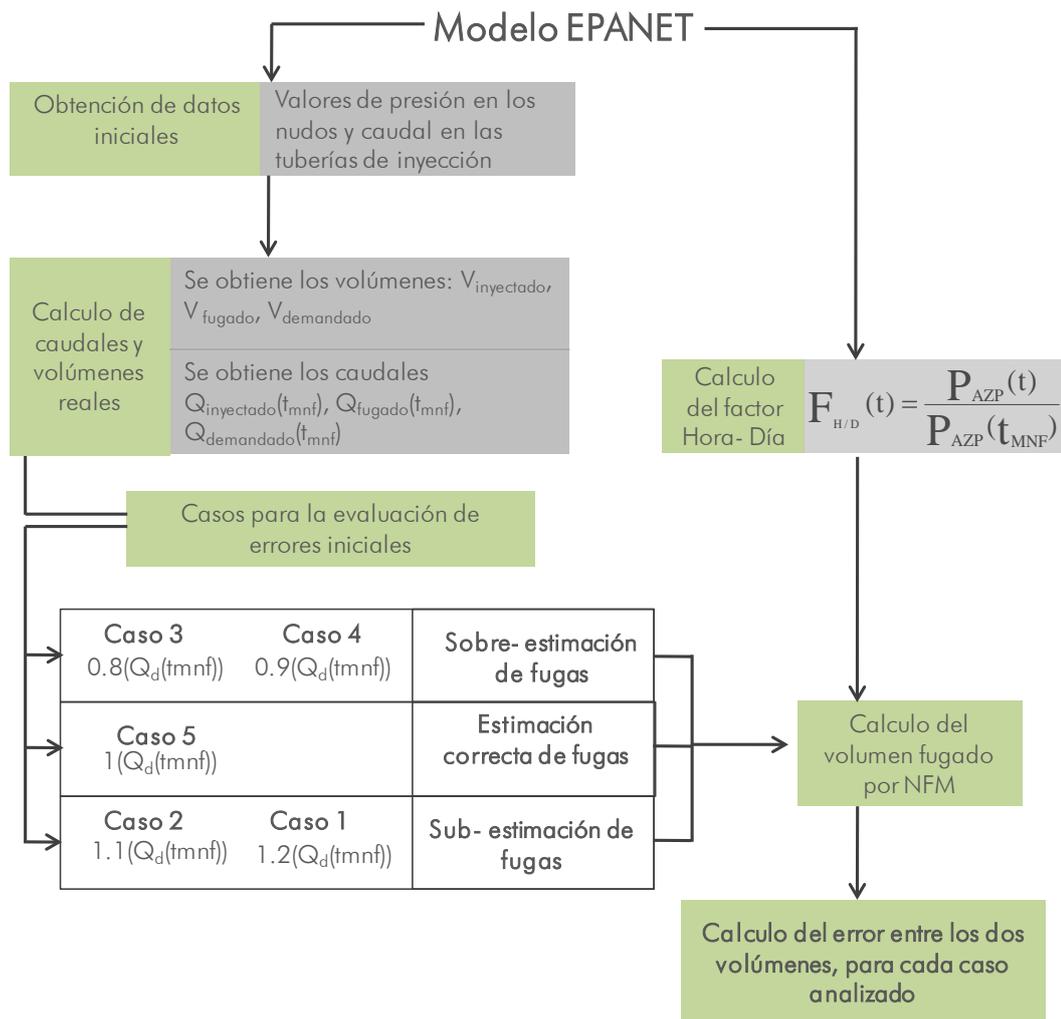


FIGURA 27. METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL ERROR DEL NFM, CON UN ERROR INICIAL

4.4.2. Cálculo del error en el NFM cuando se tiene un error en el caudal demandado

Para calcular los volúmenes inyectados, fugados y demandados, durante 24 horas y utilizando el modelo matemático de la red, se procedió de la siguiente manera:

$$V_{inyectado} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N Q_{inyectado,i}(t)$$

$$V_{\text{fugado}} = \sum_{t=1}^{24} Q_{\text{fugado}}(t) = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^N Q_{\text{fugado},j}(t) = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^N C_j \times P_j^{N1}(t)$$

$$V_{\text{demandado}} = \sum_{t=1}^{24} Q_{\text{demandado}}(t) = \left(\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^N Q_{\text{inyectado},i}(t) - \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^N C_j \times P_j^{N1}(t) \right)$$

Donde:

- $V_{\text{inyectado}}$: Volumen inyectado real en la red (modelo EPANET);
- V_{fugado} : Volumen fugado por la red, utilizando el sistema de fugas de EPANET;
- $V_{\text{demandado}}$: Volumen demandado por los consumos de la red;
- $Q_{\text{inyectado},i}(t)$: Caudal inyectado en la hora t , en la tubería i ;
- $Q_{\text{fugado},j}(t)$: Caudal fugado en la hora t , para el nudo j ;
- $Q_{\text{demandado}}(t)$: Caudal demandado por los consumos en la hora t .
- C_j : Coeficiente de fuga para el nudo j ;
- P_j : Presión en el nudo j en la hora t .

Igualmente y de forma semejante se hizo para los volúmenes inyectados, fugados y demandados para la hora del análisis del caudal mínimo nocturno (t_{MNF}):

$$V_{\text{inyectado}}(t_{\text{MNF}}) = \sum_{i=1}^N Q_{\text{inyectado},i}(t_{\text{MNF}})$$

$$V_{\text{fugado}}(t_{\text{MNF}}) = \sum_{j=1}^N C_j \times P_j^{N1}(t_{\text{MNF}})$$

$$V_{\text{demandado}}(t_{\text{MNF}}) = \left(\sum_{i=1}^N Q_{\text{inyectado},i}(t_{\text{MNF}}) - \sum_{j=1}^N C_j \times P_j^{N1}(t_{\text{MNF}}) \right)$$

Donde:

- $V_{\text{inyectado}}(t_{\text{MNF}})$: Volumen inyectado en la red, a la hora t_{MNF} ;
- $V_{\text{fugado}}(t_{\text{MNF}})$: Volumen fugado por la red, a la hora t_{MNF} ;
- $V_{\text{demandado}}(t_{\text{MNF}})$: Volumen demandado por los consumos, a la hora t_{MNF} ;
- $Q_{\text{inyectado},i}(t_{\text{MNF}})$: Caudal inyectado en la hora t_{MNF} , para la tubería i ;
- C_j : Coeficiente de fuga para el nudo j ;
- P_j : Presión en el nudo j en la hora t_{MNF} .

Ahora, para el cálculo del caudal fugado en cada hora durante un día, se aplicó la fórmula del NFM (capítulo 2). De acuerdo a las consideraciones de conservación de masa antes presentada y asumiendo que el caudal inyectado a la hora t_{MNF} es exacto, se tiene la siguiente lo siguiente:

Sabiendo que:

$$V_{inyectado}(t_{MNF}) = V_{inyectado,Casos}(t_{MNF})$$

Entonces,

$$V_{demandado,casos}(t_{MNF}) = \beta V_{demandado}(t_{MNF})$$

Donde:

β : Porcentaje de error cometido al estimar el caudal demandado;
 $V_{inyectado,Casos}$: Volumen inyectado, para cada caso planteado.

El volumen fugado en un caso será:

$$V_{f,caso}(t_{MNF}) = V_{inyectado}(t_{MNF}) - \beta V_{demandado}(t_{MNF})$$

$$V_{f,caso}(t_{MNF}) = \left(\sum_{i=1}^N Q_{inyectado,i}(t_{MNF}) \right) - \beta \left(\sum_{i=1}^N Q_{inyectado,i}(t_{MNF}) - \sum_{j=1}^N P_j \times P_j^{N1}(t_{MNF}) \right)$$

$$V_{f,caso}(t_{MNF}) = \sum_{i=1}^N Q_{inyectado,i}(t_{MNF}) - \beta \sum_{i=1}^N Q_{total,i}(t_{MNF}) - \beta \sum_{j=1}^N P_j \times P_j^{N1}(t_{MNF})$$

$$V_{f,caso}(t_{MNF}) = \left(\sum_{i=1}^N Q_{inyectado,i}(t_{MNF}) \right) \times (\beta - 1) - \beta \sum_{j=1}^N P_j \times P_j^{N1}(t_{MNF})$$

Donde:

$V_{f,caso}(t_{MNF})$: Volumen fugado para la hora t_{MNF} ;

Por otra parte, se tiene que el volumen fugado por el NFM para todo el día será la suma de los caudales fugados calculados por el método,

$$V_{\text{fugado,NFM}} = \sum_{t=1}^{24} Q_{\text{fugado,NFM}}(t)$$

Sustituyendo la ecuación anterior la fórmula del NFM se tiene:

$$V_{\text{fugado,NFM}} = (Q_{f,\text{casos}}(t_{\text{MNF}})) \times \left(\sum_{t=1}^N \frac{P_{\text{AZP}}(t)}{P_{\text{AZP}}(t_{\text{MNF}})} \right)^{N1} \quad \text{ECUACIÓN 10}$$

$$V_{\text{fugado,NFM}} = (Q_{\text{inyectado}}(t_{\text{MNF}}) - Q_{\text{demandado,casos}}(t_{\text{MNF}})) \times \left(\sum_{t=1}^N \frac{P_{\text{AZP}}(t)}{P_{\text{AZP}}(t_{\text{MNF}})} \right)^{N1}$$

$$V_{\text{fugado,NFM}} = \left(\left(\sum_{i=1}^N Q_{\text{total},i}(t_{\text{MNF}}) \right) \times (\beta - 1) - \beta \sum_{j=1}^N P_j \times P_j^{N1}(t_{\text{MNF}}) \right) \times \left(\sum_{t=1}^N \frac{P_{\text{AZP}}(t)}{P_{\text{AZP}}(t_{\text{MNF}})} \right)^{N1}$$

Admitiendo que el volumen diario obtenido mediante Epanet es el valor verdadero, el error relativo ε que se produce al aplicar el método simplificado se obtendrá como:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{fugado,NFM}} - V_{\text{fugado,EPANET}}}{V_{\text{fugado,EPANET}}} = \frac{V_{\text{fugado,EPANET}}}{V_{\text{fugado,NFM}}} - 1$$

$$\varepsilon = \frac{\sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^N C_j \times P_j^{N1}(t)}{\left(\left(\sum_{i=1}^N Q_{\text{total},i}(t_{\text{MNF}}) \right) \times (\beta - 1) - \beta \sum_{j=1}^N P_j \times P_j^{N1}(t_{\text{MNF}}) \right) \times \left(\sum_{t=1}^N \frac{P_{\text{AZP}}(t)}{P_{\text{AZP}}(t_{\text{MNF}})} \right)^{N1}} - 1$$

Donde:

$V_{\text{fugado,NFM}}$: Volumen fugado por la red, calculado por el método de los flujos nocturnos

$V_{\text{fugado,EPANET}}$: Volumen fugado por la red, calculado por Epanet

4.5. Casos prácticos

Con el objetivo de ilustrar la transmisión del error inicial producto de una mala estimación del caudal consumido, se procedió a aplicar la metodología en la red, utilizando una red sintética (Figura 28) totalmente controlada, cuyas propiedades se presentan en la Tabla 18 y Tabla 19. Sin embargo buscando la fiabilidad de las «predicciones», se analizaron otras redes sintéticas y un caso real de un Sector Hidrométrico. En los anexos se encontrará la información de estos.

En el ejemplo se ha adoptado las siguientes hipótesis:

- Las fugas se han asignado a los nudos en proporción directa a la longitud de las tuberías.
- Las fugas representan el 30% del volumen total de agua inyectado en la red
- $N1$ =variará de 1 a 1.5 para los diferentes casos.
- Todos los nudos son residenciales y tiene la misma curva de modulación horaria (Figura 30).
- La rugosidad de todas las tuberías es el mismo 0.1 mm
- Tiene un embalse, con una curva de modulación de la altura (Figura 29).

