



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE

# **Propuesta para la transición de un sistema con suministro de agua intermitente a suministro continuo**

---

**TESIS DOCTORAL**

Autor:

**Amilkar Ernesto ILAYA AYZA**

Directores:

**Dr. Rafael PÉREZ GARCÍA**

**Dr. Joaquín IZQUIERDO SEBASTIÁN**

**Dr. Julio BENÍTEZ LÓPEZ**

Valencia, mayo de 2016

*Dedicado a la memoria de mi madre, Juana Ayza; y a mi esposa, Wandita Sanjinés, por su apoyo de siempre.*

## Agradecimientos

En esta etapa de la tesis es justo y necesario agradecer a todas las personas e instituciones involucradas en el logro de este objetivo.

Quiero agradecer inicialmente a Wanda, mi esposa, quien con una idea, con sus palabras de apoyo o simplemente con escucharme fue un pilar fundamental para sacar este desafío adelante; sobre todo gracias por tu amor y comprensión.

A la distancia se valora aún más. Agradecer a mis padres, Segundino y Juana, quienes hicieron lo que soy gracias a sus esfuerzos y sus sacrificios; a mis suegros, Julio y Dora, por su cariño y apoyo; a mis hermanos Melina, Ximena, Pamela y José Antonio; a mis cuñados Vivian, Jeaninne, Nelson, Julio y Christopher; a mis abuelitos Ernesto, Teófila, Felipe y Benedicto por sus sabios consejos; a mis tíos Rosendo Sanjinés y Charlotte Biedermann por todo su apoyo.

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a los Directores de la presente tesis doctoral: Rafael Pérez, Joaquín Izquierdo y Julio Benítez; por su amistad, su apoyo técnico y moral invaluable; siempre con ideas, consejos o con palabras de ánimo cuando parecían que las cosas no iban bien. Me considero muy afortunado por haberlos conocido y tenerlos como directores.

Reconocer el apoyo de mi Grupo de investigación FLUING-IMM de la Universitat Politècnica de València, fundamental en esta mi etapa de investigación; mis agradecimientos a: Joaquín Izquierdo, Rafael Pérez, Enrique Campbell, David Ayala, Pauline Carreño, Silvia Ocaña y Eva Ramos.

Agradezco al Proyecto MUNDUS LINDO del Programa Erasmus Mundus Acción 2, por el financiamiento de la beca que me permitió realizar el doctorado. Asimismo, a la Universidad Técnica de Oruro y a la Universitat Politècnica de València.

También quiero agradecer al Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado de la ciudad de Oruro, del cual aún me siento parte, sin su apoyo no hubiera sido posible este trabajo. Mis sinceros agradecimientos a Juan Carlos Verduguez, Walter Veizaga, Rolando Herrera, Fernando Vacaflor, Lourdes España, Efraín Vargas, Tania Sangüeza, Juan Carlos Aguirre y a todos mis amigos de SeLA.

Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos, los que tengo en Bolivia y los que hice aquí.

## Resumen

El aumento de la demanda de agua por el incremento de la población; la reducción en la disponibilidad de recursos hídricos debido a la contaminación y efectos del cambio climático, que aumenta la severidad de los eventos extremos; y las deficiencias en la gestión de los sistemas de abastecimiento de agua ponen en riesgo la continuidad del suministro de agua potable. Estas condiciones, imponen un escenario propicio para que las empresas de agua opten por tener un suministro intermitente, proporcionando agua a la población únicamente por algunas horas al día.

Aunque el suministro intermitente debe ser la última medida a tomar en condiciones de escasez de agua, principalmente debido a: los daños que causa a la infraestructura del sistema, el riesgo a la salud que conlleva y los problemas de equidad en el suministro de agua; aún continúa siendo la forma de acceso al agua para millones de personas alrededor del mundo, principalmente en países en vías de desarrollo. Una tercera parte de África y Latinoamérica y más de la mitad de la población de Asia tienen suministro intermitente.

Dentro la bibliografía, existen dos enfoques para afrontar los problemas relacionados con el suministro intermitente: el primero busca llegar a un suministro de 24 horas mejorando la infraestructura e incrementando la cantidad de agua en las fuentes de suministro; el segundo enfoque considera al sistema intermitente como una realidad, de esta forma las soluciones planteadas buscan la mejora de la gestión del sistema trabajando como intermitente.

A su vez, el primer enfoque puede ser dividido en dos: llegar al suministro continuo de forma directa, situación que puede darse cuando existen los recursos suficientes para mejorar la infraestructura y ampliar la capacidad de las fuentes de suministro a corto plazo; y alternativamente se tiene una transición gradual, que considera la escasez económica del operador, de tal forma que se logre un suministro por 24 horas de forma planificada a mediano plazo.

Un operador de un sistema de agua con escasez económica, difícilmente puede optar por una transición directa, precisamente por las limitaciones económicas, por lo que deben buscarse y analizarse otro tipo de estrategias más rentables. En el presente trabajo se propone una transición de suministro intermitente a continuo, en base a la complementación de los dos enfoques mencionados anteriormente, incorporando el término de transición gradual, con las siguientes consideraciones:

En primera instancia, se busca mejorar la equidad del suministro, por lo que se plantean medidas de gestión técnica, sectorización, análisis de la capacidad del sistema y gestión de horarios de suministro; enfocados a las condiciones que se dan en un suministro intermitente, esto implica su aceptación como una realidad.

Posteriormente, las acciones deben ir dirigidas a realizar la transición gradual en sí; por lo que se seleccionarán las zonas o sectores que tendrán suministro por 24 horas, la selección debe considerar varios criterios que permitan mantener la equidad entre los sectores todavía intermitentes. Este procedimiento permitirá elaborar una transición planificada y ajustada a las limitaciones económicas del operador.

El desarrollo de estas herramientas, también permite evaluar el origen de los sistemas con suministro intermitente.

Aunque, el presente trabajo se centra en sistemas con escasez económica y con mala gestión, las propuestas planteadas también pueden ser útiles para una mejor gestión de los sistemas con escasez física de agua.

## Resum

L'augment de la demanda d'aigua per l'increment de la població; la reducció en la disponibilitat de recursos hídrics a causa de la contaminació i efectes del canvi climàtic, que augmenta la severitat dels esdeveniments extrems; i les deficiències en la gestió dels sistemes d'abastament d'aigua; posen en risc la continuïtat del subministrament d'aigua potable. Aquestes condicions, imposen un escenari propici perquè les empreses d'aigua opten per tenir un subministrament intermitent, proporcionant aigua a la població únicament per algunes hores al dia.

Encara que el subministrament intermitent ha de ser l'última mesura a prendre en condicions d'escassetat d'aigua, principalment a causa de: els danys que causa a la infraestructura del sistema, el risc a la salut que comporta i els problemes d'equitat en el subministrament d'aigua; encara continua sent la forma d'accés a l'aigua per a milions de persones al voltant del món, principalment en països en vies de desenvolupament. Una tercera part d'Àfrica i Llatinoamèrica i més de la meitat de la població d'Àsia tenen subministrament intermitent.

Dins les referències bibliogràfiques, existeixen dos enfocaments per a afrontar els problemes relacionats amb el subministrament intermitent: el primer cerca arribar a un subministrament de 24 hores millorant la infraestructura i incrementant la quantitat d'aigua en les fonts de subministrament; el segon enfocament considera al sistema intermitent com una realitat, d'aquesta forma les solucions plantejades cerquen la millora de la gestió del sistema treballant com a intermitent.

Al seu torn, el primer enfocament pot ser dividit en dos: arribar al subministrament continu de forma directa, situació que pot donar-se quan existeixen els recursos suficients per a millorar la infraestructura i ampliar la capacitat de les fonts de subministrament a curt termini; i alternativament es té una transició gradual, que considera l'escassetat econòmica de l'operador, de tal forma que s'aconsegueix un subministrament per 24 hores de forma planificada a mig termini.

Un operador d'un sistema d'aigua amb escassetat econòmica, difícilment pot optar per una transició directa, precisament per les limitacions econòmiques, per la qual cosa han de cercar-se i analitzar-se un altre tipus d'estratègies més rendibles. En el present treball es proposa una transició de subministrament intermitent a continu, sobre la base de la complementació dels dos enfocaments esmentats anteriorment, incorporant el terme de transició gradual, amb les següents consideracions:

En primera instància, se cerca millorar l'equitat del subministrament, per la qual cosa es plantegen mesures de gestió tècnica, sectorització, anàlisi de la capacitat del sistema i gestió d'horaris de subministrament; enfocats a les condicions que es donen en un subministrament intermitent, açò implica la seua acceptació com una realitat.

Posteriorment, les accions han d'anar dirigides a realitzar la transició gradual en si; pel que se seleccionaran les zones o sectors que tindran subministrament per 24 hores, la selecció ha de considerar diversos criteris que permeten mantenir l'equitat entre els sectors encara intermitents. Aquest procediment permetrà elaborar una transició planificada i ajustada a les limitacions econòmiques de l'operador.

El desenvolupament d'aquestes eines, també permet avaluar l'origen dels sistemes amb subministrament intermitent.

Encara que, el present treball se centra en sistemes amb escassetat econòmica i amb mala gestió, les propostes plantejades també poden ser útils per a una millor gestió dels sistemes amb escassetat física d'aigua.

## Abstract

Increasing water demand due to population growth, reduction of available water resources due to pollution and climate change effects, which, in turn, increase the severity of external events, and poor management of water supply systems threaten the continuity of drinkable water supply. When a scenario under these conditions is set, water supply companies opt for intermittent supply and thus deliver water to users for just few hours during the day.

However, intermittent water supply must be the last resort under water scarcity conditions mainly due to: damage caused to the system infrastructure, health risks, and supply equity impairment. Nevertheless, it is a fact that intermittent supply still remains a manner of water supply for millions of people around the world, mainly in developing countries. One third of Africa and Latin America population and more than a half of Asia's have intermittent water supply.

In the literature, there are two approaches to face intermittent supply related problems. The first one looks for continuous supply by improving the infrastructure and by increasing the amount of water at the supply sources. The second one, based on the recognition of the intermittent supply as a reality, tries to improve management of intermittent supply systems.

The first point of view, which focus upon reaching continuous supply, can, in turn, be subdivided into two: a direct way, which may be possible when enough resources are available to improve the infrastructure and increase water sources capacity within the short term; and, alternatively, a gradual transition, which considers the economic scarcity of the operator to reach continuous supply in a planned way in the medium term.

Operators in systems with economic scarcity can hardly afford a direct transition due to economic limitations. Thus, other more feasible strategies must be considered and studied.

In this thesis, we propose a transition from intermittent to continuous supply based on complementary conditions of both points of view mentioned before, and by incorporating the term gradual transition, under the following considerations:

First, we look for improving the equity supply. Therefore, technical management, sectorization, system capacity analysis, and supply schedule management measures are set up strongly regarding intermittent supply conditions and, consequently, recognizing intermittent supply as a reality.

Later, measures must be focused on the gradual transition itself. Consequently, intermittent supply sectors are selected to become continuous. Sector selection considers several criteria preserving equity in current intermittent sectors. By using this procedure, we show that a planned and agreed transition that considers the operator's economic limitations is possible.

Incidentally, the development of these tools enables us to trace back and evaluate the origin of an intermittent water supply system.

Although this thesis mainly focuses on systems with economic scarcity and poor management, our proposals can also be useful for better management of systems with water scarcity.

## Contenido

<i>Agradecimientos</i> .....	<i>ii</i>
<i>Resumen</i> .....	<i>iii</i>
<i>Resum</i> .....	<i>iv</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>v</i>
<b>CAPÍTULO 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. <i>Introducción</i> .....	1
1.2. <i>Justificación y objetivos</i> .....	4
1.2.1. <i>Objetivo general</i> .....	4
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	4
1.3. <i>Estructura del documento</i> .....	5
<b>CAPÍTULO 2. Problemática de los sistemas con suministro intermitente</b> .....	<b>7</b>
2.1. <i>Introducción</i> .....	7
2.2. <i>Sistemas con suministro intermitente</i> .....	8
2.2.1. <i>Inconvenientes de los sistemas con suministro intermitente</i> .....	9
2.2.2. <i>Ventajas de los sistemas con suministro intermitente</i> .....	13
2.3. <i>Clasificación de los sistemas con suministro intermitente</i> .....	14
2.3.1. <i>Categorización de la escasez de agua</i> .....	14
2.3.1.1. <i>Tipo 1: Escasez debida a una mala gestión</i> .....	14
2.3.1.2. <i>Tipo 2: La escasez económica</i> .....	15
2.3.1.3. <i>Tipo 3: La escasez absoluta</i> .....	15
2.3.2. <i>Categorización según el origen de los problemas</i> .....	15
2.3.2.1. <i>Problemas Tipo A:</i> .....	15
2.3.2.2. <i>Problemas Tipo B:</i> .....	16
2.3.3. <i>Matriz de clasificación</i> .....	16
2.4. <i>Demanda</i> .....	16
2.4.1. <i>Gestión de la demanda</i> .....	17
2.4.2. <i>La demanda en suministro continuo y en intermitente</i> .....	18
2.5. <i>Patrón de consumo</i> .....	19
2.5.1. <i>Patrón de consumo en suministro intermitente</i> .....	20
2.6. <i>Factor punta</i> .....	23
2.6.1. <i>Factor punta en suministro intermitente</i> .....	24
2.7. <i>Características hidráulicas de sistemas de suministro intermitente</i> .....	25
2.7.1. <i>Equidad en el suministro</i> .....	25
2.7.2. <i>Demanda dependiente de la presión</i> .....	26
2.7.3. <i>Presencia de aire en las tuberías con suministro intermitente</i> .....	28
2.8. <i>Modelización y simulación</i> .....	28
2.8.1. <i>Modelos de análisis estático</i> .....	29
2.8.2. <i>Modelos de análisis dinámico</i> .....	29
2.8.2.1. <i>Modelos no inerciales</i> .....	29
2.8.2.2. <i>Modelos inerciales</i> .....	30
2.8.3. <i>El proceso de modelización</i> .....	30
2.8.4. <i>Calibración del modelo</i> .....	32
2.8.5. <i>Simulación y modelización en sistemas con suministro intermitente</i> .....	32
2.9. <i>Pérdidas de agua en el sistema de abastecimiento</i> .....	35
2.9.1. <i>Pérdidas de agua en la red de distribución</i> .....	35
2.9.2. <i>Pérdidas reales</i> .....	36