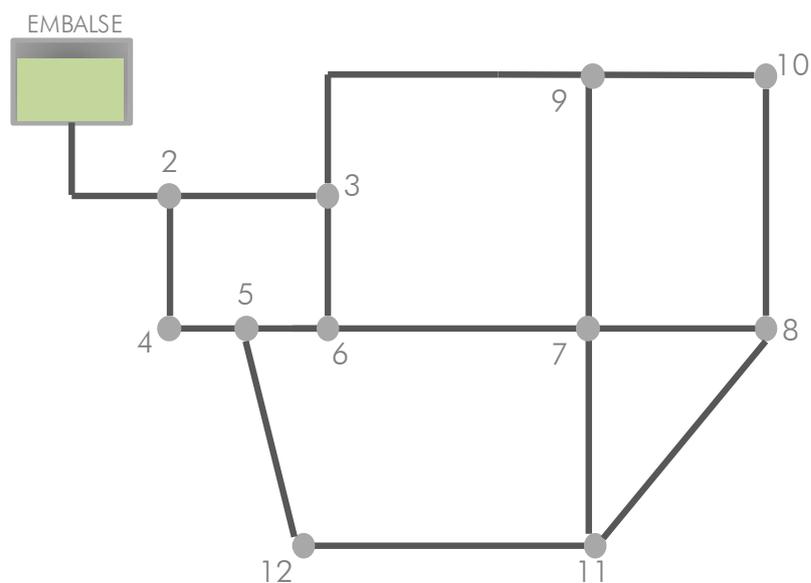


FIGURA 28. ESQUEMA DE LA RED DE ANÁLISIS, (ERROR INICIAL)

TABLA 18. PROPIEDADES DE LOS NUDOS

Nudo	Cota [m]	Demanda [l/s]	C_j [lps/m ^{1.0}]
2	60	10	0.617134
3	50	10	0.157566
4	40	10	0.078783
5	38	10	0.118175
6	60	10	0.091914
7	70	10	0.196958
8	75	10	0.164131
9	60	10	0.157566
10	50	10	0.091914
11	60	10	0.190392
12	55	10	0.118175

TABLA 19. PROPIEDADES DE LAS TUBERÍAS

Tuberías	Nudo inicial	Nudo final	Longitud [m]	Diámetro [mm]
2	2	4	200	400
3	4	5	400	350
4	5	6	100	250
5	5	12	400	300
6	12	11	500	250
7	2	3	500	350
8	3	6	200	300
9	3	9	500	250
10	9	10	300	200
11	10	8	400	150
12	8	7	300	200
13	7	9	400	150
14	6	7	400	250
15	7	11	400	200
16	11	8	550	150
23	20	2	2000	450

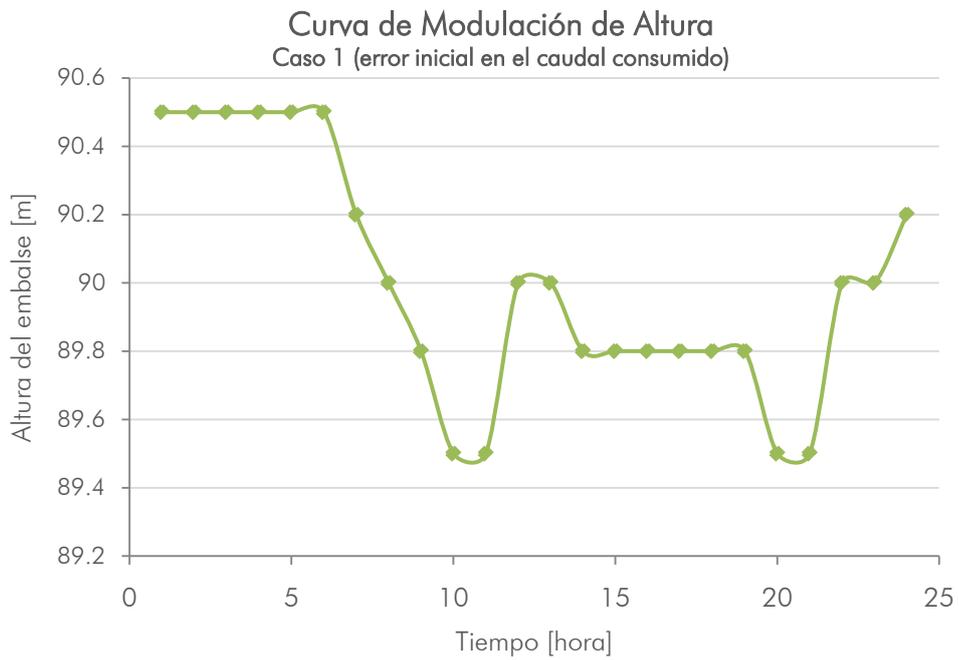


FIGURA 29. MODULACIÓN DE ALTURA DEL EMBALSE, (ERROR EN EL CAUDAL CONSUMIDO)

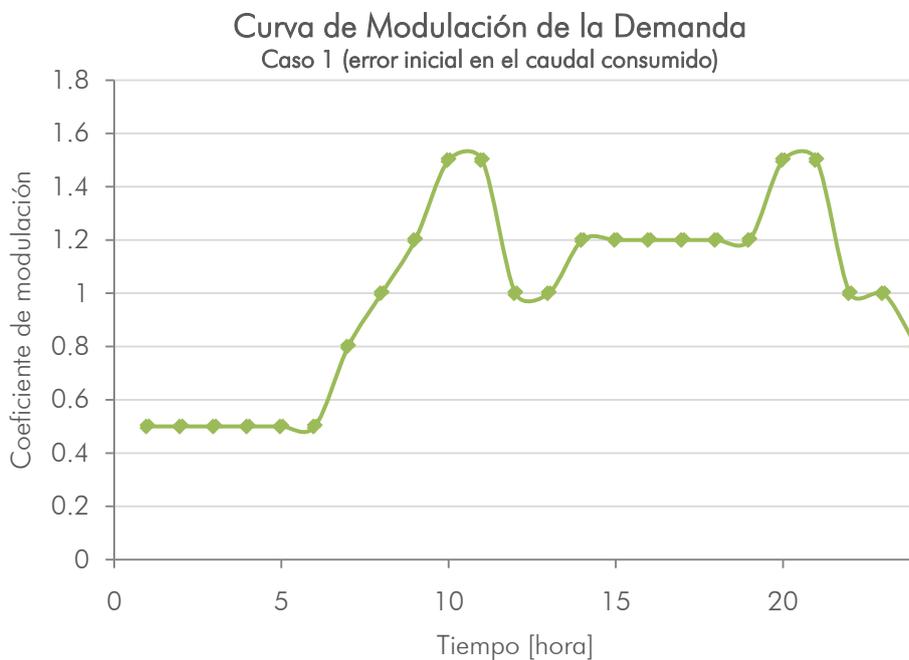


FIGURA 30. MODULACIÓN DE LA DEMANDA (ERROR EN EL CAUDAL CONSUMIDO)

4.6. Análisis de los resultados

Para lograr conocer la transmisión del error inicial, se plantearon dos análisis específicos, el primero consta de analizar en sí, cómo éste es transmitido variando la magnitud del error inicial. En el segundo caso se varió el coeficiente N1 de la red, con la finalidad de observar si el error era perturbado sensiblemente por la parte cambiante de la ecuación de caudales mínimos nocturnos.

4.6.1. Transmisión del error inicial del caudal consumido variando la magnitud de éste

A continuación se presentan los volúmenes fugado, total inyectado y consumido, obtenidos del modelo matemático de la red, tanto para las 24 horas (1día), como para la hora t_{MNF} (Tabla 20). Como se ha comentado anteriormente, estos valores fueron considerados como el resultado correcto del modelo, siendo utilizados para el cálculo del error.

TABLA 20. VOLÚMENES DE LA RED, PARA LA HORA DEL MÍNIMO NOCTURNO Y EL PERÍODO EXTENDIDO

Tipo de volumen	Período de tiempo	
	Hora t_{MNF}	Día completo
Fugado (m ³)	212.3	4593.2
Inyectado (m ³)	410.3	14097.2
Demandado (m ³)	198.0	9504.0

En la Tabla 21 se puede observar los volúmenes fugados calculados por medio del NFM, para cada uno de los casos de error en el caudal demandado:

TABLA 21. VOLÚMENES FUGADOS, CALCULADOS CON EL MÉTODO DEL CAUDAL MÍNIMO NOCTURNO

Casos	$Q_{f, NFM} (m^3)$
1	3715.3
2	4141.3
3	4993.3
4	5419.3
5	4567.3

Finalmente, el error del método, producto de inducir un error en el caudal consumido en la hora t_{MNF} , para cada tipo de caso (Tabla 22):

TABLA 22. ERROR EN EL MÉTODO POR ERROR INICIAL EN EL CAUDAL CONSUMIDO

Error				
Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
-19.11%	-9.84%	8.71%	17.99%	-0.56%

Al graficar el nivel de error del caudal consumido para los diferentes casos, con respecto al error producto del método en cada caso, se obtuvo una transmisión de éste, inversa y lineal sobre el volumen fugado por medio del NFM (Figura 31). Esto quiere decir que el error en el caudal consumido estimado en la hora t_{MNF} será igual e inverso en el caudal fugado por medio de él.

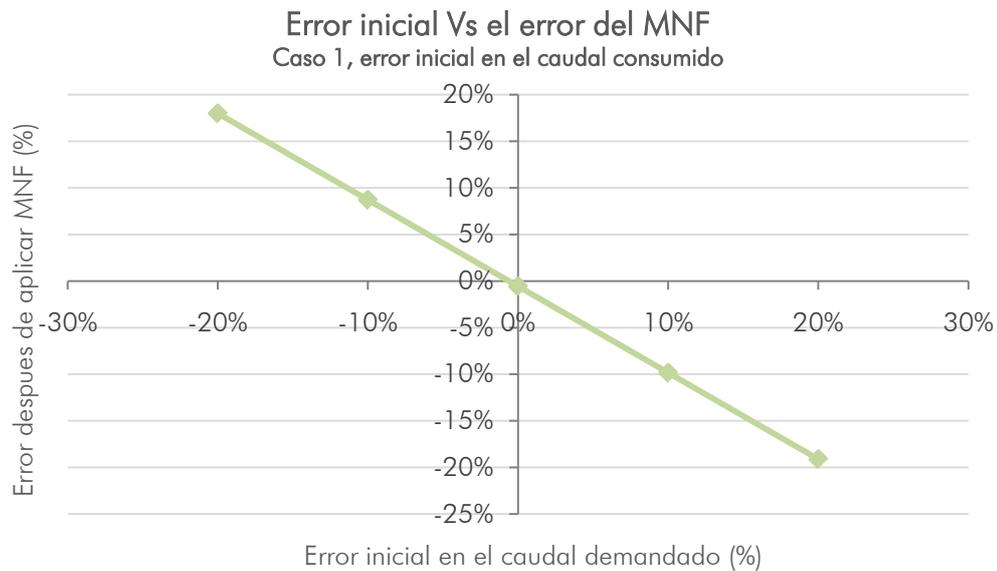


FIGURA 31. TRANSMISIÓN DEL ERROR EN EL NFM

Este comportamiento (grafica) es debido a que el error inducido en el caudal demandado, solo se refleja en el caudal fugado del método (Ecuación 1), la cual es la parte «fija» de la función matemática. por el contrario si este error afectara la parte «dinámica» de la ecuación (factor Noche- Día), cambiaría de forma exponencial por el N1 como lo es el error propio del método.

Como es predecible, al introducir un error de sobrestimación en el volumen consumido encontramos un valor menor de volumen fugado, incurriendo con igual porcentaje de error. Esto sucede de manera igual si se tuviera una sub-estimación del caudal demandado.

4.7. Análisis de la transmisión del error cuando se varia el N1

Ahora bien, con la finalidad antes comentada, se varió el coeficiente N1 desde los rangos extremos propuestos por el Grupo de Especialistas en Pérdidas de Agua de la IWA. Este coeficiente generalmente varía entre 0.5 y 1.5. Siendo el segundo para redes con tuberías muy flexibles (plásticos) y el 0.5 para tuberías muy rígidas (metálicas), igualmente se analizó el caso especial del valor 1.2 puesto que en

general es el valor más aceptado por las empresas de distribución mundial, para redes mixtas en cuestión de material.

A continuación se presentan los errores del volumen fugado calculados por medio del NFM, utilizando la gama de valores de exponente N1 antes comentada, (Tabla 23):

TABLA 23. VARIACIÓN DEL ERROR DEL NFM, PARA CADA CASO CAMBIANDO EL EXPONENTE N1

Error caudal Demandado	Casos Analizados			
	N1=0.5	N1=1	N1=1.2	N1=1.5
20%	-19.42%	-19.11%	-17.89%	-17.83%
10%	-9.64%	-9.84%	-8.66%	-8.83%
0%	0.14%	-0.56%	0.57%	0.18%
-10%	9.92%	8.71%	9.81%	9.18%
-20%	19.70%	17.99%	19.04%	18.18%

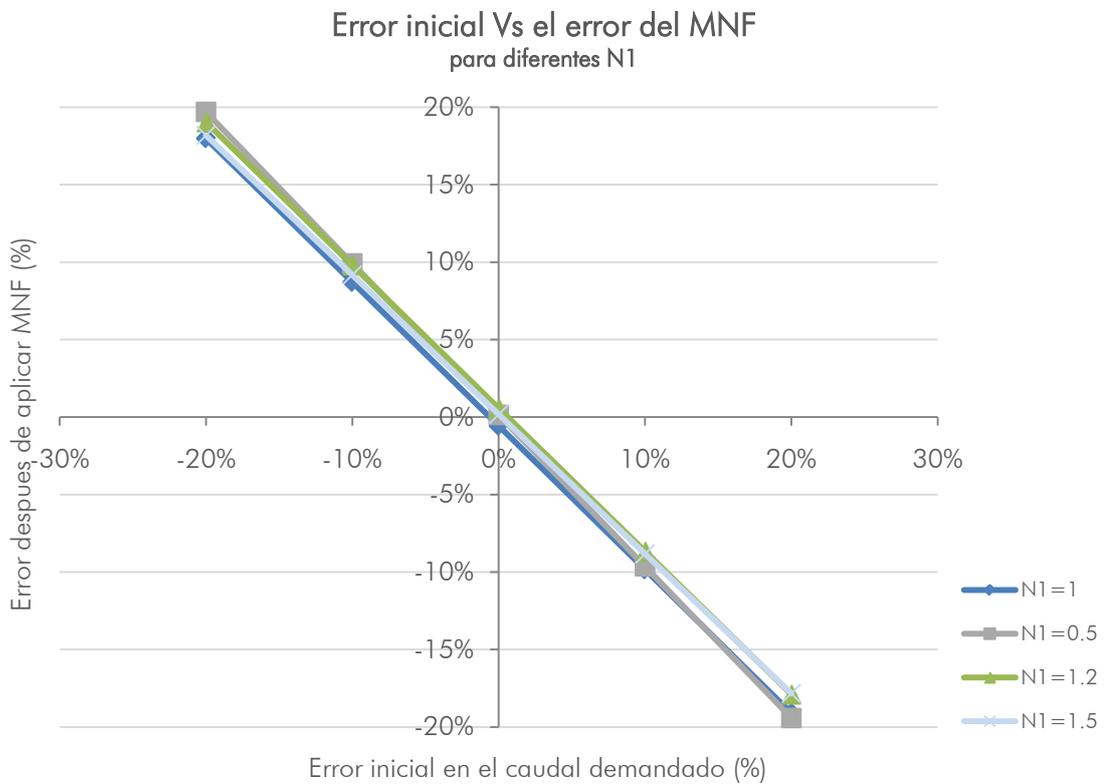


FIGURA 32. EVOLUCIÓN DEL ERROR DEL NFM, PARA DIFERENTES N1 Y ESTIMACIONES INICIALES DE Q_0

Revisando la sensibilidad del error ante la variación del N1, se puede afirmar que éste sigue teniendo una variación lineal, siendo casi imperceptibles las distorsiones que el coeficiente N1 produce en el error del método cuando tiene un error el volumen fugado inicial. Como se comentó en párrafos anteriores la variación del coeficiente N1 no es un parámetro sensible (Figura 32), pues la magnitud con que distorsiona el error del NFM respecto a la magnitud del error ya introducido por el caudal consumido es insignificante.