2.9.3. Pérdidas aparentes .....	39
2.9.4. Pérdidas en sistemas con suministro intermitente .....	39
2.9.5. Métodos para estimar las fugas en sistemas con suministro intermitente .....	40
2.9.5.1. Método de cisternas móviles .....	40
2.9.5.2. Método de cierre de grifos .....	41
2.9.6. Hidráulica de las pérdidas reales.....	41
2.9.7. Gestión de las pérdidas reales .....	42
2.9.7.1. SRELL, short-run economic leakage level .....	43
2.9.7.2. Gestión de presión .....	46
<b>CAPÍTULO 3. Capacidad de la red de suministro y la presencia de nudos desfavorables</b>	<b>49</b>
3.1. Introducción .....	49
3.2. Capacidad de la red de suministro .....	49
3.3. Curva característica del sistema .....	50
3.4. Curva de consigna .....	52
3.4.1. Características de la curva de consigna .....	55
3.5. Caudal máximo teórico .....	60
3.6. Capacidad de la red con más de una fuente de suministro .....	65
3.7. Caudal máximo requerido en suministro continuo .....	67
3.8. Caudal máximo requerido en suministro intermitente.....	67
3.9. Nudos favorables y desfavorables en una red.....	68
3.10. La capacidad de la red y su relación con el suministro intermitente .....	79
<b>CAPÍTULO 4. Medidas de mejora a corto plazo y transición del sistema con suministro intermitente a suministro continuo .....</b>	<b>83</b>
4.1. Introducción .....	83
4.2. Acciones a corto plazo .....	84
4.2.1. Sectorización .....	84
4.2.2. Gestión de horarios .....	84
4.3. Acciones a largo plazo .....	85
4.4. Transición de sistema con suministro intermitente a suministro continuo .....	86
4.4.1. Transición directa y gradual .....	86
4.5. Propuesta para la transición a suministro continuo .....	89
4.5.1. Diagnóstico del sistema .....	91
4.5.2. Ampliación de la capacidad del sistema .....	92
4.5.3. Equidad en el suministro de agua .....	92
4.5.4. Transición a suministro continuo .....	93
4.5.5. Reducción de pérdidas de agua .....	93
4.6. Opinión de los expertos y su inclusión en la toma de decisiones.....	93
4.6.1. Decisión multicriterio .....	94
4.6.1.1. Variables explicativas .....	94
4.6.1.2. Normalización de variables.....	95
4.6.2. Proceso Analítico Jerárquico (AHP) .....	95
4.6.2.1. Consistencia de la matriz pareada .....	97
<b>CAPÍTULO 5. Diagnóstico básico de sistemas con suministro intermitente .....</b>	<b>101</b>
5.1. Introducción .....	101
5.1.1. Condiciones para ejecutar medidas a corto plazo .....	101
5.1.2. Condiciones para ejecutar medidas a largo plazo .....	102
5.2. Diagnostico general del área de estudio .....	102
5.3. Recolección de información .....	102

5.3.1. Información cuantitativa .....	102
5.3.1.1. Base de Datos de Clientes .....	103
5.3.1.2. Base de Datos de la Red .....	104
5.3.2. Información cualitativa.....	104
5.4. Balance hídrico.....	104
5.4.1. Volumen de ingreso al sistema .....	106
5.4.2. Consumo autorizado.....	106
5.4.3. Agua facturada.....	107
5.4.4. Agua no facturada.....	107
5.4.5. Pérdidas de agua.....	107
5.5. Volumen de ingreso al sistema .....	107
5.5.1. Demanda per cápita.....	108
5.5.2. Porcentaje de fugas en suministro intermitente .....	108
5.6. Volumen consumido en la red.....	109
5.6.1. Reparto del volumen no facturado en cada sector.....	109
5.6.1.1. Corrección de la demanda mediante el porcentaje de pérdidas .....	109
5.6.1.2. Las fugas como consumos dependientes de la presión .....	109
5.6.1.3. Asignación de fugas como caudal medio constante.....	110
5.6.2. Caudal medio del periodo de suministro.....	110
5.6.3. Horario de suministro .....	112
5.6.4. Curva de suministro .....	112
5.6.5. Evaluación de la curva de suministro .....	112
5.7. Volumen de regulación de depósitos .....	113
5.8. Valores ponderados de presión y horas de suministro .....	113
5.9. Categorización del sistema con suministro intermitente .....	114
5.9.1. Escasez física .....	114
5.9.2. Escasez económica .....	115
5.9.3. Escasez por mala gestión .....	115
<b>CAPÍTULO 6. Sectorización en sistemas con suministro intermitente.....</b>	<b>117</b>
6.1. Introducción .....	117
6.2. Sectorización .....	118
6.2.1. Diseño de DMA.....	121
6.2.2. Sectorización en sistemas con suministro intermitente.....	122
6.3. Tiempo o periodo de suministro .....	123
6.4. Teoría de grafos .....	124
6.4.1. Matriz de adyacencia .....	124
6.4.2. Camino más corto entre dos vértices .....	125
6.4.3. Grafo ponderado.....	125
6.4.4. Algoritmo de Dijkstra.....	125
6.4.5. Vecindad (neighborhood).....	127
6.5. Análisis Clúster.....	127
6.5.1. Medidas de distancia .....	128
6.5.2. Centroide .....	129
6.6. Equidad del suministro.....	129
6.7. Evaluación de sectores en suministro intermitente.....	130
6.7.1. Evaluación de la capacidad del sector.....	131
6.7.1.1. Modificación del tiempo de suministro .....	134
6.7.1.2. Ampliación de la capacidad del sector.....	135
6.7.1.3. División del sector .....	135
6.7.2. Evaluación de la Uniformidad en el suministro .....	136

6.7.2.1. <i>Modificación del tiempo de suministro</i> .....	137
6.7.2.2. <i>Ampliación de la capacidad del sector</i> .....	138
6.7.2.3. <i>División del sector</i> .....	138
6.8. <i>Proceso de sectorización de redes con suministro intermitente</i> .....	138
6.8.1. <i>Red o sector inicial</i> .....	141
6.8.2. <i>Identificación del nudo crítico</i> .....	142
6.8.3. <i>Identificación del camino más corto</i> .....	143
6.8.4. <i>Identificación del nudo de mayor similitud</i> .....	144
6.8.4.1. <i>Determinación del peso de las variables</i> .....	148
6.8.5. <i>Apertura de tuberías tras la selección del nudo</i> .....	148
6.8.6. <i>Tiempo de suministro del sector</i> .....	149
6.8.7. <i>Criterio de equidad en la configuración del sector</i> .....	150
<b>CAPÍTULO 7. <i>Gestión de horarios en sistemas con suministro intermitente</i></b> .....	<b>153</b>
7.1. <i>Introducción</i> .....	153
7.2. <i>Optimización</i> .....	154
7.2.1. <i>Algoritmos de optimización</i> .....	155
7.2.2. <i>Programación lineal</i> .....	156
7.2.2.1. <i>Simplex</i> .....	157
7.2.3. <i>Programación lineal con variables enteras</i> .....	157
7.2.3.1. <i>Algoritmo Branch &amp; Cut</i> .....	157
7.3. <i>Matriz circulante</i> .....	158
7.4. <i>Descripción general de la metodología</i> .....	159
7.5. <i>Bloques de suministro</i> .....	160
7.6. <i>Criterios para el cambio de horario de suministro</i> .....	160
7.6.1. <i>Cuantificación de variables</i> .....	161
7.6.1.1. <i>Cantidad de usuarios del sector</i> .....	162
7.6.1.2. <i>Presión de servicio</i> .....	162
7.6.1.3. <i>Horas de suministro</i> .....	163
7.6.1.4. <i>Facilidad en la operación del sector</i> .....	163
7.6.1.5. <i>Volumen de ingreso al depósito</i> .....	164
7.6.1.6. <i>Ponderación de criterios</i> .....	164
7.6.1.7. <i>Cálculo de factores por cada criterio</i> .....	165
7.7. <i>Optimización del horario de suministro</i> .....	165
7.7.1. <i>Problema de optimización</i> .....	168
7.8. <i>Verificación hidráulica</i> .....	169
7.9. <i>Elección del escenario óptimo</i> .....	169
<b>CAPÍTULO 8. <i>Análisis de la ampliación de la capacidad de la red y el incremento de fugas tras la transición a suministro continuo</i></b> .....	<b>171</b>
8.1. <i>Introducción</i> .....	171
8.2. <i>Rehabilitación</i> .....	173
8.3. <i>Ampliación de la capacidad de la red en sistemas con suministro intermitente</i> .....	175
8.4. <i>Caudal máximo teórico</i> .....	176
8.5. <i>Caudal máximo requerido</i> .....	179
8.6. <i>Proceso de ampliación de la capacidad de la red</i> .....	179
8.6.1. <i>Costes implicados en la ampliación de la capacidad de la red</i> .....	183
8.6.2. <i>Características del modelo matemático de la red</i> .....	184
8.6.3. <i>Selección del tramo a modificar</i> .....	184
8.7. <i>Identificación de cuellos de botella en la red</i> .....	186
8.8. <i>Análisis de las pérdidas reales tras la transición a suministro continuo</i> .....	186

8.8.1. Relación entre volúmenes de fugas en suministro intermitente y continuo .....	187
8.8.2. Relación entre porcentajes de fugas en suministro intermitente y continuo .....	193
8.8.3. El porcentaje de fugas en suministro continuo como criterio de diseño .....	196
8.8.3.1. Pérdidas de agua en sistemas con suministro continuo.....	197
8.8.4. Reducción de las pérdidas reales en el proceso de transición.....	198
8.8.5. Gestión de presión en los sectores tras el proceso de transición.....	202
<b>CAPÍTULO 9. Transición gradual a suministro continuo.....</b>	<b>204</b>
9.1. Introducción .....	204
9.2. Descripción del proceso de selección de sectores .....	205
9.2.1. Transición gradual con la reducción del caudal pico.....	207
9.2.2. Transición gradual con el crecimiento del caudal pico.....	207
9.3. Algoritmos evolutivos .....	208
9.4. Algoritmos genéticos.....	208
9.4.1. Cromosoma .....	209
9.4.1.1. Codificación.....	210
9.4.2. Operadores genéticos .....	210
9.4.2.1. Cruce.....	210
9.4.2.2. Mutación.....	211
9.4.2.3. Selección.....	211
9.5. Evolver.....	211
9.6. Criterios para la selección de sectores.....	212
9.6.1. Cuantificación de variables.....	212
9.6.1.1. Cantidad usuarios del sector .....	213
9.6.1.2. Presión de servicio .....	213
9.6.1.3. Distancia a la fuente de suministro .....	214
9.6.1.4. Equidad de suministro del sector.....	214
9.6.1.5. Dificultad de operación del sector .....	216
9.6.2. Topología de la red .....	216
9.6.3. Presión calculada en cada etapa de mejora .....	220
9.6.4. Ponderación de criterios.....	221
9.6.5. Cálculo de factores por cada criterio .....	221
9.7. Cambio de patrón de suministro.....	222
9.8. Optimización de la selección de sectores que cambian a suministro continuo .....	223
9.8.1. Caudal pico en suministro intermitente mayor al caudal pico en suministro continuo.....	225
9.8.1.1. Problema de optimización.....	225
9.8.2. Caudal pico en suministro intermitente menor al caudal pico en suministro continuo .....	226
9.8.2.1. Problema de optimización.....	227
<b>CAPÍTULO 10. Caso de estudio: zona sur de la ciudad de Oruro, Bolivia .....</b>	<b>229</b>
10.1. Introducción .....	229
10.2. Sectorización de una red con suministro intermitente.....	230
10.2.1. Evaluación preliminar de la red. ....	230
10.2.2. Variables para el proceso de clustering.....	232
10.2.3. Determinación del peso de las variables .....	235
10.2.4. Configuración del primer sector.....	236
10.2.5. Configuración del segundo sector .....	241
10.3. Diagnóstico del subsistema de la zona sur de Oruro.....	245
10.3.1. Descripción del área de estudio .....	246
10.3.1.1. Localización geográfica .....	246
10.3.1.2. Clima .....	247

10.3.1.3. Topografía .....	248
10.3.1.4. Población.....	248
10.3.1.5. Características socioeconómicas.....	249
10.3.2. Características del abastecimiento de agua .....	250
10.3.2.1. SeLA – Oruro .....	254
10.3.2.2. Características de la conexión domiciliaria .....	254
10.3.2.3. Descripción del subsistema de la zona sur .....	256
10.3.3. Balance hídrico .....	257
10.3.4. Demanda per cápita .....	259
10.3.5. Porcentaje de fugas en suministro intermitente .....	259
10.3.6. Volumen de ingreso al sistema.....	260
10.3.7. Volumen consumido en la red .....	261
10.3.7.1. Horarios de suministro.....	264
10.3.7.2. Curva de suministro.....	264
10.3.8. Volumen de regulación depósito Agua de Castilla.....	266
10.3.9. Valores ponderados de presión y horas de suministro .....	267
10.3.10. Categorización del sistema con suministro intermitente.....	269
10.4. Evaluación del origen del suministro intermitente, cuando las ampliaciones reducen la capacidad de la red .....	269
10.5. Gestión de horarios de suministro.....	276
10.5.1. Criterios para el proceso de optimización .....	276
10.5.2. Ponderación de criterios.....	279
10.5.3. Cálculo de los factores por criterio para la optimización .....	280
10.5.4. Elección del sector que modificará su horario .....	281
10.5.5. Verificación hidráulica .....	286
10.6. Ampliación de la capacidad de la red.....	288
10.6.1. Información disponible del suministro intermitente y presupuesto .....	288
10.6.2. Costes unitarios para sustitución de tramos .....	289
10.6.3. Cálculo de la presión en suministro continuo.....	290
10.6.4. Identificación de cuellos de botella en la red .....	291
10.6.5. Etapas para la ampliación de la capacidad de la red.....	292
10.7. Selección de los sectores que tendrán suministro continuo tras cada etapa de ampliación.....	297
10.7.1. Evaluación de la equidad en los sectores.....	297
10.7.2. Dificultad de operación del sector.....	303
10.7.3. Cantidad de usuarios del sector .....	304
10.7.4. Presión de servicio.....	304
10.7.5. Distancia a la fuente de suministro.....	305
10.7.6. Topología de la red .....	305
10.7.7. Ponderación de criterios.....	307
10.7.8. Cálculo de factores por cada criterio .....	308
10.7.9. Cambio de patrón de suministro.....	309
10.7.10. Selección de sectores en cada etapa de mejora .....	309
10.8. Gestión de presión en suministro continuo.....	313
<b>CAPÍTULO 11. Conclusiones y desarrollos futuros.....</b>	<b>315</b>
11.1. Introducción .....	315
11.2. Aportaciones de carácter general.....	315
11.3. Aportaciones específicas de la tesis .....	316
11.4. Desarrollos futuros.....	319
<b>Referencias .....</b>	<b>321</b>