4.8. Alternativas de mejora para disminuir el error inducido por el caudal consumido

Las mejoras en esta parte del método son realmente puntuales y pocas, pues se dirigen al buen cálculo del caudal consumido o en la buena medición del caudal inyectado.

Teniendo en cuenta que el error más común en la estimación del caudal consumido e inyectado, es producto de la inexactitud de los aparatos de medición, puesto que estos instrumentos por su naturaleza mecánica y de funcionamiento, tienen grandes probabilidades de sufrir desajustes (Arregui et al., 2007). Se debe corregir la formulación del NFM, con el error del parque de contadores (en caso del caudal demandado) y el error del caudalímetro de entrada a la zona (para el caudal inyectado). Con esto se corregirá el volumen fugado final de una sub o sobre estimación con respecto al volumen real.

Para lograr introducir la corrección por metrología de los instrumentos de medida de caudal, se varió la ecuación fundamental del NFM. Tenemos que el error de los instrumentos de medida es:

$$\%ErrorMedida = [\%(+/- Error Medidores) + \%(+/- Error Caudalímetro)]$$

Introduciendo este error en la formulación del NFM, obtenemos una variante del método corrigiendo errores en la medición

$$V_{\text{fugado,NFM}} = (+/- \% \text{ErrorMedida})(Q_{\text{fugado}}(\text{tmnf})) \times \left(\frac{\sum_{t=1}^{24} P_{\text{AZP}}(t)}{P_{\text{AZP}}(\text{tmnf})} \right)^{N1}$$

4.9. Crítica del Método de los Caudales Nocturnos

Es evidente que el NFM, como se ha mostrado en los diferentes capítulos es un método sumamente ajustado a la realidad de las redes de distribución, siempre y cuando los parámetros de operación de las mismas se encuentren dentro de los rangos «normales» de magnitud. No obstante, en este capítulo se quiere dejar presente que el método es altamente sensible a las variaciones del caudal fugado estimado en la hora del análisis, el cual sin duda alguna es el amplificador de las incertidumbres y falsas estimaciones en los resultados que el método puede llegar a cometer.

Por otro lado, se evidenció que los errores que cometidos en las estimaciones de caudal inyectado o consumido en la hora del análisis, serán trasladados linealmente por el método. Esta tendencia contundente, facilita de uno u otra manera la eliminación de ese error al final del procedimiento.

Finalmente, este capítulo, quiso mostrar de manera global y sencilla la importancia de una buena estimación del caudal fugado en la hora de análisis de los caudales mínimos nocturnos y a su vez exponer el estancamiento técnico que la estimación de este parámetro tiene hasta el momento, como se evidencia en el uso de los cálculos empíricos (método estimación de Managing Leakage), siendo de carácter obligatorio acotar las estimaciones que en esta hora deban hacerse.

5. ANÁLISIS DEL AZP (*AVERAGE ZONE POINT*)

5.1. Importancia del AZP en el Método de los Caudales Nocturnos

Reiteradamente, se ha presentado en los diferentes capítulos la importancia del nudo AZP para el NFM sin abordar a fondo el modo en qué éste es elegido. Haciendo una primera revisión de la formulación del NFM, se encuentra que ésta gira en torno a un nudo de la red, el cual debe de «recoger» o representar el comportamiento hidráulico del sistema. Sí el AZP no logra cumplir su cometido, hará que el método incurra en un error cuya magnitud será producto de cuánto este se desvíe del comportamiento.

Cuando el método fue inicialmente desarrollado, en los años noventa respondía a la forma de gestión de Reino Unido. Por ende el NFM está completamente enfocado en basar todo el análisis en un punto, donde se tuviera una serie de mediciones fáciles de hacer y en un parámetro igualmente fácil de medir, como es la presión.

Debido a esto, desde que el método fue desarrollado, se ha hecho énfasis en que sólo necesita un parámetro para funcionar; dejando un poco al olvido la deducción o selección de éste y mucho más olvidada la influencia que una mala selección puede traer consigo en el cálculo.

En el «*Managing Leakage*» (UKWIR, 1994), donde aparece oficialmente el análisis de los caudales nocturnos, se dio una serie de pautas para la selección del AZP, que como mostraremos, no han evolucionado sustancialmente desde hace

quince años. Agravando más el contexto, al revisar el estado del arte del NFM, las investigaciones actuales están enfocadas a la gestión de presiones de los sistemas, buscando alternativas de proveer de forma más precisa la presión mínima que la red necesita. Pero todos estos desarrollos, tienen como base en su formulación el uso del AZP, el cual es calculado de manera tradicional, casi aleatoria y poco efectiva, como mostraremos a lo largo de este capítulo.

5.2. Selección del AZP

El término *Average Zone Point* (AZP), como su nombre indica, es la representación de un punto, el cual recoge las características de la red para dar como producto una presión promedio de ésta.

De ahí que todas las formas de cálculo de éste busquen identificar primero una presión promedio, para luego identificar el punto donde ocurre dicha presión. Este planteamiento en principio es fácil y simple de aplicar, sin embargo la pregunta ahora no se centra en ¿qué punto en el espacio tiene estas características? sino ¿cuál es la presión promedio del sistema?, la cual ya no tiene una respuesta sencilla y mucho menos exacta.

La presión de una red, tiene las cualidades de variar en el tiempo y en el espacio conforme cambian los estados de las variables hidráulicas y por supuesto las condiciones físicas de ésta. Igualmente, la presión promedio de una red, seguramente responde de igual manera en el tiempo. Ahora bien, decir que la presión promedio de un sistema es el promedio aritmético de las presiones presentes en un tiempo t , es una asunción simplista y poco real pues se estaría castigando los sectores que tuvieran mayor dominio de la red.

Si por el contrario se asumiera una presión promedio ponderada, se entraría en el dilema de cuál debe ser el factor de ponderación, pues existe un sinnúmero de

variables dominantes de la presión, como la cota, el caudal demandado, las pérdidas de carga, diámetros, etc. Por eso este punto en el cálculo del volumen fugado por medio del NFM es uno de los más complejos.

Todas estas consideraciones no simples, fueron pasadas por alto cuando se creó la metodología, pues no se vislumbraba la complejidad antes mostrada y como se ha comentado antes, todavía no se le ha dado el valor en las investigaciones que este tema merece. A continuación se hará un recuento de los métodos más relevantes de selección del AZP, como la propuesta que esta investigación hace.

5.2.1. La primera pauta para la selección del AZP (UK Water Industry)

La primera pauta para la selección del AZP fue en el «*Managing leakage*» (UKWIR, 1994), la cual es una simple propuesta para la selección rápida de éste. Teniendo en cuenta la topografía del sistema y la densidad de acometidas, se lleva a cabo en varias etapas:

- De acuerdo a planos topográficos (curvas de nivel), se calcula el nivel promedio de la red. Si la red es grande se recomienda que se utilice escalas de planos 1:10000 a menos que sean DMAs, cuya escala debería ser 1:1250.
- Se Examina la distribución de las propiedades⁷ de acuerdo a la densidad y el tipo (esto se debe a que esta metodología fue paneada para Reino Unido, donde no se llevaba detalle de los abonados).
- Se selecciona un hidrante que coincida con el sector con mayor densidad de acometidas y el nivel promedio de la red. Este hidrante representa el AZNP (*Average Zone Night Pressure*), como el AZP de ésta.

⁷ Entiéndase propiedades: como el conjunto de infraestructuras urbanas que tienen un gasto hídrico (casas, edificios, fuentes, hidrantes, etc)

5.2.2. Estado de la cuestión en la selección del AZP

El estado del arte en la selección del AZP ha estado profundamente influenciado por las pautas de la UK Water Industry las cuales se mostraron en párrafos anteriores, como se evidencia en las formas de selección o cálculo del AZP propuestas por muchos autores como asociaciones de referencia internacional. A continuación se presentan las más destacadas:

- *Pressure Management Program* (McKenzie, 2001)

Una vez más, McKenzie en sus diferentes propuestas de aplicación del NFM (Presmac y Samflow) propone obtener el nudo AZP, por medio del cálculo de la elevación media del sistema.

- Recomendación de la Asociación Internacional del Agua (IWA) para la selección del AZP

En su (*DMA Management Guidance Note, 2007*) recomendó la selección del AZNP o AZP de forma simple, como el valor medio del nivel de suelo de las acometidas. Además si llegara el caso de que existieran una o más entradas, el AZNP sería el promedio ponderado de la diferencia de presión entre cada entrada y el AZP, utilizando el número de acometidas como coeficiente de ponderación.

- *Water Loss Control*, segunda edición, de Willian Thornton (2008)

Citamos este libro, pues es uno de los «key books» en la gestión de pérdidas de agua a nivel mundial, donde se proponen varias maneras para identificar el punto AZP. Si se tiene un modelo matemático del sector, el AZP puede ser hallado promediando la información nudo por el número de acometidas que sirve éste.

Otra manera de calcularlo, consiste en asignar el número de acometidas o longitud de la red dentro de las curvas de nivel. Con esto se obtiene un

peso por zona de nivel. Una vez se ha calculado éste, se obtiene la presión media ponderada de toda la zona.

Muchas de las aplicaciones del NFM en la actualidad describen la selección del AZP por medio de sistemas de información geográfica, los cuales han llevado a generar planos dinámicos donde se cruza información de la topografía del sistema y las cualidades del sistema (acometidas, densidad de tuberías, etc.). Con estos avances se consigue un punto ponderado por varios factores influyentes en las redes. Sin embargo, no existe todavía una metodología formal para la selección.

5.3. Análisis sobre la selección del AZP en un DMA

Debido a la influencia sobre el error del NFM, al cambiar el nudo AZP entre los nudos de la red (Capítulo 3), se vio la necesidad de analizar la selección de éste de manera profunda y sistemática, buscando su optimización.

El análisis de este capítulo trata de obtener una metodología rigurosa para la selección del AZP en la redes y, como se ha observado, éste gira en torno a la denominada presión media del sistema. Tal presión media no debe entenderse como el resultado de un simple promedio aritmético, sino más bien como aquel valor de presión en aquel nudo que mejor representa el estado de presiones del sistema en un período de análisis dado. Para lograr obtener la presión media del sistema se utilizaron variables que constantemente en la literatura han sido mencionadas (caudal, topografía y tuberías). Con éstas se plantearon dos tipos de análisis:

- El primer grupo de análisis están enfocados para ver la afinidad o sensibilidad de las diferentes variables en la selección del AZP.
- El segundo grupo de análisis estuvo destinado en obtener una formulación matemática formal para seleccionar el nudo correcto.

Los análisis fundamentalmente están basados en el acercamiento de las diferentes formulaciones para la selección del AZP, con respecto al nudo con menor error en el NFM, ya presentado en el Capítulo 3. Esta fue la única manera que se encontró para lograr preservar la objetividad del resultado. Por otro lado, partimos de la base que:

«La presión media del sistema, a ciencia cierta, no es conocida, pues depende de muchas variables tanto hidráulicas como físicas de la red, por ende solo podremos obtener de una red una aproximación de la misma, por medio de ponderaciones de varias variables.»

Lo anterior implica que la presión media del sistema debe entenderse como un valor de presión que recoge las «características» medias del sistema, y alejándonos así de la idea de una media aritmética.

Debido a esto la presión media del sistema estuvo a cargo sólo de algunos parámetros específicos, pues es imposible obtenerla teniendo en cuenta todas las variables hidráulicas y físicas de los sistemas hidráulicos.

5.3.1. Ponderaciones para un solo parámetro (análisis de sensibilidad)

El punto que nos atañe en este momento y el más importante en la obtención del nudo AZP, es el cálculo de la presión promedio del sistema desde una perspectiva amplia, la cual hemos comentado, depende de muchos variables y factores en las redes. Sin embargo, hemos de recordar que un modelo es una representación simplificada de la realidad, por ende, las variables analizadas fueron inferidas en consonancia con las directrices generales para la selección del AZP. Para lograr introducir la sensibilidad de estos parámetros en la selección del nudo óptimo, se calculó una «presión media ponderada horaria», cuyos pesos estarán en función de la variable y el nudo. Esto se puede expresar como:

$$P_{ponderada}(t) = (W_1, W_2, \dots, W_j, \dots) \times \begin{pmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ \vdots \\ P_j(t) \end{pmatrix}$$

Donde:

$P_{ponderada}(t)$: Presión promedio ponderada horaria de la red, en la hora t ;

$P_j(t)$: Presión del nudo j en la hora t ;

W_j : Coeficiente de ponderación para el nudo j , función de la variable.

Ahora bien, cada tipo de coeficiente de ponderación se desarrolló buscando el nivel medio de cada parámetro, de los cuales tenemos los desarrollados en los siguientes apartados.

El caudal consumido y fugado

Este parámetro tiene una influencia enorme sobre las presiones en la red, el cual representa el volumen de agua demandado por las acometidas presentes en una zona específica de la red y variará de una zona a otra. Sin embargo, se tomó todo el caudal extraído de la red, puesto que el caudal fugado si bien varía por las presiones, éstas también varían con el caudal fugado y debe ser tenido en cuenta en el análisis. De nuevo esto lo podemos plasmar matemáticamente como:

$$W_{caudal,j} = \frac{Q_j}{\sum_{j=1}^n Q_j}$$

Donde:

n : número de nudos de la red

Q_j : caudal suministrado en el nudo j ($Q_{demandado} + Q_{fugado}$);

$W_{caudal,j}$: Coeficiente de ponderación, para el parámetro caudal en el nudo j

Cotas de los nudos

Este parámetro representa a la altura media de la red. De acuerdo con las recomendaciones técnicas en la selección del nudo AZP, éste se encontrará en la zona topográficamente media del sistema. Debido a que este estudio está planteado sobre un modelo matemático de red, considerado como el sistema real y adoleciendo de planos topográficos de las zonas, se asemejo éstos a las cotas de cada nudo de la red.

El coeficiente de ponderación para el parámetro de cotas, no debe ser el la media aritmética de cotas, debido a que esta función estadística es altamente sensible a extremos, «generando falsos positivos» en los resultados. Un ejemplo claro de la situación sería una red con un punto extremadamente alto, en la que el resto de los puntos estuvieran a igual cota (Figura 33).

El punto medio de una zona topográfica sí está mejor representado por la frecuencia de aparición de la altura, esto quiere decir que tal punto será el valor de cota que tenga una frecuencia del 50% en la red y para esto se utilizó el percentil 50, el cual divide la función de proporción al 50 por ciento.

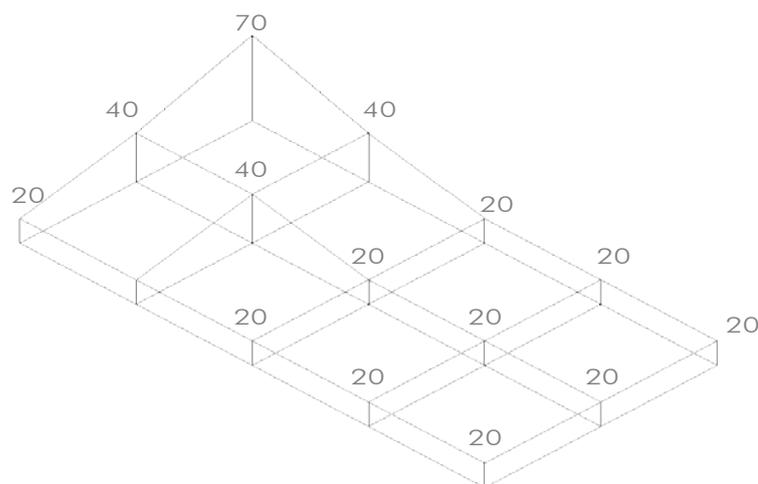


FIGURA 33.DISTRIBUCIÓN DE COTAS EN UNA RED

Cota Media

Promedio	29.17
Percentil 50	20

En este pequeño ejemplo vemos cómo el percentil demuestra realmente que el punto medio en la red está en función de las veces que encontremos un valor de cota y no es dado por un extremo inusual en la topografía (promedio).

De acuerdo a esto, el coeficiente de ponderación por el nivel de cota fue evaluado de manera matemática por:

$$Dif.Cota1_j = |Cota_j - Percentil\ 50(cotas)|$$

$$Suma = \sum_{j=1}^n Dif.Cota1_j$$

$$Dif.Cota_j = Suma - Dif.Cota1_j$$

$$W_{cota,j} = \frac{Dif.Cota_j}{\sum_{j=1}^n Dif.Cota_j}$$

Donde:

n: número de nudos de la red;

Dif.Cota1_j= diferencia entre la cota y el percentil 50 de la red, para el nudo j;

Dif.Cota_j= inversa de la diferencia entre cota y el percentil 50, para el nudo j;

W_{cota,j}=Coeficiente de ponderación, para el parámetro cota en el nudo j

Nota: se Utilizó el contrario de la diferencia entre el percentil y la cota de cada nudo para así premiar el nudo que estuviera más próximo al valor del percentil. Puesto que si se utilizara la diferencia entre la cota y el percentil se estarían premiando los nudos más alejados a éste.

Densidad de tuberías

Con este parámetro se intentó representar la sensibilidad de la presión y la selección del AZP a las pérdidas de carga de las tuberías entre un sector de la red y otro, además de la influencia de la densidad de tuberías presentes en el sector. Para crear este coeficiente de ponderación se vio imposible utilizar la variable de

pérdida de carga de las tuberías, pues es un parámetro extremadamente complejo de manejar por:

- Su valor es cambiante en espacio y tiempo, obligando a tener un sin número de cálculos para este.
- Debido a que la finalidad última de éste estudio, como la del NFM, es proveer una solución «simple» y rápida en la gestión de redes; el cálculo de la pérdida de carga de un sistema no es un parámetro evidente en redes con pocos datos y mucho menos si ésta no cuenta con un modelo matemático.

Debido a esta circunstancia se utilizó un parámetro que representa en cierta medida esta influencia, más no directamente. Se asumió un coeficiente de ponderación por nudo como la suma de las medias longitudes de las tuberías que llegan al nudo en cuestión, debido a que se parte de la idea que a un mayor número de tuberías presentes en una zona existirá una mayor pérdida de carga en ésta.

$$\partial_j = \sum_{j=1}^n \frac{L_{i,j}}{2}$$

$$L_{total} = \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{i=1}^{n_i} L_{i,j}$$

$$W_{tubería,j} = \frac{\partial_j}{L_{total}}$$

Donde:

n_j : número de nudos en la red;

n_i : número de tuberías en la red;

∂_j : Suma de las medias longitudes de tuberías i que llegan al nudo j ;

L_{total} : Longitud total de tuberías i presentes en la red;

$W_{tubería,j}$: Coeficiente de ponderación, para el parámetro de densidad de tuberías en el nudo j .

5.3.2. Ponderaciones varios parámetros (análisis de sensibilidad)

Entendemos que la selección del nudo AZP no es sólo función de una sola variable, sino del universo hidráulico presente en la red. Por ende para lograr un acercamiento más preciso a la realidad y a la selección del AZP correcto, se ponderó varios parámetros a la vez. Se buscó qué conjunto influía más en la selección de nudo óptimo, dando como resultado final una propuesta metodológica formal para el «cálculo» del AZP.

Caudales y Cotas

Este coeficiente de ponderación contiene la idea general propuesta para la selección del AZP recogiendo la influencia de las acometidas y la cota del sector. Como se verá en los resultados de los diferentes análisis, esta propuesta fue la más ajustada al nudo óptimo de las diferentes redes.

La ponderación multicriterio se puede expresar como una variante del método de sumas ponderadas:

Inicialmente se tiene,

$$\text{Coeficientes de ponderación normalizados} \left\{ \begin{array}{l} W_{caudal,j} = \frac{Q_j}{\sum_{j=1}^n Q_j} \\ W_{cota,j} = \frac{\text{Dif. Cota}_j}{\sum_{j=1}^n \text{Dif. Cota}_j} \end{array} \right.$$

Ahora bien, para lograr generar el combinatorio de las ponderaciones de criterios es necesario volver a crear coeficientes de ponderación normalizados con los anteriores criterios. Para esto se utiliza el método de las sumas ponderadas, el cual multiplica los criterios, tantos haya para cada caso.

$$C_{caudal/cota,j} = \frac{W_{caudal,j} \times W_{cota,j}}{\sum_{j=1}^n (W_{caudal,j} \times W_{cota,j})}$$

La presión promedio ponderada será:

$$P_{ponderada}(t) = (C_1 \ C_2 \ \dots \ C_n) \times \begin{pmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ \vdots \\ P_n(t) \end{pmatrix}$$

Caudales y densidad de tuberías

De igual manera se buscó una ponderación para este caso en particular donde se quería ver la influencia tanto del caudal demandado por una zona específica y la densidad de tuberías de dicha zona, pues llegado el caso, estas dos variables pueden ser yuxtapuestas. Se expresa matemáticamente como:

$$\text{Coeficientes de ponderación normalizados} \left\{ \begin{array}{l} W_{caudal,j} = \frac{Q_j}{\sum_{j=1}^n Q_j} \\ W_{tuberia,j} = \frac{\partial_i}{L_{total}} \end{array} \right.$$

Obteniéndose,

$$C_{caudal/tuberia,j} = \frac{W_{caudal,j} \times W_{tuberia,j}}{\sum_{j=1}^n (W_{caudal,j} \times W_{tuberia,j})}$$

5.3.3. Selección del nudo AZP

El nudo AZP se halló por medio de la diferencia entre la presión de cada uno con respecto a la considerada presión media de la red, evaluando esta diferencia cada hora a lo largo de un día. Este planteamiento conduce directamente al concepto de varianza, como valor el promedio de dichas diferencias. Para una población completa, en el caso de que se quisiera incluir en el análisis la totalidad de los nudos de una red, se tendrían las expresiones siguientes:

$$\delta_j(t) = P_j(t) - P_{ponderada}(t)$$

$$\sigma_j^2 = \frac{[\delta(1)]^2 + [\delta(2)]^2 + [\delta(3)]^2 + \dots + [\delta(t)]^2}{(t)}$$

Donde:

t =hora, (intervalo hidráulico)

$P_{ponderada}(t)$: Presión promedio ponderada horaria de la red, en la hora t ;

$P_j(t)$: Presión del nudo j en la hora t ;

$\delta_j(t)$: Diferencia entre la presión del nudo j y la presión ponderada para la hora t ;

σ_j^2 : Varianza de la presión del nudo;

Recordando ahora que la finalidad es encontrar la desviación promedio del nodo para el período elegido en el estudio, se calcula la desviación estándar, la cual nos permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central. De nuevo, su expresión para el conjunto de la población (totalidad de los nudos) es:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \delta(t)^2}{t}}$$

Sin embargo tomando un caso más desfavorable en el que sólo se tenga disponibilidad de datos de una parte de los nudos de la red, una muestra, se deben utilizar entonces los parámetros muestrales:

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum \delta(t)^2}{t - 1}}$$

Una vez se calculen todas las desviaciones estándar de los nudos, se procederá a encontrar el nudo AZP óptimo, el cual correspondería al nudo (representante del sector) que tuviera una diferencia menor entre sus presión y la presión media, hora a hora. El planteamiento sería el siguiente:

$$AZP_{\text{óptimo}} = f_{\text{mínimo}}(S_1, S_2, S_3, \dots S_j)$$

5.3.4. Desarrollo de las simulaciones

En esta parte del estudio, de nuevo se utilizó la plataforma de MathLab, para programar el módulo de *Toolkit* de Epanet, pues nos permite obtener los diferentes valores de presiones, caudales, y variables de la red, para todos los nudos y en todos los tiempos de simulación. Además, la obtención de la presión media del sistema para cada parámetro exige un gasto de cálculo considerable que gracias al sistema matricial de MathLab fue rápidamente procesados.

El módulo del simulador está formado por 7 bloques bien diferenciados; el primero de ellos se encarga de obtener los valores de presiones y caudales en las diferentes horas de la simulación, por otro lado también recoge los valores físicos de la red (cotas y longitudes de tuberías). Los siguientes cinco bloques están diseñados para obtener los nudos AZP de acuerdo a los diferentes parámetros considerados para definir la presión media y el último de ellos, se encarga de exportar e imprimir en la pantalla los resultados de los cálculos. La Figura 35 presenta la estructura del módulo.

Los datos obtenidos y exportados son:

- Presiones ponderadas para cada tipo de parámetro, o conjunto de ellos, en cada instante de tiempo durante el período de simulación seleccionado.
- Coeficientes de ponderación para cada nudo y cada tipo de parámetro, o conjunto de ellos.
- Desviación estándar de cada nudo.