## Lista de figuras

Fig. 1.1. Proporción de la población que usa fuentes mejoradas de agua potable (redes de suministro de agua potable) en 2011 .....	1
Fig. 1.2. Distribución de la escasez de agua física y económica .....	2
Fig. 2.1. Continuidad del servicio, horas por día, duración del suministro de agua en países en vías de desarrollo. ....	7
Fig. 2.2. Ejemplo de un patrón de consumo diario para un sistema con suministro continuo .....	20
Fig. 2.3. Mediciones de presión y caudal realizadas en zonas de Judayta (Jordania), segundo día .....	21
Fig. 2.4. Presión y caudal durante las 10 últimas horas de medición, Judayta (Jordania). .....	21
Fig. 2.5. Representación del suministro intermitente .....	22
Fig. 2.6. Representación simplificada del suministro en sistemas intermitentes. ....	22
Fig. 2.7. Curva típica de la Demanda Dependiente de la Presión (PDD). ....	27
Fig. 2.8. Diagrama de flujo del proceso de modelado. ....	30
Fig. 2.9. Riesgo de contaminación del agua durante un transitorio .....	36
Fig. 2.10. Características del caudal y del tiempo en diferentes tipos de fugas. ....	39
Fig. 2.11. Método de detección de fugas por cisternas móviles. ....	41
Fig. 2.12. Enfoque de cuatro componentes para la gestión de las pérdidas reales .....	42
Fig. 2.13. Forma general simplificada del incremento de la tasa de fugas no reportadas Vs. Tiempo .....	43
Fig. 2.14. Niveles de fugas para calcular el nivel económico de fugas a corto plazo .....	45
Fig. 2.15. Fugas por roturas notificadas y fugas por roturas no notificadas .....	45
Fig. 2.16. Nivel económico de fugas a corto plazo .....	46
Fig. 2.17. Influencia de la gestión de presión en los componentes del SRELL .....	47
Fig. 3.1. Curva característica del sistema. ....	51
Fig. 3.2. Curva característica de la red. ....	51
Fig. 3.3. Cálculo de la altura piezométrica en cabecera y el caudal inyectado para diferentes estados de carga. $Q_{cons1} < Q_{cons2} < Q_{cons3} < Q_{cons4}$ .....	52
Fig. 3.4. Curva de consigna .....	53
Fig. 3.5. Representación de las curvas resistentes de la red y la curva de consigna. ....	53
Fig. 3.6. Diagrama de flujo para la determinación de la curva de consigna. ....	55
Fig. 3.7. Red modelo para la determinación de la curva de consigna. ....	56
Fig. 3.8. Curvas de consigna para diferentes valores de presión mínima de servicio. ....	57
Fig. 3.9. Curvas de consigna para diferentes valores de presión mínima de servicio incluyendo fugas. ....	57
Fig. 3.10. Curvas de consigna para diferentes valores de presión mínima de servicio, con y sin fugas. ....	58
Fig. 3.11. Curvas de consigna para diferentes valores de exponente de fugas. ....	58
Fig. 3.12. Curvas de consigna para diferentes valores de coeficientes de fugas. ....	59
Fig. 3.13. Relación entre el caudal inyectado sin fugas y el caudal inyectado con fugas. ....	60
Fig. 3.14. Caudal máximo teórico para una red alimentada por un depósito. ....	61
Fig. 3.15. Caudal máximo teórico para una red alimentada por un equipo de bombeo. ....	61
Fig. 3.16. Caudal máximo teórico. ....	62
Fig. 3.17. Elementos para el cálculo del caudal máximo teórico. ....	63
Fig. 3.18. Diagrama de flujo para la determinación del caudal máximo teórico de la red. ....	64
Fig. 3.19. Capacidad de la red nula por altura piezométrica de la fuente insuficiente. ....	65
Fig. 3.20. Red con dos puntos de inyección o fuentes de suministro. ....	65
Fig. 3.21. Curvas de consigna y caudal máximo teórico de cada fuente de suministro. ....	66
Fig. 3.22. Red modelo para el análisis de nudos favorables y desfavorables. ....	68
Fig. 3.23. Relación entre presión y caudal suministrado con $H_t = 10$ mca. ....	69
Fig. 3.24. Relación entre presión y caudal suministrado con $H_t = 20$ mca. ....	70
Fig. 3.25. Relación entre presión y caudal suministrado con $H_t = 30$ mca. ....	70
Fig. 3.26. Relación entre presión y caudal suministrado con $H_t = 50$ mca. ....	70

Fig. 3.27. Presión y caudal suministrado en cada nudo en DDA y PDD para $H_t = 50$ mca. ....	72
Fig. 3.28. Presión y caudal suministrado en cada nudo en DDA y PDD para $H_t = 30$ mca. ....	73
Fig. 3.29. Presión y caudal suministrado en cada nudo en DDA y PDD para $H_t = 20$ mca. ....	74
Fig. 3.30. Presión y caudal suministrado en cada nudo en DDA y PDD para $H_t = 10$ mca. ....	75
Fig. 3.31. Relación entre el caudal demandado y suministrado en cada nudo para $H_t = 50$ mca. ....	77
Fig. 3.32. Relación entre el caudal demandado y suministrado en cada nudo para $H_t = 30$ mca. ....	77
Fig. 3.33. Relación entre el caudal demandado y suministrado en cada nudo para $H_t = 20$ mca. ....	78
Fig. 3.34. Relación entre el caudal demandado y suministrado en cada nudo para $H_t = 10$ mca. ....	78
Fig. 3.35. Relación entre el caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido .....	80
Fig. 4.1. Transición a suministro continuo de Badlapur (India) .....	88
Fig. 4.2. Diagrama de flujo del proceso de transición a suministro continuo. ....	90
Fig. 4.3. Esquema jerárquico AHP. ....	96
Fig. 5.1. Medición de presiones y caudales, sector E08-02, sistema de agua de Oruro, 04/02/2013. ....	110
Fig. 5.2. Representación de la variación del caudal de suministro, ingreso al sector E08-02. ....	111
Fig. 5.3. Simplificación del caudal de suministro, ingreso al sector E08-02. ....	111
Fig. 5.4. Caudal pico de la curva de suministro intermitente superior al caudal de la curva de suministro continuo. ....	112
Fig. 5.5. Caudal pico de la curva de suministro intermitente inferior al caudal de la curva de suministro continuo. ....	113
Fig. 6.1. Clasificación de los DMA. ....	119
Fig. 6.2. Grafo ponderado para encontrar el camino más corto entre A y F .....	126
Fig. 6.3. Camino más corto entre A y F. ....	127
Fig. 6.4. Diagrama de flujo para evaluar los sectores en sistemas con suministro intermitente. ....	131
Fig. 6.5. Sector con capacidad suficiente. ....	132
Fig. 6.6. Sector con capacidad insuficiente. ....	133
Fig. 6.7. Relación del número de horas incrementales y la relación de caudales $Q_{int}/Q_{máx}$ . ....	135
Fig. 6.8. Variación de la uniformidad en función del caudal inyectado al sector .....	136
Fig. 6.9. Para un proceso de sectorización, el caudal medio diario debe ser menor al caudal máximo teórico. ....	139
Fig. 6.10. Diagrama de flujo para la sectorización de redes con suministro intermitente o la división de sectores. ....	140
Fig. 6.11. El nudo crítico puede cambiar dependiendo del estado de carga. ....	143
Fig. 6.12. Camino más corto entre el nudo crítico y la fuente de suministro. ....	144
Fig. 6.13. Nudo crítico inicial y selección del nudo más cercano. ....	146
Fig. 6.14. Selección del nudo más cercano en base al centroide. ....	147
Fig. 6.15. Nudo seleccionado con mayor número de tuberías de vínculo. ....	148
Fig. 6.16. Nudo seleccionado con menor número de tuberías de vínculo. ....	149
Fig. 7.1. Máximos locales y máximo global en una función objetivo dentro la región factible. ....	155
Fig. 7.2. Diagrama de flujo para la asignación óptima de horarios de suministro. ....	159
Fig. 8.1. Acciones de rehabilitación en función de la naturaleza de las anomalías. ....	174
Fig. 8.2. Incremento de la capacidad de la red con la modificación de la red, sistema alimentado por depósitos ....	176
Fig. 8.3. Incremento de la capacidad de la red con la modificación de la fuente de suministro, sistema alimentado por depósitos .....	177
Fig. 8.4. Incremento de la capacidad de la red con la modificación de la red, sistema alimentado por bombeo .....	177
Fig. 8.5. Incremento de la capacidad de la red con la modificación de la curva motriz de bombeo, sistema alimentado por bombeo. ....	178
Fig. 8.6. Incremento de la capacidad de la red a través de reducción de la presión de servicio .....	178
Fig. 8.7. Ampliación de la red de suministro. ....	180
Fig. 8.8. Diagrama de flujo para el proceso de ampliación de la capacidad de la red. ....	182
Fig. 8.9. Evolución de la curva de consigna del sistema en el proceso de ampliación de la capacidad de la red. ....	184
Fig. 8.10. Evaluación del incremento de la capacidad con el incremento del diámetro en un tramo de la red .....	186
Fig. 8.11. Rango de acción de un patrón de presiones. ....	189
Fig. 8.12. Simulación estocástica, para $\alpha = 0.5$ , define $R_t$ a diferentes $R_p$ . ....	190
Fig. 8.13. Simulación estocástica, para $\alpha = 1.0$ , define $R_t$ a diferentes $R_p$ . ....	191
Fig. 8.14. Simulación estocástica, para $\alpha = 1.5$ , define $R_t$ a diferentes $R_p$ . ....	191

Fig. 8.15. Simulación estocástica, define $R_i$ a diferentes $R_p$ .....	192
Fig. 8.16. Incremento de fugas en suministro continuo tras la transición, cuando se incrementa la demanda, para $R_i = 3$ .....	194
Fig. 8.17. Incremento de fugas en suministro continuo tras la transición, cuando se incrementa $R_i$ , para $D_{ic} = 1$ ....	195
Fig. 8.18. Incremento de fugas en suministro continuo tras la transición a porcentajes bajos de fugas en suministro intermitente.....	195
Fig. 8.19. Relación entre la presión de suministro y el porcentaje de fugas establecido entre un mínimo y máximo.	198
Fig. 8.20. Evolución del caudal de fuga antes, durante y después del proceso de transición.....	199
Fig. 8.21. Control Activo de Fugas durante el proceso de transición.....	200
Fig. 8.22. Ejemplo de la relación entre el CAI y el porcentaje de fugas en suministro continuo.....	202
Fig. 8.23. Reducción de la presión de ingreso al sector tras el proceso de transición.....	203
Fig. 9.1. Cambio de patrón de suministro en un sector.....	206
Fig. 9.2. Cambio de patrón de suministro en la red.....	206
Fig. 9.3. Cromosoma y gen.....	209
Fig. 9.4. Cruce simple con dos puntos de corte.....	211
Fig. 9.5. Mutación.....	211
Fig. 9.6. Grafo dirigido de una red simplificada.....	217
Fig. 9.7. Esquema del proceso de optimización cuando el caudal pico de la curva de suministro intermitente es superior al caudal de la curva de suministro continuo.....	225
Fig. 9.8. Esquema del proceso de optimización cuando el caudal pico de la curva de suministro intermitente es inferior al caudal de la curva de suministro continuo.....	227
Fig. 10.1. Modelo de la red con suministro intermitente a sectorizar.....	230
Fig. 10.2. Comparación del caudal máximo teórico y los caudales medios en suministro intermitente y continuo...	231
Fig. 10.3. Reducción de la presión mínima para cubrir el suministro intermitente.....	231
Fig. 10.4. Comparación entre las curvas de consigna para el camino más corto y toda la red.....	236
Fig. 10.5. Factor de punta $k_p$ en función de la altura piezométrica de cabecera.....	237
Fig. 10.6. Tiempo de suministro en función de la altura piezométrica de cabecera.....	237
Fig. 10.7. Variación de la diferencia de presiones en función del número de nudos seleccionados.....	238
Fig. 10.8. Variación del caudal máximo teórico en función del número de nudos seleccionados.....	239
Fig. 10.9. Variación del factor de punta en función del número de nudos seleccionados.....	239
Fig. 10.10. Variación del tiempo de suministro en función del número de nudos seleccionados.....	240
Fig. 10.11. Configuración del sector 1.....	240
Fig. 10.12. Variación de la diferencia de presiones en función del número de nudos seleccionados y la altura piezométrica en cabecera.....	241
Fig. 10.13. Variación del caudal máximo teórico en función del número de nudos seleccionados y la altura piezométrica en cabecera.....	242
Fig. 10.14. Variación del factor punta en función del número de nudos seleccionados y la altura piezométrica en cabecera.....	242
Fig. 10.15. Variación del tiempo de suministro en función del número de nudos seleccionados y la altura piezométrica en cabecera.....	243
Fig. 10.16. Configuración del sector 2.....	244
Fig. 10.17. Red sectorizada.....	245
Fig. 10.18. Ubicación geográfica del Departamento de Oruro.....	247
Fig. 10.19. Imagen satelital de la ciudad de Oruro.....	247
Fig. 10.20. Precipitación total - Gestión 2012.....	248
Fig. 10.21. Hogares por continuidad diaria en la provisión de agua (2000 – 2002).....	250
Fig. 10.22. Esquema isométrico del sistema de agua potable de la ciudad de Oruro.....	252
Fig. 10.23. Usuarios por categoría, ciudad de Oruro.....	253
Fig. 10.24. Consumo por categoría de usuario, ciudad de Oruro.....	253
Fig. 10.25. Sistema de conexión directa, sin tanque elevado.....	255
Fig. 10.26. Sistema de conexión indirecta, sin bombeo.....	255

Fig. 10.27. Sistema de conexión indirecto, con bombeo. ....	256
Fig. 10.28. Esquema isométrico del subsistema sur de abastecimiento de agua potable de Oruro. ....	256
Fig. 10.29. Porcentajes representativos del Balance Hídrico .....	259
Fig. 10.30. Curva de volumen de ingreso al sistema.....	260
Fig. 10.31. Volumen mensual medio consumido por clientes con medición. ....	262
Fig. 10.32. Curva de suministro zona sur de Oruro.....	265
Fig. 10.33. Curva de modulación zona sur de Oruro.....	265
Fig. 10.34. Volúmenes de ingreso y salida, depósito agua de Castilla. ....	267
Fig. 10.35. Volúmenes acumulados de ingreso y salida, depósito agua de Castilla. ....	267
Fig. 10.36. Crecimiento urbano de Oruro.....	270
Fig. 10.37. Evolución de la población total de la ciudad de Oruro. ....	271
Fig. 10.38. Crecimiento de la red del subsistema sur de Oruro. ....	273
Fig. 10.39. Curva de consigna en cada uno de los años de estudio.....	274
Fig. 10.40. Evolución del caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido en la zona de estudio. ....	275
Fig. 10.41. Reorganización de horarios en base a la restricción $VS=350 \text{ m}^3/\text{h}$ .....	284
Fig. 10.42. Cálculo del volumen de regulación en el depósito para el nuevo horario de suministro.....	285
Fig. 10.43. Cálculo de la presión (mca) en la hora pico de los escenarios propuestos. ....	287
Fig. 10.44. Cálculo de caudales de suministro (l/s) en la hora pico de los escenarios propuestos. ....	288
Fig. 10.45. Costes unitarios de los tramos a sustituirse, por diámetro. ....	289
Fig. 10.46. Incremento de la capacidad de la red en base a la modificación del diámetro en los tramos.....	291
Fig. 10.47. Identificación de tramos cuello de botella de la red actual.....	292
Fig. 10.48. Evolución de la curva de consigna en el proceso de ampliación .....	294
Fig. 10.49. Comparación del coste acumulado en función del índice de ampliación.....	295
Fig. 10.50. Etapas del proceso de ampliación de la capacidad de la red.....	296
Fig. 10.51. Topografía y configuración del sector S01-05 .....	297
Fig. 10.52. Situación de los caudales demandados con relación al caudal máximo teórico en el sector S01-05.....	298
Fig. 10.53. Uniformidad en el suministro del sector S01-05 .....	298
Fig. 10.54. Topografía y configuración del sector S01-10 .....	300
Fig. 10.55. Situación de los caudales demandados con relación al caudal máximo teórico en el sector S01-10.....	300
Fig. 10.56. Coeficiente de uniformidad del sector S01-10.....	301
Fig. 10.57. Grafo dirigido de la red del subsistema sur de la ciudad de Oruro.....	306
Fig. 10.58. Cambio de la curva de suministro en el proceso de selección de sectores, segunda etapa .....	310
Fig. 10.59. Presiones mínimas de suministro en la segunda etapa del proceso de transición.....	311
Fig. 10.60. Sectores seleccionados para tener suministro continuo, segunda etapa .....	312

## Lista de tablas

Tabla 2.1. Categorización de los sistemas de abastecimiento intermitente.....	16
Tabla 2.2. Demanda de agua domestica dentro del hogar y demanda por piletas.....	17
Tabla 2.3. Descripción del nivel de servicio de agua con relación a la higiene.....	18
Tabla 3.1. Características de los nudos de la red.....	56
Tabla 3.2. Características de las tuberías de la red.....	56
Tabla 3.3. Características de los nudos de la red.....	69
Tabla 3.4. Características de las tuberías de la red.....	69
Tabla 3.5. Relación entre el caudal máximo teórico, el caudal máximo requerido y el tipo de suministro de en la red	80
Tabla 4.1. Escala fundamental de comparación por pares.....	97
Tabla 4.2. Valores del índice de consistencia aleatoria (RI) en función del tamaño de la matriz.....	98
Tabla 4.3. Porcentajes máximos del ratio de consistencia.....	98
Tabla 5.1. Aspectos a contemplar en la elaboración de recomendaciones sobre la mejora de la información.....	103
Tabla 5.2. Balance hídrico propuesto por IWA.....	105
Tabla 6.1. Pasos del algoritmo para encontrar el camino más corto entre A y F.....	126
Tabla 6.2. Características generales de los métodos de análisis clúster.....	128
Tabla 6.3. Acciones a seguir en función de la capacidad del sector.....	133
Tabla 6.4. Acciones a seguir en función del Coeficiente de Uniformidad del sector.....	137
Tabla 8.1. Relación entre el tipo de componente y las principales motivaciones para la rehabilitación del sistema..	173
Tabla 8.2. Clasificación de los costes en una red de agua potable.....	183
Tabla 8.3. Efecto del suministro intermitente en base al número de roturas reportadas.....	187
Tabla 8.4. Valores típicos de las pérdidas totales de agua.....	197
Tabla 10.1. Variables para el proceso de clustering.....	233
Tabla 10.2. Normalización de variables.....	234
Tabla 10.3. Matriz de comparación pareada, experto 1.....	235
Tabla 10.4. Matriz de comparación pareada, experto 2.....	235
Tabla 10.5. Matriz de comparación pareada, experto 3.....	235
Tabla 10.6. Peso normalizado de cada variable.....	236
Tabla 10.7. Características de los sectores, tras el proceso de sectorización.....	244
Tabla 10.8. Precipitación total, 2012.....	248
Tabla 10.9. Temperatura media, 2012.....	248
Tabla 10.10. Temperatura máxima absoluta - Gestión 2012.....	248
Tabla 10.11. Temperatura mínima absoluta, 2012.....	248
Tabla 10.12. Número de usuarios y población - zona sur de Oruro.....	249
Tabla 10.13. Balance hídrico del subsistema en formato del IWA, gestión 2012.....	258
Tabla 10.14. Porcentajes representativos del Balance Hídrico IWA.....	259
Tabla 10.15. Volumen por horas de ingreso al subsistema.....	260
Tabla 10.16. Volumen de consumo facturado medido.....	261
Tabla 10.17. Volumen mensual medio consumido por usuarios con medición.....	261
Tabla 10.18. Volumen de consumo facturado no medido.....	262
Tabla 10.19. Cálculo del caudal medio de entrada a cada sector.....	263
Tabla 10.20. Horarios de suministro del subsistema sur de la ciudad de Oruro.....	264
Tabla 10.21. Cálculo del caudal de suministro por horas.....	264
Tabla 10.22. Cálculo del volumen de regulación depósito Agua de Castilla.....	266
Tabla 10.23. Cálculo de la presión de servicio y las horas de suministro ponderadas del subsistema.....	268
Tabla 10.24. Población total de la ciudad de Oruro.....	270
Tabla 10.25. Población del subsistema sur y caudal máximo requerido.....	271

Tabla 10.26. Nudos y tuberías de la red del subsistema sur de Oruro. ....	271
Tabla 10.27. Caudal máximo teórico de cada uno de los años de estudio. ....	274
Tabla 10.28. Normalización criterio presión de servicio. ....	276
Tabla 10.29. Normalización criterio número de usuarios. ....	277
Tabla 10.30. Normalización criterio horas de suministro. ....	277
Tabla 10.31. Matriz de comparación pareada del criterio facilidad en la operación del sector, Experto 1. ....	278
Tabla 10.32. Vector propio de cada experto y ponderación de cada sector Criterio 4. ....	279
Tabla 10.33. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 1. ....	279
Tabla 10.34. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 2. ....	279
Tabla 10.35. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 3. ....	280
Tabla 10.36. Vector propio de cada experto y ponderación para cada criterio. ....	280
Tabla 10.37. Factores o pesos de cada uno de los sectores según cada criterio. ....	280
Tabla 10.38. Matriz V, resultado de la optimización. ....	281
Tabla 10.39. Matriz U del sector S01-05, para $m=24$ y $h=5$ . ....	282
Tabla 10.40. Vector X de cada sector. ....	282
Tabla 10.41. Volumen por hora que ingresa a cada sector. ....	283
Tabla 10.42. Vector M de cada sector. ....	283
Tabla 10.43. Matriz, S, para priorizar el horario de suministro actual. ....	284
Tabla 10.44. Reorganización de horarios en base a la restricción $VS=350$ m <sup>3</sup> /h ( $Q_{máxh}=87.42$ l/s). ....	285
Tabla 10.45. Escenarios para diferentes restricciones. ....	286
Tabla 10.46. Cálculo de la presión (mca) en la hora pico de los escenarios propuestos. ....	287
Tabla 10.47. Cálculo de caudales de suministro (l/s) en la hora pico de los escenarios propuestos. ....	287
Tabla 10.48. Costes unitarios de los tramos a sustituir, por diámetro. ....	289
Tabla 10.49. Valores de $q \cdot 10^3$ ( $n=2$ ), para la selección del tramo y el diámetro. ....	293
Tabla 10.50. Orden de priorización de tramos a sustituir. ....	294
Tabla 10.51. Comparación del coste acumulado en función del índice de ampliación. ....	294
Tabla 10.52. Etapas del proceso de ampliación de la capacidad de la red. ....	295
Tabla 10.53. Cálculo del coeficiente de uniformidad en el sector S01-05. ....	299
Tabla 10.54. Cálculo del índice de equidad para cada sector de la red. ....	301
Tabla 10.55. Normalización del criterio equidad. ....	302
Tabla 10.56. Matriz de comparación pareada de los sectores para el criterio dificultad de operación del sector. ....	303
Tabla 10.57. Normalización del criterio dificultad de operación del sector. ....	303
Tabla 10.58. Normalización del criterio número de usuarios. ....	304
Tabla 10.59. Normalización del criterio presión de servicio. ....	304
Tabla 10.60. Normalización del criterio distancia a la fuente de suministro. ....	305
Tabla 10.61. Ponderación de criterios, Experto 1. ....	307
Tabla 10.62. Ponderación de criterios, Experto 2. ....	307
Tabla 10.63. Ponderación de criterios, Experto 3. ....	308
Tabla 10.64. Peso normalizado de cada criterio. ....	308
Tabla 10.65. Cálculo de factores por cada criterio. ....	308
Tabla 10.66. Patrón de consumo en suministro continuo. ....	309
Tabla 10.67. Resultado del proceso de selección de sectores para tener suministro continuo, segunda etapa. ....	310
Tabla 10.68. Presiones mínimas calculadas en la segunda etapa del proceso de transición. ....	311
Tabla 10.69. Resumen de la selección de sectores que pasan a tener suministro continuo por etapa. ....	313
Tabla 10.69. Reducción de la presión en cada sector tras el proceso de transición a suministro continuo. ....	313

# CAPÍTULO 1. Introducción

---

## 1.1. Introducción

Se estima que unos 768 millones de personas en el mundo no utilizan fuentes adecuadas de suministro de agua potable (2011), a pesar de que en las últimas dos décadas los centros urbanos incrementaron la cobertura del servicio de agua potable, llegando a un 96% de la población urbana que cuenta con suministro mediante redes de distribución. Sin embargo, el crecimiento de cobertura no elimina los problemas de calidad del servicio; en muchos países se tiene suministro intermitente el cual limita la cantidad de horas de servicio, aumentando de esta forma los riesgos asociados a la contaminación del agua (World Health Organization & UNICEF, 2013), (Kumpel & Nelson, 2014).

Asimismo, para finales del 2011 el 83% de la población sin acceso a una fuente mejorada de agua potable vive en las zonas rurales (World Health Organization & UNICEF, 2013).

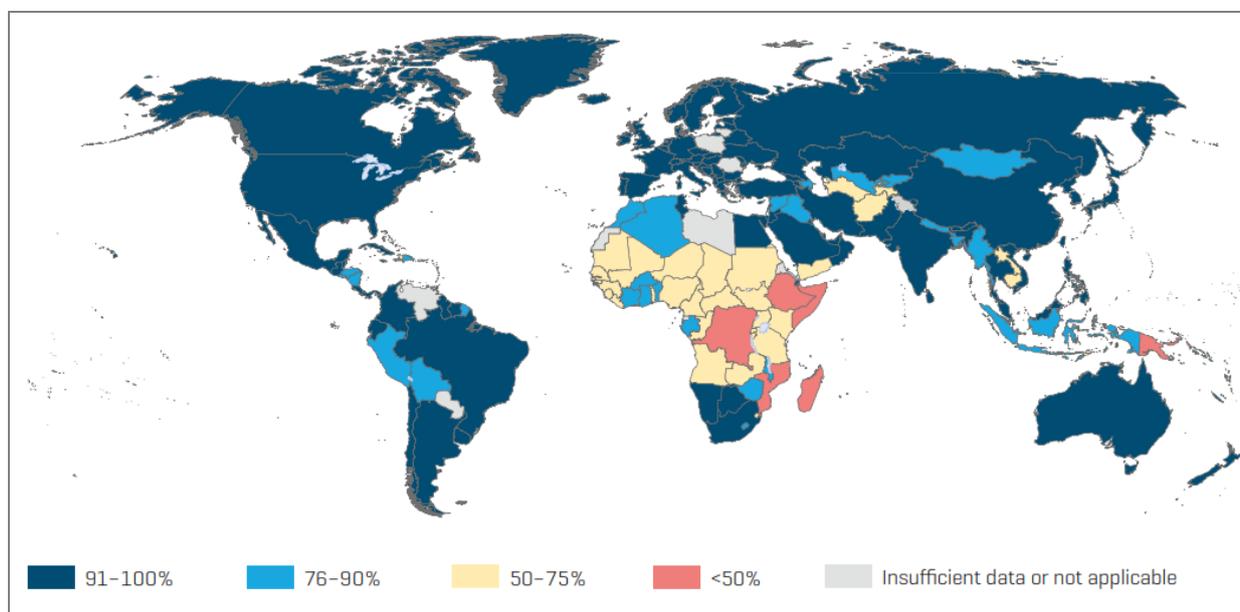


Fig. 1.1. Proporción de la población que usa fuentes mejoradas de agua potable (redes de agua potable), 2011

Fuente: World Health Organization & UNICEF (2013)

El acceso al agua es limitado para millones de mujeres y hombres pobres alrededor del mundo; las razones van más allá de los recursos físicos disponibles. En algunos lugares el agua es

abundante, pero a causa de la falta de infraestructura, producto de los problemas políticos y socio-culturales, el acceso para la gente se dificulta. En otros lugares la demanda de agua de la población es mayor a la disponible como recurso natural.