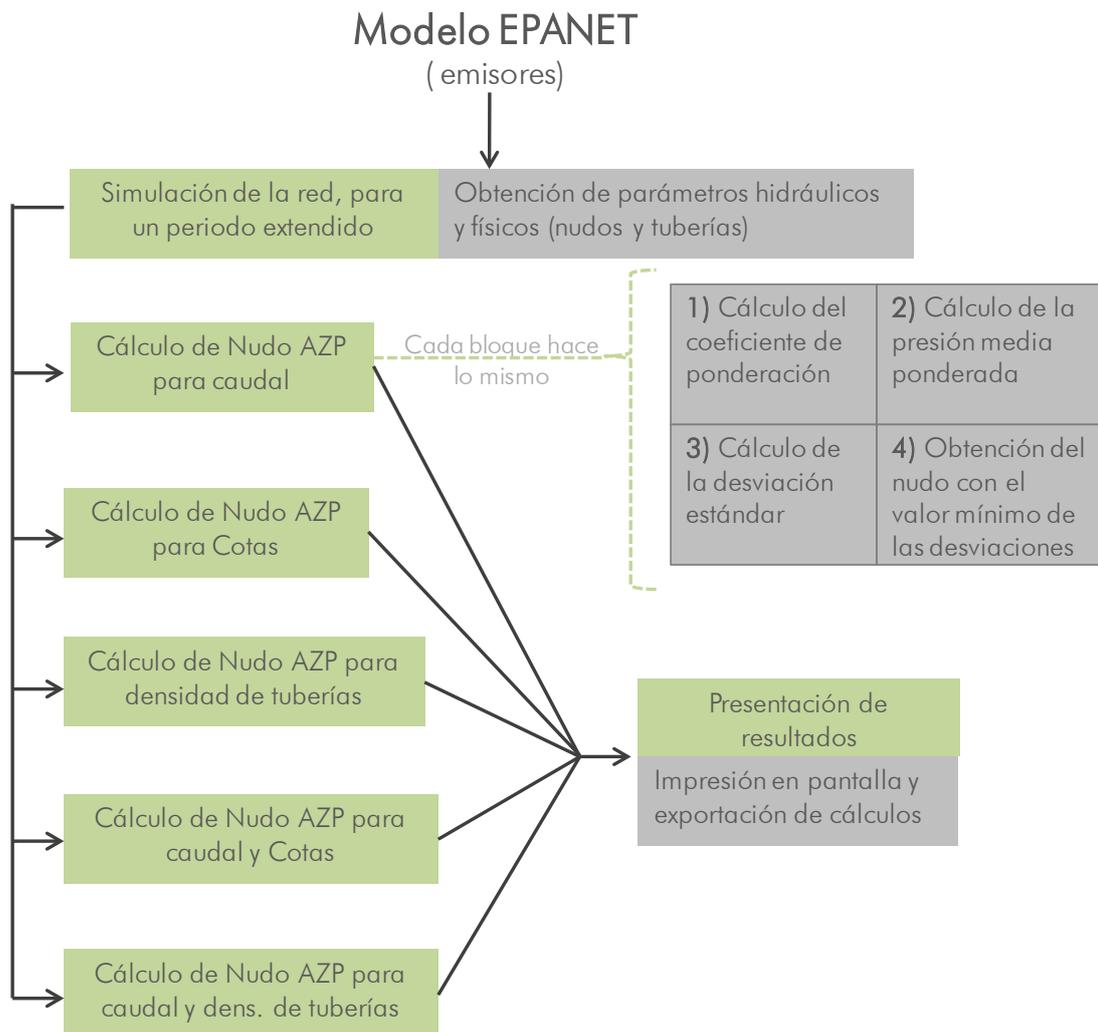


FIGURA 34. ESQUEMA DEL MÓDULO PROGRAMADO, PARA LA EVALUACIÓN DEL AZP

Todos estos datos fueron almacenados para cada red con el fin de analizarlos más profundamente en fases siguientes de la investigación, mientras que los datos presentados en pantalla se limitaron al ID del nudo AZP para cada parámetro y su desviación estándar. La Figura 36 muestra el modo de presentación de resultados.

```

-----
El nodo AZP, para criterio de caudales es (indice) 57
El nodo AZP, para ponderacion de caudales su ID es 199
La desviacion estandar del AZP, para ponderacion de caudales es 0.4959851
-----
La presion promedio ponderada para la variable cotas se ha calculado
El nodo AZP, para criterio de caudales es (indice) 88
El nodo AZP, para ponderacion de caudales su ID es 267
-----
El nodo AZP, para criterio de cotas y caudales es (indice) 57
El nodo AZP, para criterio de cotas y caudales su ID es 199
La desviacion estandar del AZP, para ponderacion de caudales y cotas es 0.4873002
-----
El nodo AZP, para criterio de densidad de tuberias es (indice) 88
El nodo AZP, para criterio de densidad de tuberias su ID es 267
La desviacion estandar del AZP, para densidad de tuberias es 0.6302644
-----
El nodo AZP, para criterio de densidad de tuberias y caudal es (indice) 84
El nodo AZP, para criterio de densidad de tuberias y caudal su ID es 259
La desviacion estandar del AZP, para densidad de tuberias y caudal es 0.4392709
-----

```

FIGURA 35. PRESENTACIÓN EN PANTALLA DE LOS RESULTADOS

5.4. Resultados de los análisis para diferentes redes

Estos diversos métodos fueron aplicados a todos los modelos analizados, con la finalidad de observar el ajuste que tienen estas propuestas. A continuación se presentará el método de calificación del ajuste de cada parámetro en las redes.

Para lograr tener una visión general del comportamiento y efectividad de las formulaciones presentadas, se calculó cuán cerca está el nudo predicho por la formulación con el nudo AZP óptimo obtenido en el análisis de errores del Capítulo 3. Esta calificación se dio por medio de un porcentaje, lo cual quiere decir que el nudo predicho está a una distancia, en un orden de menor a mayor, más cerca del nudo óptimo, de acuerdo al nivel de error en la red. Un ejemplo claro de esto se observa en el caso 3, el cual es una red compuesta por 16 nudos y en la que organizando los errores en orden de menor a mayor, se llega a la distribución mostrada por la Tabla 25. En esta tabla se puede apreciar que el AZP para el parámetro de densidad de tuberías tiene por encima el 31% de los nudos con menor valor de error. Si por el contrario se observa el nudo AZP para el parámetro

de caudal, tiene por encima 0% valores, puesto que no existe un nudo con menor valor.

TABLA 24. CALIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES MÉTODOS PARA CONSEGUIR EL AZP EN UN RED TIPO

Error Nudo	ID	Error	Orden	Distancia	Caudal	Nivel de terreno	Densidad tuberías	Caudal y Cota	Caudal y Dens. Tuberías
-0.70	8	0.70	1	6%	x	x		x	
0.87	12	0.87	2	13%					
1.50	3	1.50	3	19%					x
2.40	11	2.40	4	25%					
-2.90	13	2.90	5	31%			x		
3.89	6	3.89	6	38%					
4.15	7	4.15	7	44%					
5.67	2	5.67	8	50%					
-7.91	16	7.91	9	56%					
-8.25	15	8.25	10	63%					
12.05	10	12.05	11	69%					
-16.71	14	16.71	12	75%					
17.43	5	17.43	13	81%					
-20.37	4	20.37	14	88%					
-20.55	9	20.55	15	94%					
24.23	17	24.23	16	100%					

La Tabla 26 presenta los cálculos para las redes presentadas en el Capítulo 3.

TABLA 25. CALCULO DEL NUDO AZP PARA LAS REDES PRESENTADAS EN EL CAPÍTULO 3

Red	Caudal	Nivel de terreno	Densidad tuberías	Caudal y Cota	Caudal y Dens. Tuberías
Caso 1	0%	0%	75%	0%	0%
Caso 3	0%	0%	19%	0%	31%
Caso 2	0%	30%	0%	30%	0%
Caso 4	38%	63%	19%	38%	31%
Caso 5	4%	14%	14%	4%	39%

Parámetro de Caudal extraído

En términos generales (Figura 36), se puede observar que el parámetro más importante y que mayor influencia tiene en la selección del AZP es el caudal

extraído en el nudo, pues representa por una lado la variación tanto de la densidad de acometidas, como el nivel de fugas presente en el sector.

Cabe sentar la observación del caso 2, el cual representa la variación del caudal influenciada por la estación de bombeo.

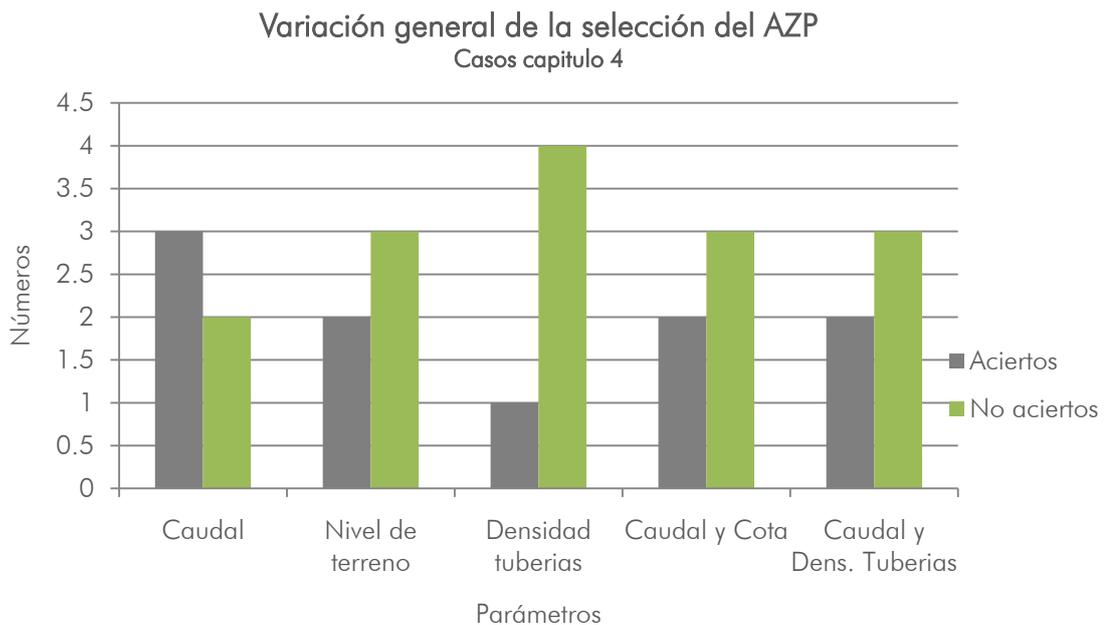


FIGURA 36. VARIACIÓN GENERAL DE LOS DIFERENTES MÉTODOS PARA LA SELECCIÓN DEL AZP

Densidad de tuberías

Es de evidenciar que la densidad de tuberías no es un parámetro de gran influencia en la selección. Esto puede ser debido a que el número de tuberías no representa directamente la pérdida de carga que influencia la presión un nudo dado. Como se ve en el caso 3, donde la variación del error está dada por la influencia sustancial de las pérdidas de carga del sistema. Sin embargo esto no se ve en la ponderación de tuberías (densidad de tubería por zonas), pues los nudos con mayor densidad de tuberías están presentes en el centro de la red, mas los

nudos que tienen mayor influencia por pérdidas de carga son los ubicados en los extremos de ésta (Figura 38).

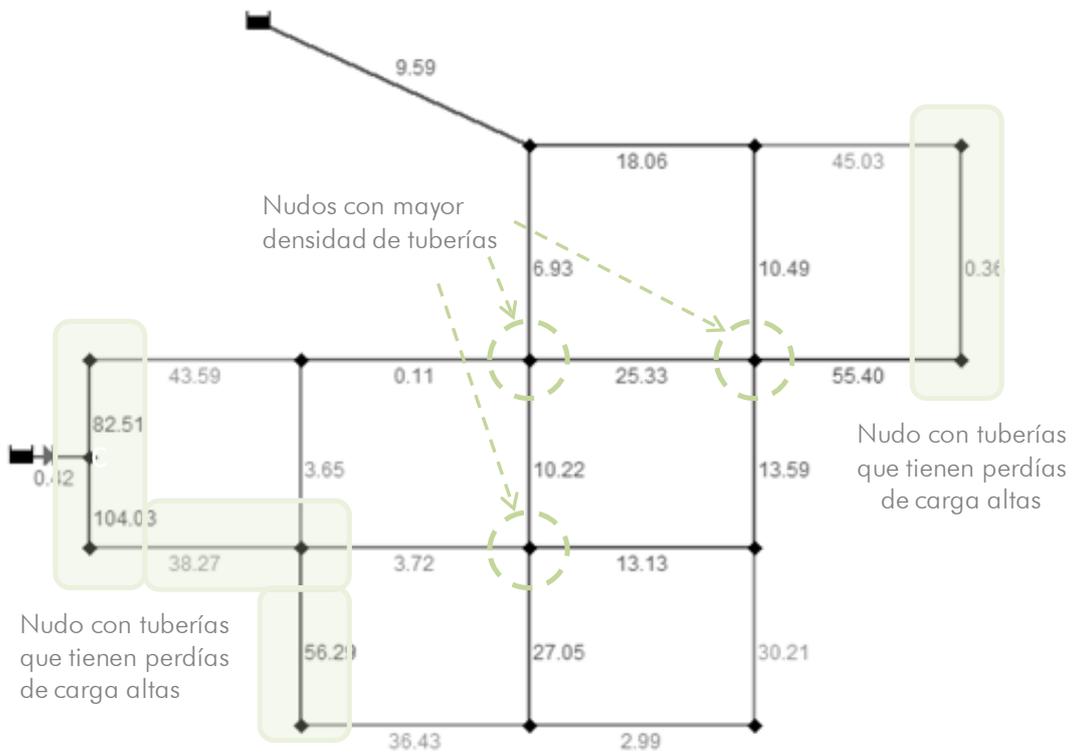


FIGURA 37. VARIACIÓN ESPACIAL DE LA PERDIDA DE CARGA Y LA DENSIDAD DE TUBERÍAS PARA EL CASO 3

Parámetro cotas

Con referencia al parámetro de cotas, éste respondió adecuadamente en las diversas redes con una aproximación de aciertos del 60%. Sin embargo, es interesante observar que este parámetro falla considerablemente cuando tenemos una red cuyas variaciones de cota son extremas como el caso 4, (Figura 38), donde se tenían dos redes con una diferencia de cotas de 35 m, sin embargo la presión no tenía esta diferencia gracias a la válvula de regulación.