Por estas razones, la escasez de agua debe analizarse en términos de acceso al agua. Más de 1200 millones de personas alrededor del mundo (quinta parte de la población mundial) vive en zonas con escasez física de agua, insuficiente para cubrir sus demandas. Alrededor de 1600 millones de personas viven en cuencas con escasez económica de agua, donde la capacidad de recursos humanos o financieros es insuficiente para desarrollar los recursos hídricos de la región. El crecimiento de la población es un factor importante en la demanda; sin embargo, no es el único; puede entonces hablarse de una escasez física y una escasez económica para acceder al agua (International Water Management Institute, 2007).

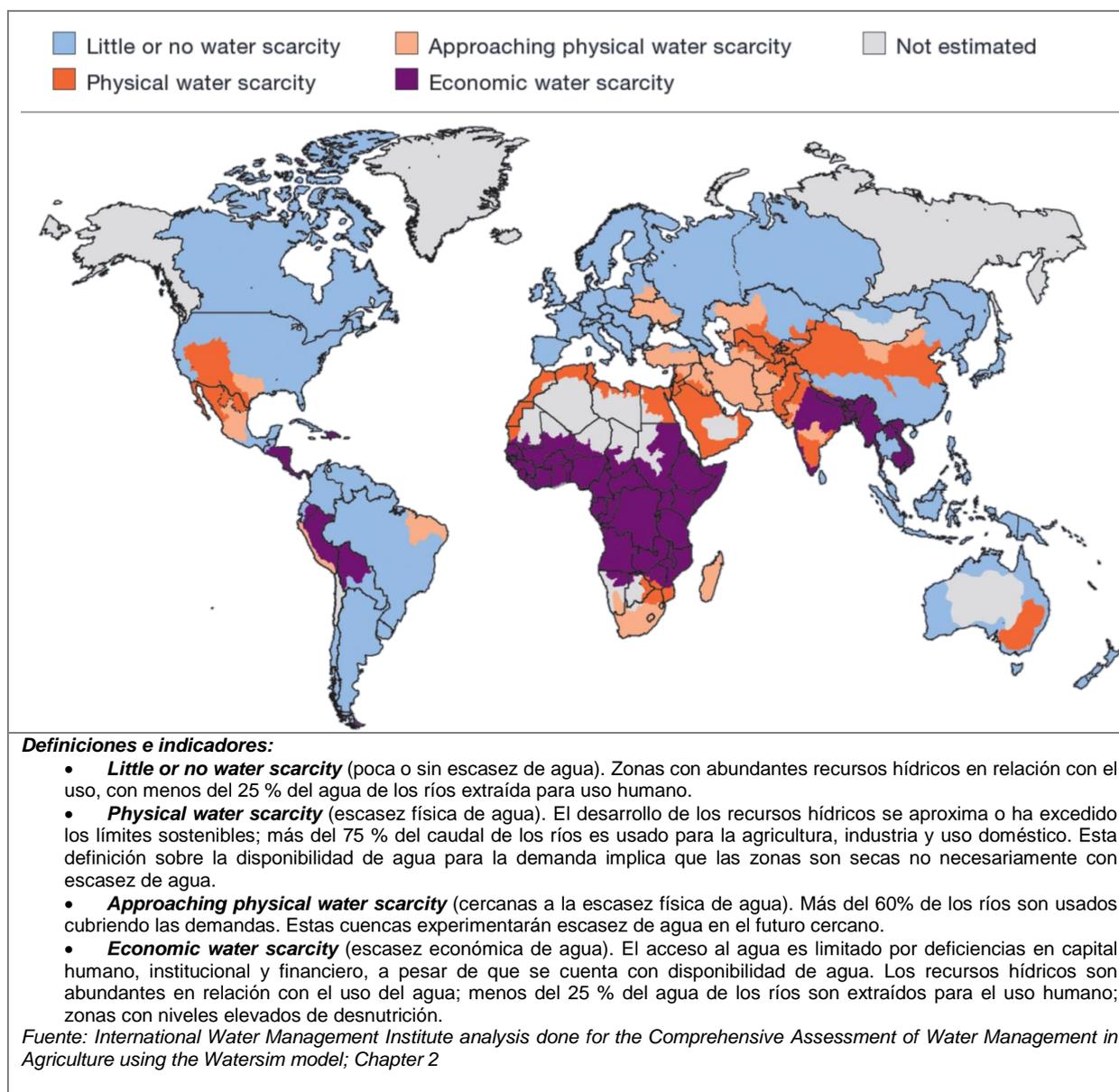


Fig. 1.2. Distribución de la escasez de agua física y económica

Fuente: International Water Management Institute (2007)

Uno de los problemas de las ciudades de países en vías de desarrollo es el incremento de la población urbana, causada por la migración de habitantes del área rural, lo cual genera presión sobre los servicios básicos como el agua potable, incidiendo sobre la cantidad de agua disponible para el suministro; en otros casos, la capacidad del sistema no abastece, o la cantidad de agua en la fuente de suministro es insuficiente. Estas limitaciones se ven afectadas aún más con tarifas bajas, las cuales agravan los problemas. De esta forma, muchas veces las empresas de agua potable se ven en la necesidad de reducir las horas de suministro, dando pie así a un sistema con suministro intermitente.

Es común considerar que el agua potable suministrada por tubería es segura; sin embargo, las deficiencias de la red, causadas por fugas o sistemas con suministro intermitente, imponen condiciones que no garantizan la calidad del agua (Lee & Schwab, 2005), (Kumpel & Nelson, 2013). Asimismo, los inconvenientes generados por el suministro intermitente, hacen que esta forma de entrega de agua resulte ser una forma inequitativa para la distribución de caudal y presión entre los usuarios, (Vairavamoorthy et al., 2001).

Dentro la bibliografía, existen dos enfoques para afrontar los problemas relacionados con el suministro intermitente: el primero busca llegar a un suministro continuo, 24 horas los siete días de la semana, a partir de la mejora de la infraestructura e incrementando la cantidad de agua de suministro; el segundo considera a los sistemas con suministro intermitente como una realidad; existen sistemas en las cuales es muy difícil llegar a suministro continuo a causa de la escasez física; de esta forma las soluciones plantean la mejora de la gestión del sistema trabajando como intermitente.

A su vez, el primer enfoque puede dividirse en dos: llegar al suministro por 24 horas de forma directa, situación que puede darse cuando existen los recursos suficientes para mejorar la infraestructura en poco tiempo; alternativamente, se tiene una transición gradual, que considera la escasez económica del operador, situación que obliga a lograr el suministro continuo de forma planificada y por etapas, una tarea a largo plazo.

Un operador de un sistema de agua potable con escasez económica, difícilmente puede optar por una transición directa, precisamente por las limitaciones económicas, por lo que deben buscarse y analizarse otro tipo de estrategias más rentables. En la presente tesis, se propone una transición de suministro intermitente a continuo basada en la complementación de los dos enfoques mencionados anteriormente, incorporando el término de transición gradual en base a las siguientes consideraciones:

- En primera instancia, se busca mejorar la equidad del suministro, por lo que se plantearán medidas de gestión técnica que tendrán impacto a corto plazo: sectorización, evaluación de la equidad y gestión de horarios de suministro, enfocados a la mejora de las condiciones del abastecimiento intermitente; esto implica su aceptación como una realidad.
- Posteriormente, las acciones deben ir dirigidas a realizar la transición gradual en sí; por lo que se priorizarán acciones de ampliación de la capacidad de la red y se seleccionarán las zonas o sectores que tendrán suministro por 24 horas; la selección debe considerar varios criterios que permitan mantener la equidad entre los sectores todavía con suministro intermitente. Este procedimiento permitirá elaborar una transición planificada y ajustada a las limitaciones económicas del operador.

Aunque, el presente trabajo se centra en sistemas con escasez económica y con gestión deficiente (Totsuka et al., 2004), las propuestas planteadas también son útiles para una mejor gestión de los sistemas con escasez física o absoluta.

## **1.2. Justificación y objetivos**

Gran parte de la población mundial, principalmente ubicada en países en vías de desarrollo, tiene acceso al agua bajo suministro intermitente. Varios estudios demuestran que este tipo de suministro, por los problemas que conlleva, no permite brindar un servicio con calidad que asegure la salud de la población. Por estas razones es importante plantear propuestas que permitan mejorar los sistemas con suministro intermitente y, en consecuencia, mejorar la calidad de vida de los usuarios.

La provisión de agua segura y fiable y el saneamiento son componentes de la piedra angular de los servicios municipales. Sin embargo, mientras la demanda de más y mejores servicios crece, el nivel de financiamiento para estos servicios se vuelve cada vez más restringido. Por lo tanto, los servicios públicos de todo el mundo se ven en la necesidad, cada vez más urgente, de mejorar su desempeño y proporcionar los mejores servicios al menor costo posible (Van den Berg & Danilenko, 2011).

Estas mejoras pueden ser realizadas a corto plazo, como medidas de gestión técnica, o a largo plazo, cuando se considera la construcción de infraestructura adicional. El suministro continuo se constituye en una de las mejores alternativas de solución a largo plazo para sistemas que trabajan con suministro intermitente. Sin embargo, las limitaciones en recursos hídricos, económicas o de gestión condicionan el entorno en el que se puede trabajar.

La bibliografía no establece específicamente procesos de transición graduales; generalmente, los procesos de transición se realizan con la ejecución de proyectos que implican grandes inversiones, clasificada en el presente trabajo como transición directa. La presente tesis pretende aportar una metodología que permita realizar una transición gradual, que sea útil principalmente para operadores de sistemas que se encuentran en estado de escasez económica, lo cual limita bastante su acción. Se presenta una metodología basada en la convivencia del suministro intermitente con el continuo, por lo que se analiza la forma de reducir los impactos negativos del suministro por horas.

Cada una de las etapas del proceso de transición a suministro continuo, es descrita bajo un enfoque técnico viable, con el fin de constituir herramientas útiles para los administradores del servicio de agua y para los responsables políticos.

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo general de la tesis es: plantear una estrategia de transición gradual de un sistema de suministro de agua intermitente a suministro continuo, considerando el análisis de las características singulares de los sistemas con abastecimiento por horas y su entorno de escasez.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, se busca:

- Analizar las características del proceso de transición gradual
- Estudiar la influencia de la demanda dependiente de la presión, característica de los sistemas intermitente, para el desarrollo de procedimientos propuestos para la transición
- Estudiar la influencia de la equidad en el suministro de los sistemas con suministro intermitente

- Proponer una metodología para la sectorización de sistemas intermitentes, como parte de la mejora de estos sistemas y para el proceso de transición
- Estudiar la influencia de la capacidad de la red en el proceso de transición
- Proponer medidas de gestión técnica, como parte del proceso de transición
- Buscar explorar nuevas aplicaciones para la curva de consigna

### 1.3. Estructura del documento

La tesis está estructurada en diez partes. En el presente *Capítulo 1. Introducción*, se establecen las causas fundamentales de la escasez de agua y su relación con el suministro intermitente y se analiza el problema en un contexto mundial. Asimismo, se plantean los objetivos y se justifican las razones para establecer una propuesta para la transición de un sistema con suministro intermitente a suministro continuo.

En el *Capítulo 2. Problemática de los sistemas con suministro intermitente*, se analizan las características de este tipo de suministro, ventajas e inconvenientes. Considerando que gran parte de la literatura técnica está dedicada a los sistemas con suministro continuo, se realiza una analogía con el suministro intermitente con el fin de describir con mayor precisión sus características.

En cada uno de los capítulos siguientes, se introducen y describen las herramientas adicionales, utilizadas para desarrollar las propuestas que permiten mejorar el sistema con suministro intermitente hasta lograr su cambio a suministro continuo.

El *Capítulo 3. Capacidad de la red de suministro y la presencia de nudos desfavorables*, es fundamental en el diagnóstico y el planteamiento de la propuesta para el proceso de transición del sistema con suministro intermitente. Se analiza la capacidad de la red, que suele ser considerada cualitativamente y se le otorga un carácter cuantitativo, lo que permite utilizarla como un elemento de decisión en el proceso de transición y mejora del sistema. Asimismo, se analiza la presencia de nudos desfavorables en la red, que conjuntamente con los nudos favorables generan inequidad en el suministro intermitente. Ambos elementos permiten comprender una de las causas menos evidentes que da origen al suministro intermitente.

Se plantean dos formas principales de mejora del servicio en sistemas con suministro intermitente: acciones a corto plazo que permitan mejorar sistemas que no pueden tener suministro continuo o como primeros pasos de una transición a suministro continuo, y acciones a largo plazo que conllevan medidas para la transición del sistema con suministro intermitente a suministro continuo. Este conjunto de medidas y su interrelación es detallado en el *Capítulo 4. Medidas a corto plazo y transición del sistema con suministro intermitente a suministro continuo*.

Para establecer el tipo de medida que se seleccionará para mejorar el sistema con suministro intermitente, es necesario realizar un diagnóstico; por esta razón en el *Capítulo 5. Diagnostico básico de sistemas con suministro intermitente*, se establecen recomendaciones sobre el tipo de datos básicos que deben recolectarse; asimismo, se describen las herramientas que deben usarse para su procesamiento.

Uno de los primeros pasos para mejorar un sistema con suministro intermitente es la sectorización, descrita en el *Capítulo 6. Sectorización en sistemas con suministro intermitente*. Se propone una metodología para la sectorización que garantiza la equidad y establece un tiempo

adecuado de suministro en base al tamaño y configuración del sector. Asimismo, cuando la red ya está sectorizada, se plantea un procedimiento para la evaluación de cada uno de los sectores.

Cuando la red está ya sectorizada y se quieren buscar mejoras a corto plazo que requieran el mínimo coste, se deben organizar los horarios de suministro de cada uno de los sectores. En el *Capítulo 7. Gestión de horarios en sistemas con suministro intermitente*, se propone una forma de optimización de horarios de suministro basada en criterios técnicos, cuantitativos y cualitativos. Este paso también puede ser parte fundamental del proceso de transición a suministro continuo.

Uno de los motivos para que una empresa de agua opte por el suministro intermitente es la falta de capacidad de la red. Por esta razón, en el *Capítulo 8. Análisis de la ampliación de la capacidad de la red y el incremento de fugas tras la transición a suministro continuo*, se propone una metodología que permite ampliar la capacidad de la red de forma gradual, priorizando el reemplazo de los tramos que producen un mayor incremento en la capacidad de la red al menor coste, hasta que la red tenga la capacidad suficiente para el suministro continuo. En este capítulo también se analiza el efecto de las fugas en el proceso de transición.

El planteamiento de medidas graduales o por etapas, se convierte en una opción muy adecuada para empresas de agua que se encuentran con escasez económica. Cada una de las etapas de ampliación de la capacidad de la red implica mejoras en la presión, que pueden ser aprovechadas para que algunos sectores vayan teniendo suministro por veinticuatro horas, también de forma gradual, seleccionando aquellos que tengan las mejores características y que no perjudiquen a los otros sectores que continúan con suministro intermitente. De esta forma se logrará que todos los sectores tengan suministro continuo cuando finalicen las mejoras graduales. Una descripción detallada de este proceso se encuentra en el *Capítulo 9. Transición gradual a suministro continuo*.

En el *Capítulo 10. Caso de estudio: zona sur de la ciudad de Oruro, Bolivia*. Se presenta la propuesta para el proceso de transición de suministro intermitente a suministro continuo del subsistema de la zona sur de Oruro. Asimismo, se analiza el origen del suministro intermitente, tomando en cuenta que el subsistema fue diseñado originalmente para tener suministro continuo.

Finalmente, en el *Capítulo 11. Conclusiones y desarrollos futuros*, se exponen las conclusiones de cada uno de los capítulos, se detallan las aportaciones específicas y las de carácter general; además se plantean futuros desarrollos.

## CAPÍTULO 2. Problemática de los sistemas con suministro intermitente

### 2.1. Introducción

La población mundial va aumentando a un ritmo acelerado y los recursos hídricos disponibles se reducen debido a la contaminación y a efectos del cambio climático, que aumenta la severidad de las sequías e incrementan los eventos extremos (Arnell, 2006), lo cual genera gran presión sobre los servicios públicos (Lee & Schwab, 2005). Estas razones hacen que la brecha entre la oferta y la demanda sea cada vez más grande; asimismo, en varios países, el crecimiento urbano ha superado, y continúa superando, al crecimiento de la infraestructura de abastecimiento (Islam & Alekal, 2009), estableciendo condiciones para que los operadores de los sistemas de abastecimiento de agua opten por tener suministro intermitente (Charalambous, 2012a).

Según el informe Benchmarking Internacional de redes de agua y saneamiento del Banco Mundial (Van den Berg & Danilenko, 2011): solamente el 16% de las empresas de agua en los países en vías de desarrollo cumplieron con el abastecimiento de 24 horas; en promedio se tiene un servicio por 16 horas al día; asimismo, se calcula que una tercera parte de África y Latinoamérica y más de la mitad de la población de Asia tiene suministro intermitente.

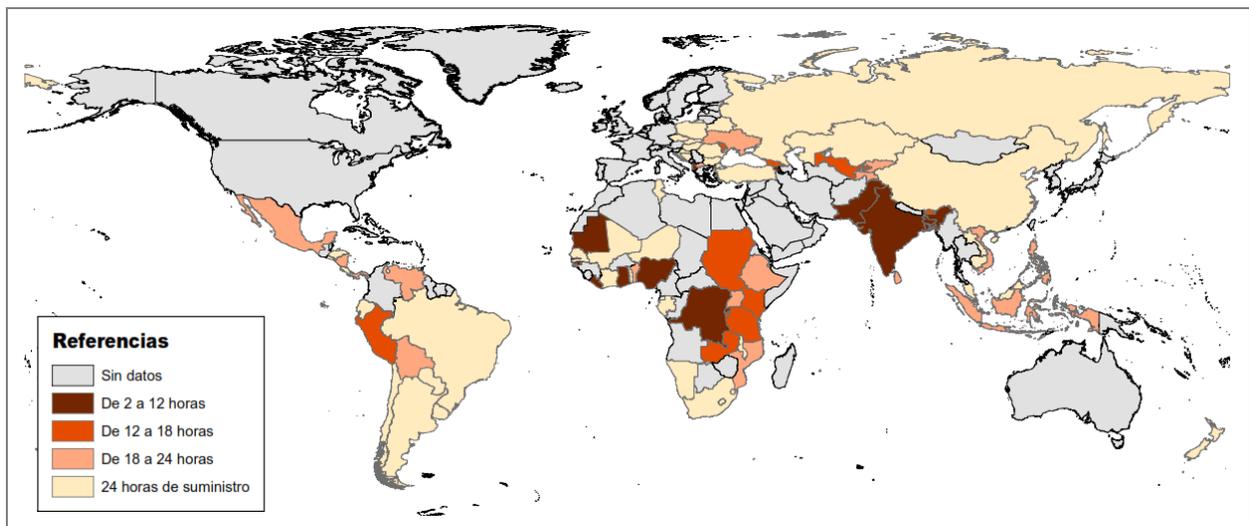


Fig. 2.1. Continuidad del servicio en horas por día y duración del suministro de agua en países en vías de desarrollo

Elaborado en base a la información de Van den Berg & Danilenko (2011)

Como parte de los objetivos de desarrollo del milenio, se busca reducir la pobreza y mejorar la salud de la población (ONU, 2000); para este fin, se constituyen en amenazas: la escasez de agua, la falta de garantía de suministro (Fan et al., 2014) y la deficiente calidad del agua de suministro; aunque se considera que el agua potable suministrada por tubería es segura, muchos estudios demuestran que las deficiencias de la red, causadas por fugas o sistemas intermitentes, pueden generar condiciones para no proporcionar agua segura y fiable (Kumpel & Nelson, 2013). La escasa fiabilidad de los sistemas de suministro de agua en los países en vías de desarrollo, puede ir socavando gran parte de la esperanza de mejoras en la salud pública (Hunter et al., 2009).

Tanto el agua potable como el saneamiento son esenciales en la lucha contra la pobreza, hambre, mortalidad infantil y en la consecución de la igualdad de género (Tsegaye et al., 2011); en este sentido, debe ser prioridad de cada estado mejorar estos servicios con el fin de garantizar la calidad de vida de sus ciudadanos.

En el presente capítulo se analizarán las características de los sistemas de suministro intermitente; sin embargo, se partirá del análisis de sistemas de suministro continuo para realizar posteriormente una analogía entre ambos tipos de abastecimiento.

## **2.2. Sistemas con suministro intermitente**

Se considera como servicio de agua intermitente, cuando el suministro se realiza por una cantidad limitada de tiempo. La periodicidad con que se abastece es diaria, aunque en los casos extremos alcanza a más de un día. Paradójicamente, este tipo de suministro requiere mucha más agua que los sistemas de suministro continuo, debido a los niveles altos de desperdicio (Faure & Pandit, 2010), (McIntosh, 2003).

Generalmente, este tipo de sistemas están diseñados y construidos para trabajar con suministro continuo, veinticuatro horas los siete días de la semana. En muchas ciudades pequeñas con suministro intermitente, el servicio es por horas para toda la red simultáneamente; en ciudades más grandes el abastecimiento se realiza con rotación de horas de servicio, diferenciados por sectores (Ilaya-Ayza et al., 2014), con el fin de laminar los consumos máximos.

Existen muchas razones por las que existen los sistemas de abastecimiento intermitente. Totsuka et al. (2004) sugieren tres tipos de problemas que pueden provocar o perpetuar el suministro intermitente: la mala gestión técnica, la escasez económica y la escasez absoluta del recurso hídrico. Cuando una empresa de agua se encuentra frente a uno de estos tres escenarios, las soluciones adoptadas pueden ir desde un suministro continuo con caudales bajos, con la consecuente reducción de las presiones en la red, el uso de agua reciclada o uso de fuentes no convencionales, o finalmente recurrir al suministro intermitente (Soltanjilili et al., 2013).

Por ejemplo, las situaciones que pueden llevar a la intermitencia, como respuesta a corto plazo por las empresas operadoras son: si se requiere electricidad para hacer funcionar bombas que impulsan el agua desde la fuente de suministro ya que cuando la energía es interrumpida con frecuencia existe el riesgo de interrumpir el servicio o el flujo de agua; si la planta de tratamiento de agua, tanques de almacenamiento o tuberías no tienen la capacidad suficiente como para procesar, almacenar y/o transportar la cantidad de agua necesaria para todos simultáneamente; las tuberías con demasiadas fugas pueden causar la pérdida en el suelo de millones de litros de agua; y, en algunos casos, puede que no haya suficiente cantidad de agua en la fuente o escasez física del recurso (Charalambous, 2012a).

Los suministros intermitentes generalmente buscan reducir la demanda per cápita de agua, bajo una idea de ahorro en costes de inversión y operativos. Sin embargo, en lugar de ser una estrategia inteligente, trae consigo consecuencias negativas que prevalecen sobre los factores positivos (Woo, 1994), (Totsuka et al., 2004). Los síntomas de carencia del sistema son niveles de presión muy bajos en la red e insuficiencia en el suministro en los puntos más alejados y elevados. Generalmente, el suministro intermitente es adoptado por necesidad más que por diseño, lo cual se traduce en graves problemas en el suministro (Vairavamoorthy et al., 2008).

El suministro continuo es la visión a largo plazo para los sistemas de abastecimiento intermitentes; sin embargo, el suministro por horas es la forma de acceso actual para millones de personas en el mundo, el cual ha existido desde hace décadas y seguirá existiendo. Algunos investigadores sugieren que la creciente escasez de agua debido al cambio climático y el aumento de la demanda por el incremento de la población puede llevar a que el uso del suministro intermitente sea más frecuente (Tsegaye et al., 2011). El suministro intermitente debe ser la última medida a tomar en condiciones de escasez de agua, lo cual se logrará por medio de una planificación proactiva y con respuestas oportunas a las condiciones críticas (Charalambous, 2012a).

Una forma de minimizar las dificultades derivadas de los sistemas de abastecimiento intermitente es a través del potenciamiento de un sistema de gestión técnica, que no es más que la administración de un conjunto de procedimientos orientados a mejorar e incrementar progresivamente, y de forma integral la calidad del servicio (Vela et al., 1996).

El suministro de agua de forma intermitente es un tipo de servicio muy común en los países en vías de desarrollo. Sin embargo, existen antecedentes, aunque pocos, en países europeos como es el caso de la segunda ciudad más grande de Chipre, Limasol (Charalambous, 2001), (Charalambous, 2012a), a causa de un extenso periodo de sequía; en Sevilla (España), debido a un periodo bastante seco entre 1975 y 1976, precedido por escasas precipitaciones en los dos años anteriores, lo cual obligó a tener un abastecimiento con restricciones durante noviembre de 1975 a diciembre de 1976 (EMASESA, 2005); y en Palermo (Italia), la escasez física del recurso en los veranos de los últimos cinco años impusieron un suministro intermitente (Fontanazza et al., 2013).

### **2.2.1. Inconvenientes de los sistemas con suministro intermitente**

El suministro intermitente genera problemas, tanto a la empresa encargada del servicio de agua, como a los consumidores o usuarios; a continuación se detallan los inconvenientes causados:

A la empresa de agua:

- Se dificultan las tareas de operación y mantenimiento; además, se debe incrementar el personal que opera el sistema, pues las válvulas son operadas con frecuencia, mucho más que en el caso de suministro continuo. Según el análisis de 45 empresas de servicios públicos en Perú, el número de empleados por cada mil conexiones de agua se incrementa en proporción inversa a las horas de servicio (Yepes et al., 2001).
- La infraestructura se deteriora con mayor rapidez, comparando con lo que ocurre en un sistema con suministro continuo, debido a la operación constante del sistema (Charalambous, 2012a); una de las principales falencias se producen en las válvulas, que sufren un mayor desgaste (Dahasahasra, 2007).

- No importa lo bien que se opere una red con suministro intermitente, sin duda existirán efectos perjudiciales en su integridad (Charalambous, 2012a).
- Se dificulta la localización de fugas en el sistema, debido a la presencia de periodos sin suministro y, en consecuencia, sin presión (Farley, 2001).
- Aunque en suministro intermitente se reducen las fugas de fondo, por la reducida cantidad de horas de suministro (Fontanazza et al., 2013), si se produce la transición a suministro continuo, se generará una mayor cantidad de fugas de fondo, debido al deterioro de la infraestructura causado por la intermitencia (Charalambous, 2012b).
- Es ineficiente desde el punto de vista energético; la demanda de los consumidores llega a tanques o depósitos sometidos a presión atmosférica, por lo que el sistema interior de la vivienda trabajará con menor presión. Muchas veces los tanques domiciliarios no cuentan con válvulas flotador, lo que puede incrementar el desperdicio (Cabrera-Béjar et al., 2009).
- El volumen de almacenamiento en los depósitos principales del sistema es insuficiente; el suministro intermitente exige grandes volúmenes de almacenamiento (Dahasahasra, 2007).
- Debido a las horas de suministro limitadas, el factor pico se incrementa a valores de 4 a 6 en la mayoría de los sistemas (Dahasahasra, 2007), esta situación exige grandes diámetros en la red para satisfacer los requisitos hidráulicos y de demanda. Según varios estudios (Akinpelu, 2001), (Vairavamoorthy et al., 2001), (De Marchis et al., 2010), los sistemas con suministro intermitente producen presiones insuficientes en los sectores o zonas más desfavorables (Vairavamoorthy & Elango, 2002).
- Los consumidores pueden estar descontentos con el servicio, lo cual dificultaría las tareas de cobro. Puede llegarse a un círculo vicioso en el cual las bajas recaudaciones logran un bajo nivel de servicio; las tareas de operación y mantenimiento se ven restringidas (World Health Organization, 2003).
- En los periodos en los cuales la tubería se encuentra vacía o con presiones bajas, puede ocurrir contaminación debida al ingreso de agua del nivel freático o aguas residuales a través de fisuras o puntos de unión entre las tuberías (Central Public Health and Environmental Engineering Organisation, 2005), (Dahasahasra, 2007), (Totsuka et al., 2004), (Kumpel & Nelson, 2013). En un estudio realizado en el sistema con suministro intermitente de Hubli-Dharwad (India), se observaron mayores niveles de contaminación en las zonas de presiones bajas (Kumpel & Nelson, 2014).
- La presencia de aire en las tuberías puede causar inexactitud en las lecturas del contador, porque al inicio del suministro primero sale el aire de la red, midiéndose este volumen adicional para el cliente; por otro lado, si se tienen condiciones de vacío en la tubería y no se instalan válvulas de retención en las acometidas, puede darse el caso contrario pues la medición arrojaría volúmenes de consumo menores. Debido a los ciclos de periodos secos y húmedos, el deterioro del rendimiento del contador se acelera. Este tipo de situaciones traen consigo dificultades en el control del consumo y en el cobro de tarifas; puede generar también escepticismo entre los usuarios sobre la exactitud de sus facturas de agua (Indian Water Works Association (IWWA), 2000).