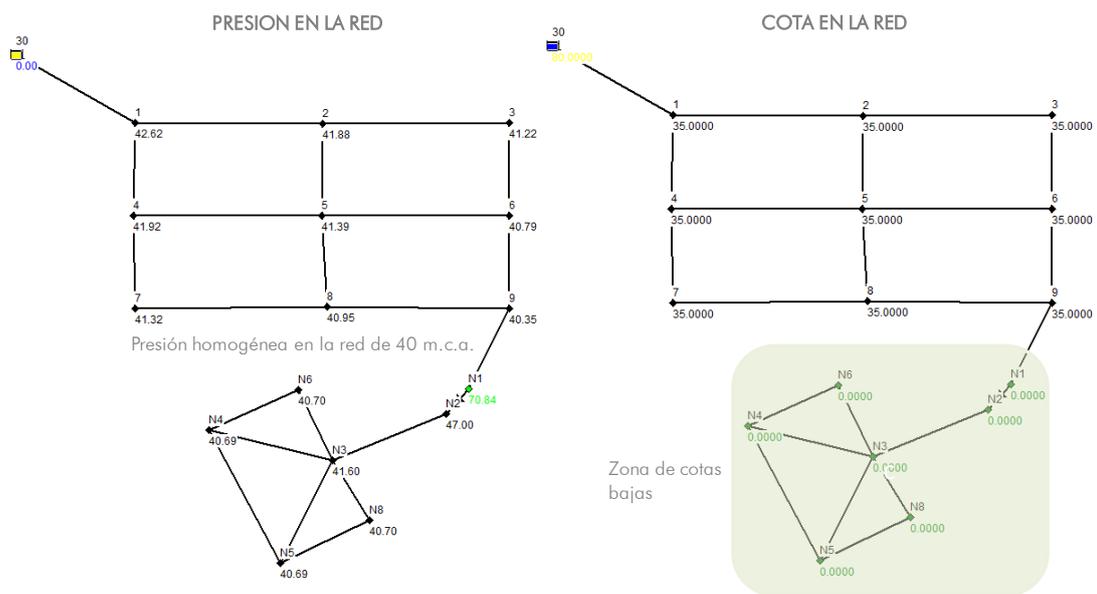


FIGURA 38. VARIACIÓN DE PRESIÓN Y COTAS DEL CASO 4

Este tipo de error es lo que se conoce como un falso positivo en los análisis, puesto que el modelo fue engañado por un parámetro el cual no podía influir pues había sido «regulado» en el sistema. Esto muestra claramente que el utilizar la altura topográfica de un red, cuando el sistema tienes desniveles geométricos sustanciales y ésta a su vez ha sido regulada, generará un error en la selección del AZP extremadamente alto (>60%).

Parámetro caudal/cota y caudal/densidad tuberías

Los otros dos análisis los cuales eran compuestos por el peso de caudal y cotas, y el caudal y densidad de acometidas tienen el mismo número de aciertos, sin embargo evaluando más profundamente los valores de la ponderación de caudal y cotas tuvo un nivel de error (porcentaje) más bajo que el otro sistema, pues las cotas y el caudal en sí son parámetros bastantes influyentes en la redes.

Igualmente el error en el caso cuatro, por la ponderación de caudal/cota tuvo el mismo comportamiento de falso positivo pues de nuevo era influenciado por la cota. En general se puede decir que este parámetro es una buena herramienta para la selección del AZP, sin olvidar que es posible fallar sustancialmente para casos con regulaciones fuertes.

5.5. Alternativas de mejora en la selección del nudo AZP

Las mejoras en esta parte del método del AZP son necesarias y urgentes, sin embargo los análisis presentados todavía discrepan de los valores objetivos buscados en esta investigación. Con todo, constituyen una muy buena mirada en el comportamiento y selección del AZP.

Por otro lado y no menor en conclusión, las metodologías propuestas por otros autores (Thornton, McKenzie, IWA, etc.) se muestran pobres y poco eficientes en la selección del nudo AZP como se ha demostrado en estos primeros análisis. Si bien han sido las bases durante muchos años, es necesario ahondar más técnicamente en la selección del nudo óptimo y en cómo éste debe relacionar la variación de la presión en la red.

Finalmente, estos estudios arrojan que el caudal demandado por un sector (en este caso un nudo del modelo matemático) es el principal factor dominante en la selección del nudo AZP, por lo cual debe estar presente en cualquier formulación matemática formal en este campo.

6. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Uno de los temas más actuales en hidráulica urbana es la gestión de fugas. Dentro de la misma hay que reconocer que mientras la gran parte de sus metodologías están bien fundamentadas, no ocurre lo mismo con el cálculo del volumen fugado por medio del NFM. Agravando esta circunstancia, se encuentra el hecho de que este método está entre los más utilizados por los abastecimientos a nivel mundial por su sencillez, y sin embargo, no se tiene un conocimiento de los errores que comete y mucho menos del rango de los mismos.

En líneas generales, esta investigación buscó presentar una primera aproximación, formal y sistemática, del comportamiento del NFM, además de plantear una serie de mejoras para el mismo evaluando los márgenes de error inherentes a su proceso de cálculo (Capítulo 3); enriqueciéndolo con escenarios tipo (errores iniciales - Capítulo 4) y mejorando los parámetros que utiliza (cálculo del AZP - Capítulo 5).

Todos estos análisis dejan de manifiesto que, con indiferencia de cuán optimizada esté la formulación del método, conviene que su aplicación vaya precedida de un análisis del sistema, pues ello asegurará un error menor al que se tendría sin dicho análisis.

Finalmente, esta investigación muestra su mayor preocupación por dos puntos clave del NFM: la selección del AZP y la estimación del caudal consumido en la hora tomada como referencia (de mínimo nocturno). Por una parte, el estado de la

cuestión en la selección del AZP son casi en su totalidad empíricos y poco contrastados; y por la otra, el «estado del arte» en la estimación del caudal consumido es antiguo (creado para una época y un espacio específico), empírico y poco funcional para realidades disímiles a las que se tomaron como referencia para su creación. Tal cual se ha presentado, el no prestar atención a estos dos puntos en la aplicación del NFM puede dar lugar a que los errores puedan alcanzar valores inadmisibles.

Con este breve resumen y dando respuesta a los objetivos propuestos en esta investigación, se concluye:

- El NFM será afinado en cálculos, en tanto la red tenga un comportamiento homogéneo de presiones y la variación de éstas en el tiempo no sea extremadamente marcada. De lo contrario, podría incurrir el método en errores del volumen diario de un 15-40%, dependiendo de la complejidad y heterogeneidad de la red.
- Conocer el comportamiento de la red, de acuerdo a qué variable es más influyente en las presiones, da indicios de los posibles errores y su magnitud que el NFM podrá cometer. Tal es el caso de redes con instalaciones de bombeo, en las que se pueden llegar a encontrar en algunos nudos, cercanos al mismo, de más del 10% del volumen diario.
- Debido a las características del NFM, la utilización de éste en sectores donde existan zonas con sistemas de control de presión puede suponer e implicar el aumento de los errores del método, pues la red tendrá (n) comportamientos distintos, cuantas (n) regulaciones diferentes existan.
- Cuando se aplica el NFM en sectores cuya complejidad y tamaño sean considerables, el error del método será mayor. Tomamos el caso 5, en el que encontramos que el 60% de los posibles nudos AZP generarán errores mínimos del 4% en el volumen diario de fugas, siendo éste en una red que se supone bien controlada.

- Los errores del NFM son mayores cuando por las redes circulan sus Caudales máximos. Esto es directamente debido a que las pérdidas en cada tubería aumentan con el cuadrado del caudal.
- El error transmitido por el caudal demandado en la hora de aplicación del NFM, puede llegar a ser bastante grande, incluso mayor que el del propio método. Por ende, esta estimación de caudales en la hora del mínimo nocturno debe ser extremadamente minuciosa.
- La selección del AZP es uno de los aspectos principales del NFM, sin embargo no existen hasta el momento formulaciones totalmente efectivas que logren encontrarlo de forma rápida.
- El AZP depende casi en exclusiva de cuál sea la considerada como presión media del sistema, puesto que esta no es la media aritmética de presiones del sistema, sino que depende del «peso» de (n) variables de los nudos.
- El NFM puede ser aplicado con mayores garantías en sectores pequeños y simples hidráulicamente, pues los errores que éste cometa no serán grandes. Sin embargo, en sectores grandes y con hidráulicas complejas es necesario hacer un análisis profundo del comportamiento del método, para lograr reducir, o al menos acotar, los posibles errores.

A partir de lo expuesto en esta tesina, se propone el seguimiento del tema con las siguientes líneas de investigación:

- Estandarización del método de los caudales mínimos nocturnos, para todo tipo de red, cuya finalidad sea la creación de un protocolo de aplicación de este asegurando un mínimo de error.
- Refinamiento del proceso de selección del AZP, buscando la obtención del nudo óptimo.

- Creación de análisis complementarios del NFM, para redes complejas intuyendo que éstos tengan como mínimo un modelo matemático de la red.
- Análisis de NFM en programas de control de presión (PRESMAC), para lograr la optimización de resultados de esta rutina.

BIBLIOGRAFÍA

ALMANDOZ, J., CEBRERA, E., ARREGUI, F., CABRERA Jr. E., COBACHO R. Leakage assessment through water networks simulation. En Journal of Water Resources Planning and Management. ASCE. (Nov-Dic. 2005). pp 458-466.

ARREGUI, P. Investigador ITA-UPV. Comunicación personal. Valencia 1 marzo de 2010.

ARREGUI, P., CABRERA, E., COBACHO, R. Gestión integral de contadores de agua. 1 edición. España: IWA publishing, 2007. 340p.

ASCE (2010). Report card for American Infrastructure. Recuperado Mayo de 2011 en <http://www.asce.org/reportcard>.

BENAVIDES, H. Auditoria de redes de distribución de agua. Metodologías existentes. Dificultades de aplicación y alternativas para soslayarlas en el Ecuador. Valencia, 2010, 128p. Tesina Master. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente.

BENAVIDES, H. Diagnostico de la sostenibilidad de un abastecimiento de agua e identificación de las propuestas que la mejoren. Valencia, 2010, 384p. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente.

CABRERA , E., ALMANDOZ, J. Actuaciones orientadas a disminuir las pérdidas de agua. En: Evaluación y control de pérdidas de agua en redes urbanas (monografía) 4 edición. Valencia: ITA, 2004.

CYTED. Agua y ciudad en Iberoamérica, una valoración. En Red temática para el fomento de la gestión sostenible del agua en la ciudad. (Mayo de 2007). Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo.

RODRIGUEZ, D. (2010). ANNUAL REPORT, Driving Change in Water. The World Bank Group. Washington D.C.

FANTOZZI, M., LAMBERT, A. Legitimate Night Use component of Minimum Night Flows Initiative. En: WATER LOSS 2010. (Junio 06-09 de 2010: Sao Paulo). Memorias del congreso. Sao Paulo, Brasil.

GARCIA V., CABRERA E., CABRERA E. Jr. The Minimum Night Flow Method Revisited. En Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. (8º:agosto 27-30 de 2006: Cincinnati). Memorias del congreso. Cincinnati, Ohio, USA. B(1).

GARZON, F., THORNTON, J. Influencia de la presión en las pérdidas de agua en sistemas de distribución. En XXX CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL. (30º: Noviembre 20-30 de 2006: Punta del Este). Memorias del congreso. Punta del Este, Uruguay.

LAMBERT, A. Accounting for losses: the burst and background concept (BABE). En: IWEM Journal. (Abril. 1994). pp 205-14.

LAMBERT, A. Water losses management and techniques. 1 edition. Londres: Water Supply, IWA Publishing, 2002. Vol 2 No 4 pp 1–20. Londres.

MAY, J. Pressure dependent leakage. World Water and Environmental Engineering, Octubre, 1994.

MCKENZIE, R. PRESMAC (Pressure Management Program). User Guide. Water Research Commission, Pretoria, South Africa, 2001. Recuperado el 15 de septiembre de 2010 en:

<<http://www.wrc.org.za/Pages/DisplayItem.aspx?ItemID=3553&FromURL=%2FPages%2FAIKH.aspx%3Fz>>

MORRISON, J. Managing leakage by District Metered Areas: a practical approach. En: Water21 by the IWA Water Loss Task Force. (Febrero de 2004). pp 44-46.

OMS. (2010). Progresos en material del saneamiento y agua, informe de actualización 2010. Organización Mundial de la Salud y UNICEF. Ginebra, Suiza.