- Debido a que las tuberías y accesorios están expuestos al aire y al agua alternadamente, estos se corroen con mayor rapidez, lo que implica una reparación y cambio más frecuente (Central Public Health and Environmental Engineering Organisation, 2005), (Faure & Pandit, 2010).
- La presencia de aire atrapado entre dos columnas de agua sometidas a presión, puede provocar importantes sobrepresiones (Izquierdo et al., 1999), situación común en el suministro intermitente cuando inicia la distribución, lo que puede causar daño a la tubería, juntas y accesorios, generando posteriormente fugas e intrusión de patógenos.
- Una de las formas comunes de protección del suministro entre los usuarios, debido a la incertidumbre en la provisión de agua, es el almacenamiento de agua en los periodos de servicio (Dahasahasra, 2007), (Charalambous, 2012a), en algunos casos, mayor cantidad de agua que la requerida (Gottipati & Nanduri, 2014); suele ocurrir que varios usuarios tienen los grifos abiertos esperando la hora de suministro (Indian Water Works Association (IWWA), 2000), lo cual incrementa las cantidades de demanda y genera desperdicio (McIntosh, 2003), (Gottipati & Nanduri, 2014).
- Existe el riesgo de contaminación en los depósitos domiciliarios; según un análisis de la calidad del agua en Estambul (Turquía), el 24% de las muestras de los depósitos domiciliarios resultaron tener presencia de coliformes (Yepes et al., 2001); asimismo, en otros estudios realizados en la India se encontraron mayores grados de contaminación fecal en los depósitos, tanto en sectores de suministro continuo como en los que tienen suministro intermitente (McKenzie & Ray, 2009), (Kumpel & Nelson, 2013).
- Requieren más inversión en infraestructura que los sistemas continuos; muchos de los componentes del sistema son infrautilizadas y otros son sobreexplotados hasta dañarlos (Faure & Pandit, 2010).
- El agua que queda en las tuberías después de la distribución se encuentra mayor tiempo dentro la red, por lo que el efecto residual del cloro puede reducirse; se necesitan dosis más altas de cloro (McIntosh, 2003).
- Puede incrementarse el número de acometidas clandestinas, debido a que estas conexiones se realizan en periodos en los cuales no hay agua en la red (Ilaya-Ayza et al., 2015c), (Ziegler et al., 2012), las cuales también pueden dar lugar a la contaminación de la red (Sargaonkar et al., 2013).
- A causa de las presiones bajas en los puntos más desfavorables del sistema, se tienen caudales de consumo mínimos, los cuales pueden no ser medidos de forma correcta por los contadores, debido al error de medición para caudales bajos (Criminisi et al., 2009), (Arregui et al., 2006).
- Con relación a los costes administrativos y de gestión, el servicio intermitente es altamente ineficiente para el administrador del servicio (Woo, 1994). Asimismo, impone una serie de costes al gestor, principalmente aquellos asociados a la degradación de la calidad del agua (Neelakantan et al., 2014).

- La modelización de la red y la simulación se dificultan, debido a los periodos sin suministro (Ingeduld et al., 2006) y la presencia de depósitos domiciliarios; estos últimos imponen el uso de modelos PDD (*Pressure Dependent Demand o Pressure Driven Demand*) (Cheung et al., 2005), (Wu et al., 2006), (Pathirana, 2010), (De Marchis et al., 2010).
- A diferencia de los sistemas con suministro continuo, existen pocas herramientas que permiten una gestión y operación adecuada del suministro intermitente; generalmente, estas tareas son realizadas de forma manual, basadas solamente en la experiencia de los operadores (Manohar & Kumar, 2014).
- En suministro intermitente, las redes son muy vulnerables a cualquier tipo de ataque en las horas sin suministro (Central Public Health and Environmental Engineering Organisation, 2005).

A la población:

- Debe almacenar agua en cantidad suficiente para cubrir las necesidades de las horas o días en los cuales no se tenga suministro. Si los hogares no pueden recibir esta cantidad, recurrirán a otras fuentes de agua como pozos, los cuales, en las grandes ciudades, pueden estar contaminados, o pueden llegar a pagar mucho más a camiones cisterna que venden el agua. Al coste adicional que deben cubrir estas familias, para su acceso al agua, se denomina coste de afrontamiento; frecuentemente este monto es mayor que la cantidad que se paga por una tarifa en un suministro continuo (McIntosh, 2003). Un estudio realizado en Tegucigalpa (Honduras) (Yepes et al., 2001), estima que los costos para las familias más pobres que deben hacer frente al tipo de suministro intermitente alcanza el 180 % de la tarifa del agua.
- La mayoría de los usuarios cuentan con tanques de almacenamiento en su propia vivienda; sin embargo, esto se dificulta en las zonas de bajos ingresos, debido a que no cuentan con el dinero, ni a veces el espacio, para instalar un depósito domiciliario, por lo que se recurre al almacenamiento en pequeños recipientes; también es común que en las horas de suministro estas personas realicen actividades adicionales, en las cuales se requiere agua, como el aseo y otros, aprovechando de esta forma las horas de servicio consumiendo mayor caudal (McIntosh, 2003).
- Debido a que el agua llega a depósitos domiciliarios, en varios casos es necesario elevar el agua a niveles superiores, donde la presión de la red sería suficiente; esto implica costos de adquisición de equipos de bombeo y pago de energía para el consumidor (Fontanazza et al., 2013).
- Hay muchos vínculos entre el agua y la pobreza; mucha gente que no tiene agua por 24 horas debe comprarla. Los pobres son los últimos en la línea para tomar agua por tubería (McIntosh, 2003). Generalmente, la gente en las zonas de bajos recursos económicos, solamente cuenta con un grifo en la vivienda, lo cual exige que se encuentre en la vivienda en la hora de suministro con los recipientes necesarios.
- Causa trastornos y agitación de las actividades diarias de las personas, en casa o en el trabajo (Charalambous, 2012a), debido a que el momento en que se dispone de agua no

- siempre es conveniente para los usuarios; por otra parte, varios consumidores, de las zonas más pobres, tendrán que ir a piletas públicas; las largas distancias y las colas son un problema típico que sufren mujeres y los niños, perdiendo de esta forma un tiempo productivo (Totsuka et al., 2004), (Franceys & Jalakam, 2010).
- Insalubridad, debido a los problemas de contaminación que pueden darse en los depósitos de almacenamiento domiciliario; la intrusión de contaminantes por las fisuras en los periodos en los cuales no hay presión en la red (Knobelsdorf & Mujeriego, 1997), (Lee & Schwab, 2005); el uso de fuentes de agua inseguras durante la intermitencia y la disponibilidad limitada de agua para la higiene (Ercumen et al., 2015).
  - El problema debido a la presencia de coliformes en los depósitos es mayor; cuando el suministro tiene interrupciones de varios días y la gente debe almacenar el agua por mayor tiempo (Tokajian & Hashwa, 2003). En un sistema con suministro intermitente de Líbano, se detectaron también aeromonas spp. (Tokajian & Hashwa, 2004). Existen antecedentes de brotes de tifoidea en Dushane (Tajikistan) (Mermin et al., 1999) y de diarrea en Nukus (Uzbekistan) (Semenza et al., 1998), causados por el suministro intermitente.
  - Los periodos largos sin suministro, la concentración de cloro y la presencia de materia orgánica en la red, causada por intrusiones o contaminación cruzada, son factores importantes en la formación de trihalometanos dentro la red de suministro (Haddad et al., 2014).
  - Los sistemas con abastecimiento intermitente no cubren los riesgos de incendio durante los períodos sin suministro; este tipo de inconvenientes puede ocasionar desastres y un gran daño a la propiedad, inclusive a la vida (Maurya et al., 2008).
  - Si el suministro intermitente no se planifica bien, se traduce en desigualdades o inequidad en la entrega de agua a los usuarios (Vairavamoorthy & Elango, 2002), (Vairavamoorthy et al., 2008). Asimismo, se demostró que esta situación también lleva a inequidades relacionadas con el coste de energía que deben cubrir los usuarios (Fontanazza et al., 2013).
  - Durante los primeros minutos de suministro, se produce el lavado inicial de la red; en este periodo la calidad del agua es baja (Kumpel & Nelson, 2013); estos niveles peligrosos de contaminación persisten hasta por 20 minutos después de la re-presurización (Franceys & Jalakam, 2010), (Neelakantan et al., 2014); si esta cantidad de agua es desechada, como debería ser, el desperdicio de agua es mayor y el tiempo de suministro se reduce. Las pocas horas de suministro producen caudales punta, que generan a su vez velocidades excesivas, las cuales pueden producir el desprendimiento de biopelículas que incrementan el riesgo en la salud de los usuarios (Tokajian & Hashwa, 2003), (Kumpel & Nelson, 2014), (Ramos, 2016).
  - La interrupción del suministro de agua potable puede destruir el beneficio para la salud de la provisión de agua potable (Hunter et al., 2009).

## 2.2.2. Ventajas de los sistemas con suministro intermitente

Entre las ventajas que ofrece un sistema con suministro intermitente se tienen:

- Puede dar lugar al ahorro de agua, relacionado con las pérdidas, debido a que las mismas ocurren durante menos tiempo por las restricciones en el suministro de agua (Morrison et al., 2007), (Fontanazza et al., 2013); por estas razones se adopta este tipo de servicios en los lugares donde hay escasez de agua en la fuente de abastecimiento (Charalambous, 2012a), (Maurya et al., 2008).
- Gestionado de forma adecuada, un sistema con suministro intermitente puede reducir la carga sobre los recursos hídricos de la zona (Mrunalini, 2015).
- Con una planificación adecuada, las tareas de mantenimiento pueden realizarse en horas en las cuales no hay agua en la red (Tavera, 2013), aunque en el caso de reparación de fugas, la identificación de los puntos donde se producen se dificulta cuando no existe agua en la red (Ilaya-Ayza et al., 2015c).
- Generalmente son sistemas con redes sectorizadas, debido a que necesitan dar el servicio por horas; esta situación puede ser aprovechada para establecer los Distritos Hidrométricos (DMAs, por *disctrict metered areas*) para el monitoreo y control de las pérdidas (Morrison et al., 2007), (Ilaya-Ayza et al., 2015c).

## **2.3. Clasificación de los sistemas con suministro intermitente**

Para una mejor comprensión de los tipos de sistemas con suministro intermitente, se cuenta con una matriz de clasificación, que integra los tipos de escasez y los problemas causados por el tipo de sistema (Totsuka et al., 2004).

### **2.3.1. Categorización de la escasez de agua**

Uno de los problemas comunes de sistemas de abastecimiento intermitente está relacionado con la cantidad de agua, la cual no es suficiente para el suministro de forma continua; de esta forma, se pueden tener tres tipos principales de escasez:

#### **2.3.1.1. Tipo 1: Escasez debida a una mala gestión**

Los sistemas con suministro intermitente que ingresan en este grupo son aquellos que tienen capacidad en el sistema de distribución existente o infraestructura necesaria (tuberías principales, depósitos de almacenamiento y otros) y la cantidad de agua disponible extraída de las fuentes de abastecimiento es suficiente para cubrir el nivel actual de demanda. Entonces, el suministro se vuelve intermitente a causa de la mala gestión del sistema de abastecimiento (fugas, desperdicio, operación y mantenimiento deficiente, etc.). También se incluye a aquellos sistemas en los cuales el suministro de electricidad es pobre y no depende del control del operador del servicio público de agua, lo cual puede generar intermitencia (Totsuka et al., 2004).

En general, una mejora de la gestión del servicio público de agua y el buen gobierno son la clave para lograr un uso más eficiente del agua, lograr desempeño financiero sólido y, en última instancia, llegar a las 24 horas de suministro. Esto se puede conseguir en el marco de la infraestructura de abastecimiento de agua existente.

Muchas veces, cuando las medidas de evaluación se centran en la cantidad de agua suministrada y generalmente pasan por alto la calidad del servicio, se tiene como resultado servicios públicos de bajo coste con mala gestión. La incorporación de la dimensión calidad entre los gestores del servicio de agua potable permite aumentar significativamente el rendimiento promedio del servicio (Kumar & Managi, 2010).

### **2.3.1.2. Tipo 2: La escasez económica**

En una primera etapa, el agua no puede ser suministrada continuamente a todos los consumidores, debido a que las demandas y el número de conexiones exceden la capacidad hidráulica del sistema de distribución. Asimismo, la demanda supera la capacidad de la fuente de abastecimiento (pozos, tomas de río, embalses, etc.); el agua se vuelve escasa porque la capacidad financiera del operador no es lo suficientemente fuerte como para ampliar la infraestructura existente.

Este tipo de escasez puede ser resultado de la poca planificación de la demanda de agua, lo que puede ser consecuencia de escasez del Tipo 1. A pesar de la mejora de la gestión del desempeño de los organismos operadores, no se puede lograr un suministro de veinticuatro horas sin la expansión física y/o el desarrollo de la infraestructura (Totsuka et al., 2004).