PAES, R. FERREIRA, F. MOLINAS, J.R. SAAVEDRA, J. Midiendo la desigualdad de oportunidades en América Latina y el Caribe. The World Bank Group. Washington D.C.

PARDO, M. Influencia de los costes del agua y la energía en la renovación de tuberías. Valencia, 2010, 331p. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente.

PILCHER, R., HAMILTON, S., CHAPMAN, H., FIELD, D., RISTOVSKI, B., STAPELY, S. Leak location and Repair. Guidance Notes. IWA, International Water Association-Specialist Group Efficient Operation and Management. Londres, 2007.

PUUST, R., KAPELAN, Z., SAVIC, D. A., KOPPE, T. A review of methods for leakage management in pipe networks. Urban Water Journal. No 7. (24 febrero. 2010). pp 25-45.

ROSSMAN, L. A. EPANET 2 Users Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA. Recuperado el 15 de septiembre de 2010 en: <<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>>

THORNTON, J. Water Loss Control Manual. Segunda edición. Estados Unidos: McGraw Hill, 2008. 650p.

UK water Industry. Report E: Interpreting Measured Night Flows. Londres, Reino Unido, (1994e). UK Water Industry. Engineering and Operations Committee.

UK water Industry. Report F: Using Night Flows Data. Londres, Reino Unido, (1994f). UK Water Industry. Engineering and Operations Committee.

UK water Industry. Report G: Managing Water Pressure. Londres, Reino Unido, (1994g). UK Water Industry. Engineering and Operations Committee.

VEIGA, Camilo. Nuevas tecnologías en la gestión del agua. Uso del contador electrónico. En: CONAMA 8. (2008: Álava). Memorias del congreso. Álava, España.

VEIGA, C. Nuevas tecnologías en la gestión del agua. Uso del contador electrónico. En: CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE, CONAMA08. (Nov 27-dic 1 de 2006: Madrid). Memorias del congreso. Madrid, España.

Water Use Facts: Consumptive Use. Southern Nevada Water Authority. Recuperado el 15 noviembre de 2010 en: <
http://www.snwa.com/html/cons_waterfacts_consumptive.html >

ANEXO 1, CASOS 3, 4, 5

Caso 3

A continuación se encuentran los datos básicos de la red (Figura 1) cuyas propiedades se presentan en la Tabla 1 y Tabla 2.

En el ejemplo se han adoptado las siguientes hipótesis:

- $N1=1$
- Todos los nudos son residenciales y tienen la misma curva de modulación horaria (Figura 2).
- El coeficiente de rugosidad de todas las tuberías es el mismo 0.05 mm.

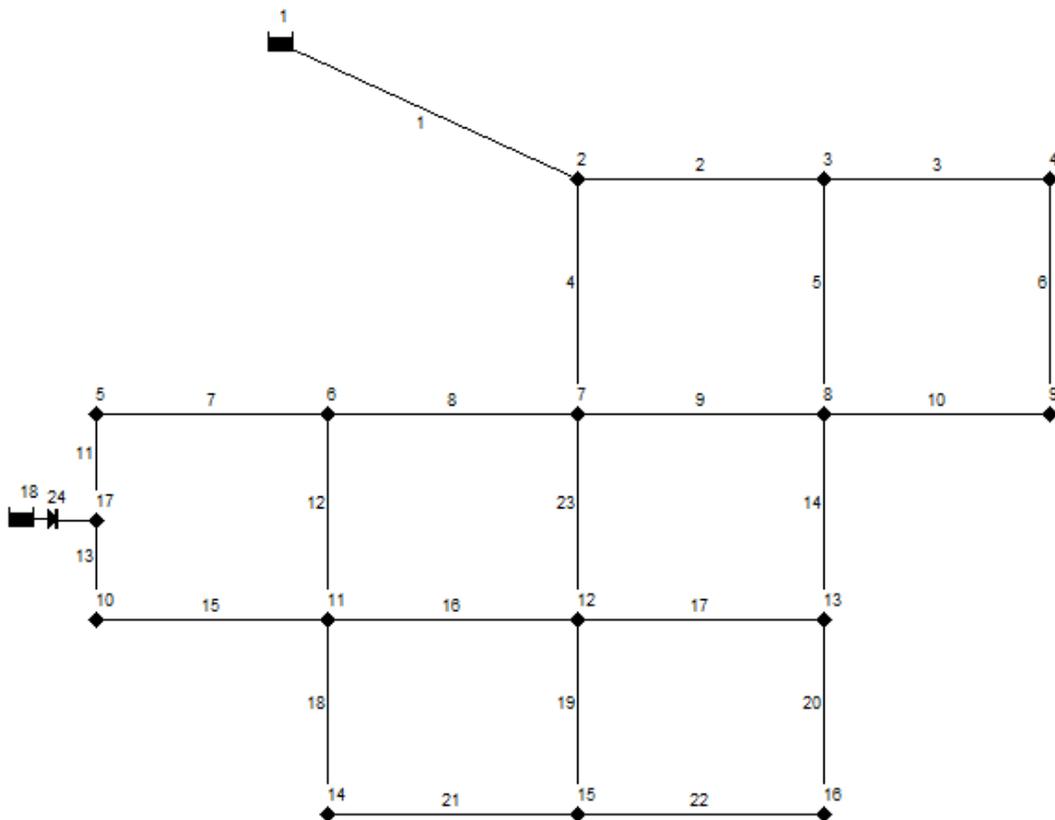


FIGURA 39. TOPOLOGÍA DE LA RED, CASO 3

TABLA 26. PROPIEDADES DE LOS NUDOS, (CASO 3)

Nudo	Cota [m]	Demanda [l/s]	C_i [lps/m ^{1.0}]
2	8	5	0.262
3	8	4	0.058
4	3	15	0.069
5	7	5	0.033
6	7	10	0.065
7	8	4	0.065
8	5	3	0.058
9	3	10	0.062
10	2	9	0.033
11	5	7	0.100
12	6	10	0.092
13	5	5	0.042
14	2	8	0.038
15	4	3	0.046
16	4	2	0.019
17	4	4.4	0.019

TABLA 27. PROPIEDADES DE LA TUBERÍAS, (CASO 3)

Tuberías	Nudo inicial	Nudo final	Longitud [m]	Diámetro [mm]
1	1	2	1500	250
2	2	3	200	150
3	3	4	400	100
4	2	7	200	200
5	3	8	150	100
6	4	9	500	80
7	5	6	300	100
8	6	7	250	150
9	7	8	150	100
10	8	9	300	80
12	6	11	300	80
14	8	13	150	80
15	10	11	300	100
16	11	12	400	80
17	12	13	250	80
18	11	14	300	60
19	12	15	300	80
20	13	16	150	60
21	14	15	200	60
22	15	16	100	60
23	7	12	250	150
11	5	17	125	100
13	17	10	125	100
24	18	17	0.1	400

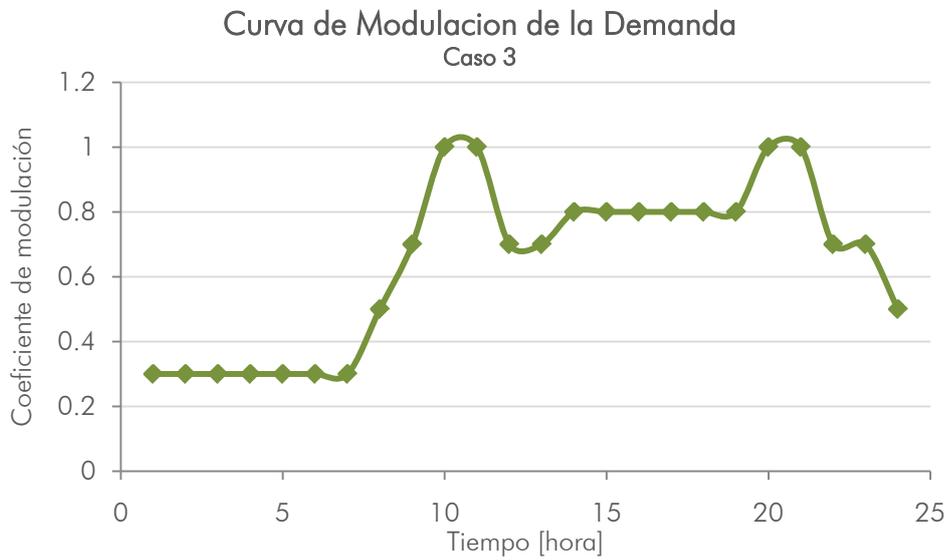


FIGURA 40. CURVA DE MODULACIÓN DE LAS DEMANDAS, (CASO 3)

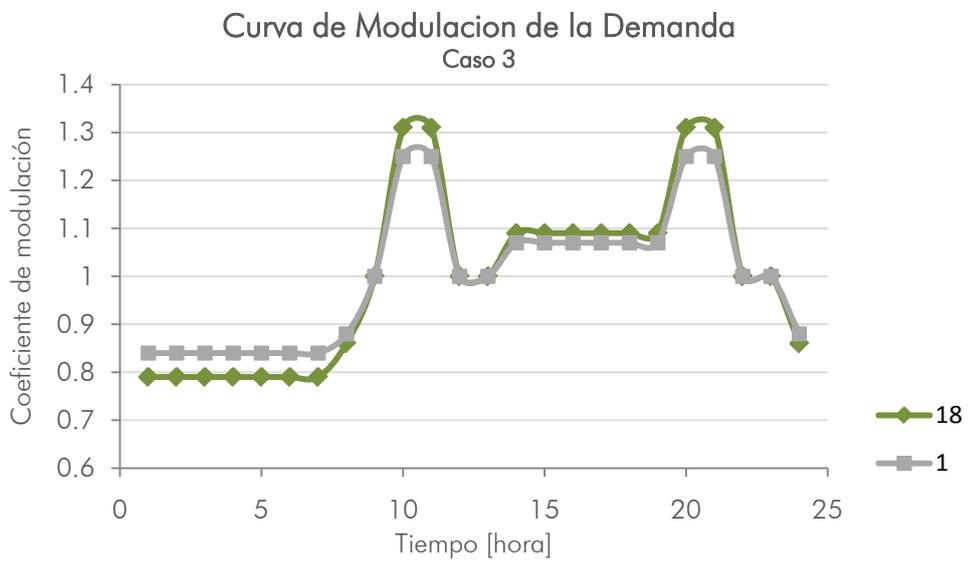


FIGURA 41. CURVA DE MODULACIÓN DE LOS EMBALSES, (CASO 3)

TABLA 28. PROPIEDADES DE LOS NUDOS, (CASO 4)

Nudo	Cota [m]	Demanda [l/s]	C_i [lps/m ^{1.0}]
1	35	7.50	0.174
2	35	7.50	0.065
3	35	7.50	0.044
4	35	7.50	0.065
5	35	7.50	0.087
6	35	7.50	0.065
7	35	7.50	0.044
8	35	7.50	0.065
9	35	7.50	0.065
N1	0	0.00	0.022
N2	0	0.00	0.030
N3	0	7.50	0.152
N4	0	7.50	0.091
N5	0	7.50	0.091
N6	0	7.50	0.061
N8	0	7.50	0.061

TABLA 29. PROPIEDADES DE LA TUBERÍAS, (CASO 4)

Tuberías	Nudo inicial	Nudo final	Longitud [m]	Diámetro [mm]
12	1	2	500	300
23	2	3	500	250
45	4	5	500	200
56	5	6	500	150
78	7	8	500	250
89	8	9	500	250
14	1	4	500	300
47	4	7	500	250
25	2	5	500	200
58	5	8	500	200
36	3	6	500	250
69	6	9	500	250
99	30	1	1500	400
T1	9	N1	500	200
T2	N2	N3	700	200
T3	N3	N4	700	150
T4	N4	N5	700	150
T5	N5	N3	700	150
2	N3	N6	700	150
3	N6	N4	700	150
4	N8	N3	700	150
5	N5	N8	700	150

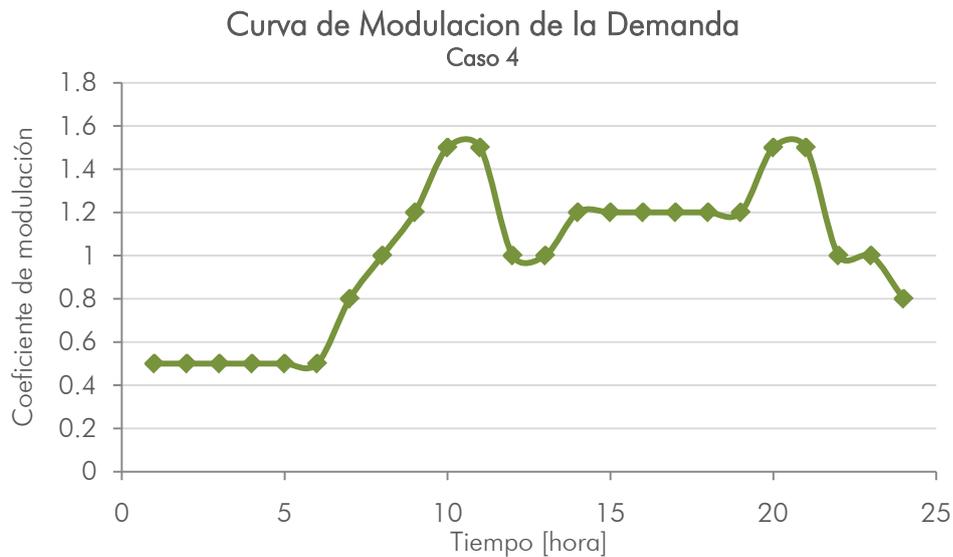


FIGURA 43. CURVA DE MODULACIÓN DE LAS DEMANDAS, (CASO 4)

Caso 5

A continuación se encuentran los datos básicos de la red (Figura 4)

- N1=1
- Los nudos responden de acuerdo a 5 tipos de modulación (Figura 5).
- El coeficiente de rugosidad de todas las tuberías es el mismo 0.1 mm.
- Válvula PRV entre el nudo N1 y N2 con diámetro de 250 mm. En el caso 4b, esta es tarada a 47 m.c.a.
- Tres depósitos de cola con las siguientes características:

Deposito	Nivel inicial	Nivel mínimo	Nivel máximo	Diámetro	Volumen mínimo
1	4.00	0.00	10.00	26.00	0.00
2	4.00	2.00	12.00	15.00	353.43
3	4.00	1.00	11.00	50.00	1963.50

- Cuenta con dos inyecciones de caudal, una con solo bombeo y la otra con bombeo y *by pass*, las cuales prenden y apagan según los niveles de los tanques. Los controles de las bombas son:

RULE 1
IF SYSTEM CLOCKTIME < 9 AM
AND TANK 3 LEVEL BELOW 10.0
THEN PUMP 335 STATUS IS OPEN

RULE 2
IF TANK 1 LEVEL BELOW 4.0
OR TANK 3 LEVEL BELOW 5.0
THEN PUMP 10 STATUS IS OPEN

RULE 3
IF TANK 1 LEVEL ABOVE 7.5
OR TANK 3 LEVEL ABOVE 10.0
THEN PUMP 10 STATUS IS CLOSED

RULE 4
IF PUMP 335 STATUS IS CLOSED
AND TANK 3 LEVEL BELOW 5.5
THEN PIPE 330 STATUS IS OPEN

RULE 5
IF TANK 3 LEVEL ABOVE 6.5
THEN PIPE 330 STATUS IS CLOSED

- La distribución de nudos en la red por curva de modulación es:

Modulación	Número Nudos
1	88
2	1
3	1
4	1
5	1

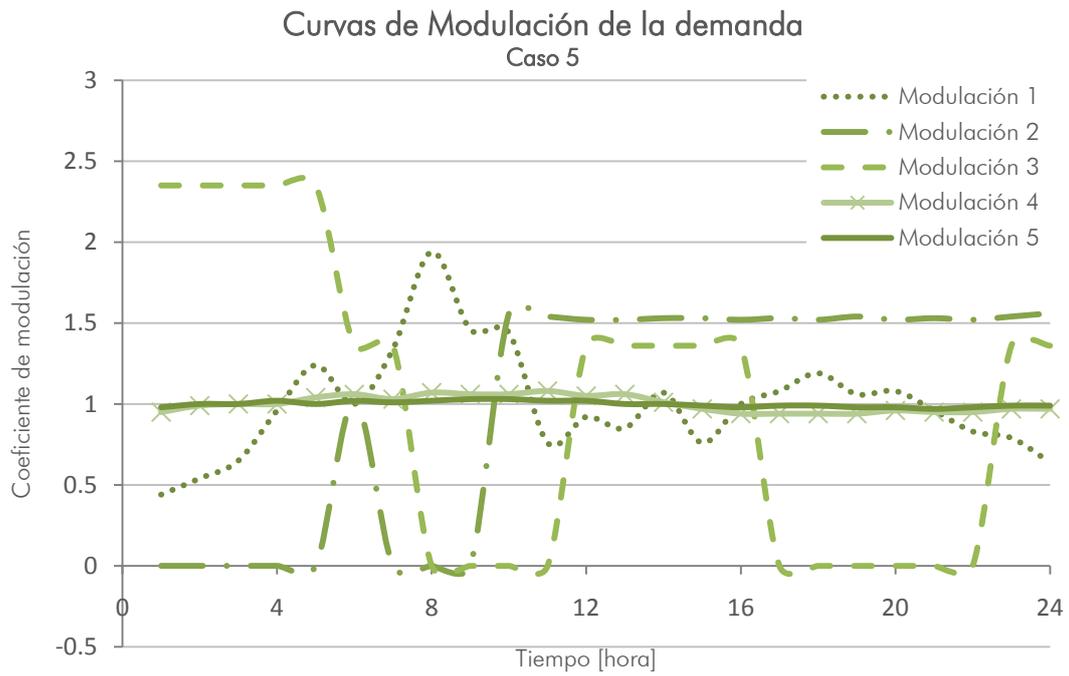


FIGURA 44. CURVAS DE MODULACIÓN DE LAS DEMANDAS, (CASO 5)

ANEXO 2, CASO REAL Y VARIACIONES

Caso real

Debido a protección de datos, no se presentarán detallados de este sistema ni a que abastecimiento pertenece; se presentara un compilado de las características del sector hidrométrico, el cual hace parte de un abastecimiento de Andalucía (Figura 7). Está compuesto por dos mallas una de ellas es aproximadamente el 70% del sector.

Características generales:

- N1=1
- Todos los nudos son residenciales y tienen la misma curva de modulación horaria (Figura 8).
- El coeficiente de rugosidad varía con respecto al tipo de material de tubería y correcciones de este por edad (0.025-0.1).
- Contiene 258 nudos, de los cuales 133 son de demanda.
 - Consumo residencial 19.42 m³/mes
 - Consumo Comercial 30.43 m³/mes
- Contiene 241 válvulas de corte (TCV)
- El inventariado de tuberías del sector tiene la siguiente distribución:

TABLA 30. INVENTARIADO DE TUBERÍAS, CASO REAL

Diámetro (mm)	Numero de tuberías	Longitud acumulada (m)
21	1	10.6
36.2	2	3.8
80	75	3235.6
100	69	2832.7
125	4	93.6
150	74	2725.2
200	2	2
250	2	2.5
500	1	0.5
1000	5	432.7
TOTAL	235	9339.1

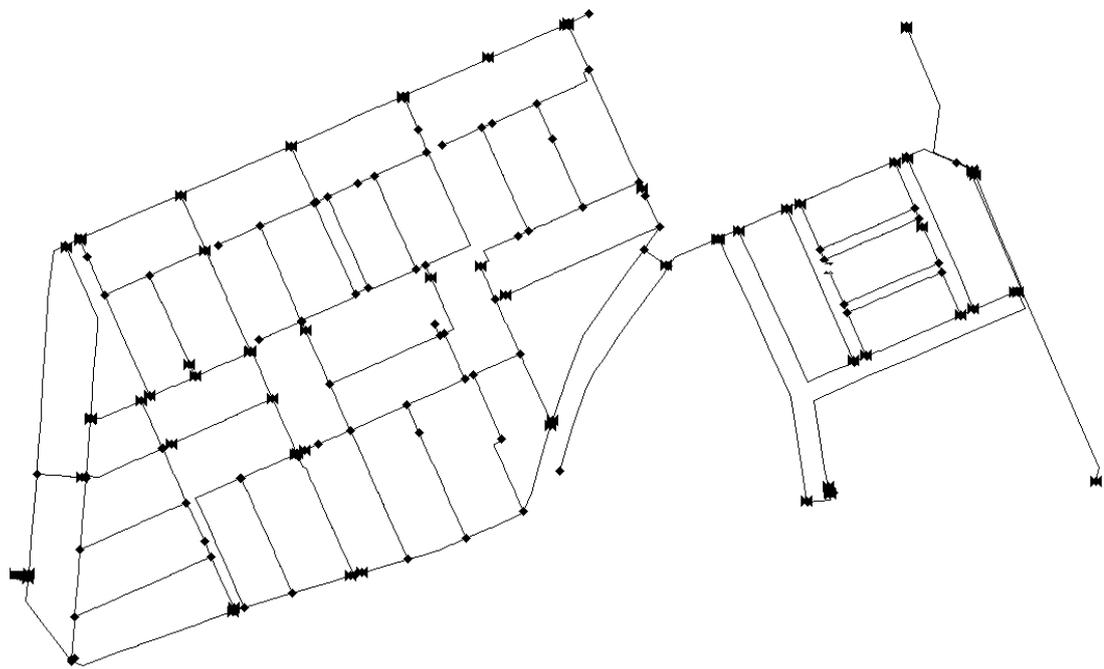


FIGURA 45. TOPOLOGÍA DE LA RED, CASO REAL

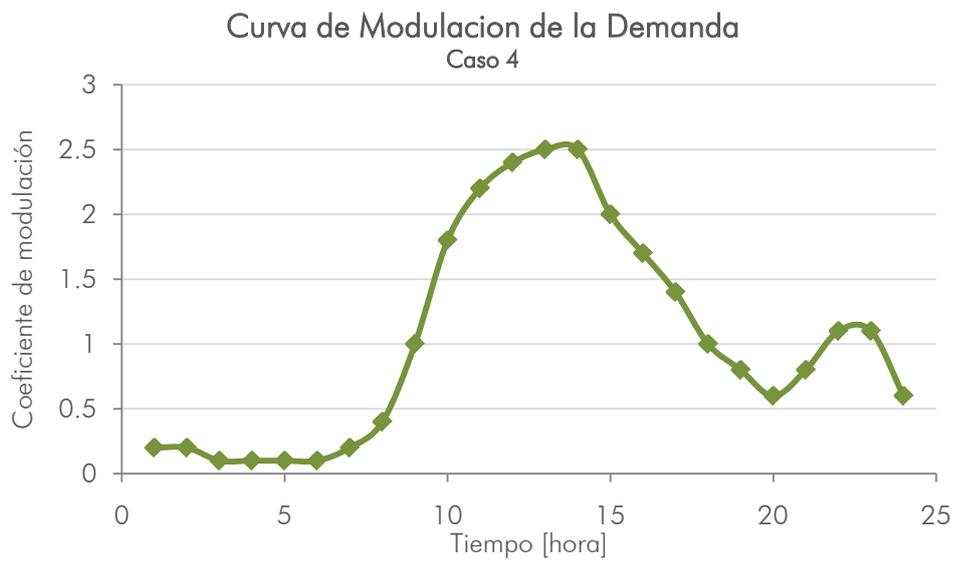


FIGURA 46. CURVAS DE MODULACIÓN DE LAS DEMANDAS, (CASO REAL)

- La entrada del sector hidrométrico cuenta con una curva de modulación de presión, asemejando las condiciones de frontera de éste con respecto a la red general (Figura 9).

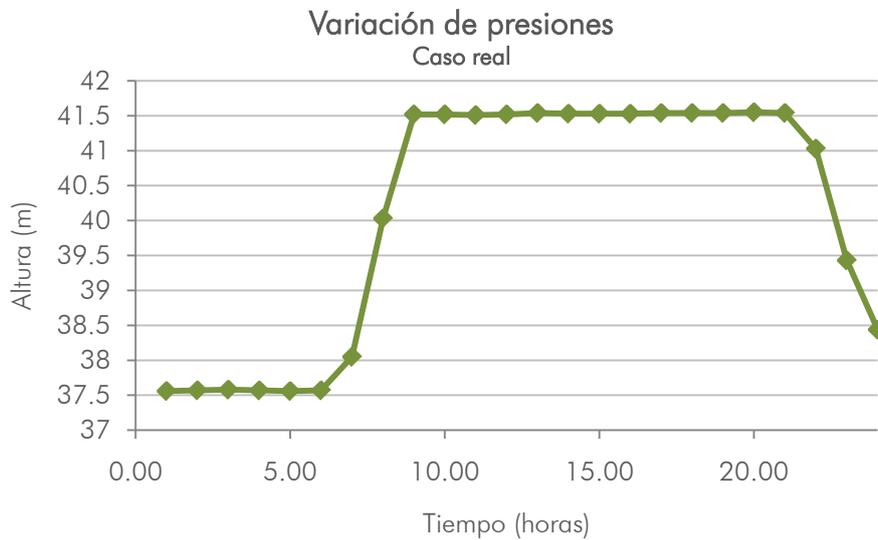


FIGURA 47. MODULACIÓN DE LA PRESIONE DE ENTRADA, (CASO REAL)

Análisis hechos y Resultados

Para este caso se planteo los análisis básicos del capítulo tres, donde encontré el error del método variando el nudo AZP para un día y horario, además del error variando la hora de aplicación de este.

Debido a la gran variedad que contenía este sector hidrométrico, tanto en cotas, caudales demandados y modulación de la presión en la entrada, las variaciones del error no fueron concluyentes pues contenían trazos erráticos; por otro lado, tratando de eliminar variables influyentes en el análisis se planteo variaciones a la red y sus características, de la siguiente manera:

- Influencia de una topología mallada en la el NFM
 - La red se transformo en una red ramificada
- Influencia de la cota en los análisis del NFM

- Imposición de cota para el caso de la red mallada
- Imposición de cota para el caso de la red ramificada
- Influencia de las demandas en el NFM
 - Se impuso la misma demanda para la red mallada
 - Se impuso la misma demanda para la red ramificada

En términos generales, todos los análisis respondieron de igual manera que el caso uno, en mayor o menor medida, de acuerdo a cuan complejo era el caso analizado. Por otro lado, la conclusión más interesante obtenida con el caso real es que al ser un sector hidrométrico sobredimensionado, los errores del NFM son extremadamente pequeños del orden (0.0015-0.1) por ciento.