En algunos casos, los tipos de escasez 1 y 2 pueden ocurrir simultáneamente; por ejemplo, en países en vías de desarrollo, en los cuales se limitan los recursos financieros. Debe tenerse en cuenta que la mejora de la gestión del servicio público es parte primordial en la ampliación de la capacidad de la infraestructura física. El suministro intermitente está fuertemente relacionado con el fracaso en el cobro de tarifas altas; por ejemplo, en algunas zonas de la India el alto coste de bombeo limita el servicio por veinticuatro horas (McIntosh, 2003).

En muchos países, las siguientes causas se constituyen en una amenaza para la viabilidad financiera de los operadores: las variaciones en el coste de la energía; la escasez de préstamos para mejoras en la infraestructura; las incertidumbre del cambio climático; además de reguladores y ciudadanos que exigen cada vez más altos estándares de sostenibilidad ambiental, social y económica (Van den Berg & Danilenko, 2011).

### **2.3.1.3. Tipo 3: La escasez absoluta**

En este tipo, la escasez de agua es causada por volúmenes insuficientes en la fuente. Este puede ser el problema más complicado de resolver; a veces las fuentes alternativas pueden estar situadas a grandes distancias o pueden ser necesaria grandes cantidades de energía adicional. En este caso deben aplicarse medidas estrictas de conservación del agua con el fin de mitigar el problema. Tanto la empresa de agua como los consumidores deben compartir la responsabilidad en este caso.

## **2.3.2. Categorización según el origen de los problemas**

Los problemas relacionados con la condición de intermitencia del servicio se pueden clasificar en dos grupos:

### **2.3.2.1. Problemas Tipo A:**

Este tipo de problemas está relacionado con los sistemas de distribución que originalmente fueron diseñados y construidos para un suministro de veinticuatro horas y son operados como

intermitente. Este tipo de problemas se puede eliminar o puede ser atenuado con el uso de procedimientos, tecnologías y equipo adecuado para un suministro intermitente. Entre los problemas que ingresan en esta categoría, se tienen: la distribución inequitativa del agua debido a la presión del flujo, molestias a los consumidores y funcionamiento incorrecto del contador.

### 2.3.2.2. Problemas Tipo B:

Dentro del segundo grupo de problemas se encuentran los que surgen debido a un suministro propiamente intermitente. Entre los problemas que pertenecen a esta categoría están: la contaminación del agua y el peligro para la salud (el ingreso de contaminación), los costes de adaptación de los consumidores, el desperdicio de agua y los costes de adaptación de los proveedores de agua. Este tipo de problemas no se pueden resolver siempre, mucho menos cuando el suministro de agua sigue siendo intermitente.

### 2.3.3. Matriz de clasificación

Relacionando cada tipo de problema con el tipo de escasez que se observa en el sistema de suministro intermitente, se tiene la siguiente matriz:

Tabla 2.1. Categorización de los sistemas de abastecimiento intermitente

Escasez de agua	Tipo 1: Escasez debida a una mala gestión	Tipo 2: La escasez económica	Tipo 3: La escasez absoluta
<b>Problemas Tipo A:</b> Uso de sistemas de 24 horas	Categoría 1A	Categoría 2A	Categoría 3A
<b>Problemas Tipo B:</b> Problemas de sistemas genuinamente intermitentes	Categoría 1B	Categoría 2B	Categoría 3B

Fuente: Totsuka et al. (2004)

Para tomar cualquier medida de mejora en un sistema de suministro intermitente es importante, en primera instancia, categorizar al sistema; de esta forma, la elección de la solución será más coherente.

## 2.4. Demanda

Cuando se planifica, diseña o gestiona un sistema de suministro, debe conocerse básicamente dónde se entrega el agua y en qué cantidad; para este fin se requiere información acerca de la comunidad, incluyendo el uso histórico del agua, las tendencias demográficas, el crecimiento previsto, la topografía y la capacidad del sistema existente, entre otros (Mays, 2000). Esta información se utiliza para planificar la extensión del sistema existente y para determinar las mejoras necesarias con el objetivo de proporcionar agua en cantidad suficiente a una presión apropiada.

La demanda de agua potable es una función compleja de las características sociales, parámetros climáticos y el empleo de políticas pertinentes para el uso del agua (Soltanjilili et al.,

2013). El consumo de agua se genera a partir de la demanda residencial, industrial, comercial, extinción de incendios y las pérdidas de agua en el sistema, entre otros (Swamee & Sharma, 2008).

Tabla 2.2. Demanda de agua doméstica dentro del hogar y demanda por piletas

Clase de ocupación y tipo de propiedad		Europa (l/hab/d)	En otros lugares de clima cálido (l/hab/d)
A1	Grupos de ingresos altos: casas grandes independientes, pisos grandes de lujo.	190	230-250
A2	Grupos de ingresos medios-altos: casas independientes, pisos grandes.	165	200-230
B1	Grupos de ingresos medios-promedio: casas o pisos con dos o tres dormitorios, con uno o dos baños y una cocina.	155	180-200
B2	Grupos de ingresos medios-bajos: generalmente casas o pisos pequeños, con un baño y una cocina.	140	
	- Ídem con medición en bloque en otros lugares.		160+
	- Ídem con medición individual en otros lugares.		130
C1	Grupos de ingresos bajos: pequeñas cabañas, pequeños pisos, estudios con cocina y baño.	90-110	
<b>Otros lugares</b>			
C1	Bloques de viviendas con densidad de ocupación alta, un baño, una ducha, uno o dos grifos.		
	- Sin medición o medición en bloque		130+
	- Medición individual		90
C2	Grupos de ingresos bajos: sobre la línea de pobreza, bajo grado de viviendas en bloque, uno o dos ambientes con alta densidad de ocupación.		
	- Con baños públicos (sin medición)		110
	- Con un grifo y un inodoro por casa, medición en bloque.		90
C3	Grupos de ingresos bajos: un grifo por vivienda baño compartido o inexistente, viviendas con <i>suministro intermitente</i> .		50-55
D	Suministro por piletas públicas		
	- En áreas urbanas sin control.		70+
	- En áreas rurales con control.		45
	- En área rural, con instalaciones de lavandería en la pileta.		65
	- Mínimo para beber, cocinar y limpieza personal.		25
	- Solo para beber y cocinar.		8-10

*Nota.* - Las cifras excluyen el riego de césped y jardín, uso de piscinas y enfriadores por evaporación, pero sí incluyen las pérdidas inevitables en el consumo.

*Fuente:* Twort et al. (2000)

#### 2.4.1. Gestión de la demanda

La gestión de la demanda se centra en medidas que hacen mejor y más eficiente el uso de un suministro limitado; esta no se traduce necesariamente en una reducción de los niveles de servicio de los usuarios. Incluso, los sistemas de agua potable mejor gestionados pueden recurrir al uso de la gestión de la demanda en algunas ocasiones. Por lo tanto, es recomendable planificar el suministro de agua con mecanismos de gestión de la demanda (Vairavamoorthy et al., 2008).

Entre las técnicas de gestión de la demanda se incluyen:

- Reducción de las pérdidas de agua, incluyendo la detección de fugas y reparación.
- Medición integral.
- Cambios en los conceptos de precio del agua.
- Instalación de dispositivos de ahorro de agua.
- Reutilización de aguas residuales.
- Desarrollo institucional.
- Sensibilización del público y campañas educativas.
- Suministro de agua intermitente.

Reducir la demanda puede ser una medida atractiva para los responsables políticos, debido a que permiten ganar tiempo y retrasar las inversiones para la ampliación del sistema.

La gestión de la demanda en sistemas con suministro intermitente, puede proporcionar una demanda más equitativa, con ahorro de agua en las zonas de mayores ingresos, corrigiendo las desigualdades inherentes al suministro de agua por horas (Vairavamoorthy et al., 2008).

#### 2.4.2. La demanda en suministro continuo y en intermitente

Es importante realizar la diferenciación entre demanda y suministro. El término “demanda” se refiere al requerimiento de los consumidores y el término “suministro” se refiere a la posibilidad actual de entrega de agua de la red a los usuarios (Chandapillai et al., 2012). Sin embargo, generalmente, en los sistemas con suministro intermitente, la demanda de los usuarios no está en función de sus necesidades, sino que depende de la presión disponible en la red (Cabrera et al., 1997).

La cantidad de agua suministrada a los hogares es fundamental para las labores domésticas, además de ser determinante en la higiene y salud de la población. Existen niveles mínimos aceptables para satisfacer las necesidades básicas de la población; asimismo, debe considerarse la accesibilidad determinada principalmente en base a la distancia, el tiempo, la confiabilidad y el coste potencial (Howard & Bartram, 2003).

Según Howard & Bartram (2003), la cantidad de agua utilizada por los usuarios depende principalmente de la distancia y el tiempo de recolección de agua.

Tabla 2.3. Descripción del nivel de servicio de agua con relación a la higiene

Descripción del nivel de servicio	Distancia/tiempo	Cantidades probables recolectadas	Nivel de preocupación para la salud
Sin acceso	Más de 1000 metros o tiempo de recolección total de 30 minutos.	Muy baja (a menudo menores que 5 l/hab/d.	Muy alto, la higiene no está asegurada y las necesidades de consumo pueden estar en riesgo. La calidad es difícil de asegurar; énfasis en el uso efectivo y la higiene en la manipulación del agua.

Acceso básico	Entre 100 y 1000 metros (tiempo de recolección total de 5 a 30 minutos)	Bajo. Es poco probable que supere los 20 l/hab/d en promedio; la lavandería y/o el baño pueden realizarse en la fuente de agua con volúmenes adicionales de agua.	Medio. No se pueden cumplir todos los requisitos. La calidad es difícil de asegurar.
Acceso intermedio	En la parcela (por ejemplo, un solo grifo en la casa)	Medio. Probablemente alrededor de 50 l/hab/d	Bajo. La mayoría de las necesidades de consumo y de higiene son satisfechas. La lavandería y el baño se pueden dar en el lugar, lo que aumenta la frecuencia de lavado. La problemática del uso efectivo sigue siendo importante. La calidad es asegurada con mayor facilidad.
Acceso óptimo	El agua es distribuida en la vivienda a través de tuberías y varios grifos.	Varía significativamente, por encima de 100 l/hab/d y puede llegar hasta 300 l/hab/d.	Muy bajo. Se pueden cumplir todos los usos, la calidad es asegurada fácilmente.

*Fuente: Howard & Bartram (2003)*

Gleick (1996) sugiere que el requerimiento mínimo de agua para una persona es de 50 l/hab/d, aunque otros autores proponen demandas menores (Twort et al., 2000), (Howard & Bartram, 2003). Este mismo valor permite un acceso intermedio al servicio (Howard & Bartram, 2003).

Un estudio realizado en India (Dahasahasra, 2007), muestra que los sistemas con suministro intermitente tienen en general una variación en el requerimiento de agua que va de 27 l/hab/d a 160 l/hab/d, este último valor es tan alto como los registrados en sistemas con suministro continuo. Los niveles más bajos, menores a 27 l/hab/d, se registraron en las zonas pobres.

En otro estudio desarrollado en las áreas rurales de China (Fan et al., 2014), donde se analizaron sistemas con suministro intermitente y continuo, se determinó que la dotación de agua está muy relacionada con la duración del periodo de suministro. Cuando el tiempo de suministro es superior a 6 horas, el consumo de agua en suministro continuo o intermitente no varía sustancialmente; la reducción del periodo de suministro por debajo de 1.5 horas reduce las posibilidades de almacenaje de agua, por lo tanto solamente se alcanzan a cubrir necesidades muy básicas, se alcanzan dotaciones de 33.6 a 34.7 l/hab/d.

Charalambous (2012a) sugiere que la restricción en las horas de suministro puede dar lugar a la reducción del uso doméstico del agua, basado en el estudio del sistema de agua potable de Limasol (Chipre), tras un periodo de suministro intermitente, donde se estimó una reducción en la demanda de 15% anual.

## 2.5. Patrón de consumo

El consumo de agua en un sistema de suministro de agua continuo no se mantiene constante durante todo el día; de esta forma, es posible representar una curva de evolución del caudal inyectado o demandado por una población a lo largo de las 24 horas del día; estas curvas muestran los coeficientes de modulación, que son el cociente entre caudal medio de cada hora del día y el caudal medio diario.

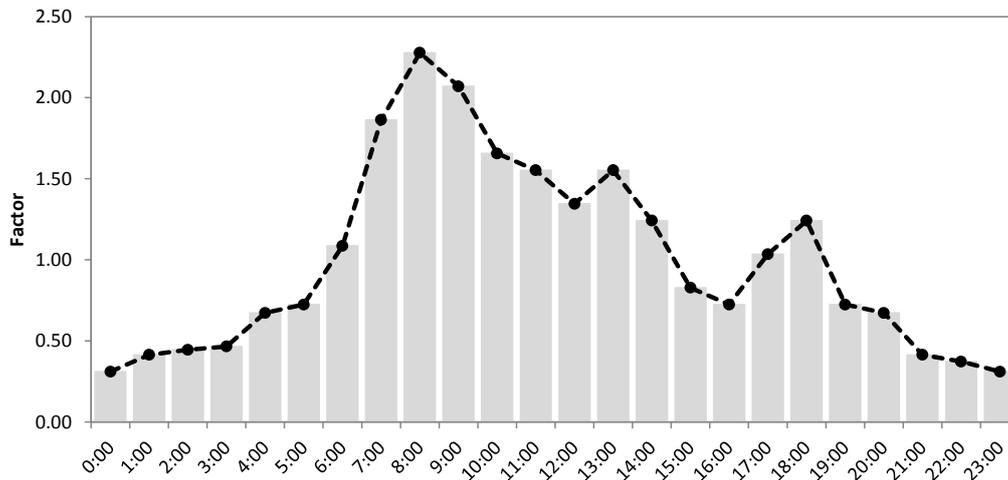


Fig. 2.2. Ejemplo de un patrón de consumo diario para un sistema con suministro continuo

Para determinar el coeficiente de modulación en cada hora o periodo de tiempo, se utiliza la relación:

$$C_t = \frac{Q_t}{Q_m}, \quad (2.1)$$

donde:

$C_t$  = Coeficiente de modulación

$Q_t$  = Caudal medio de cada hora

$Q_m$  = Caudal medio diario

### 2.5.1. Patrón de consumo en suministro intermitente

El suministro intermitente produce un patrón de consumo diferente al patrón del suministro continuo. De hecho, no existe un patrón de demanda; los depósitos domiciliarios de los usuarios se llenan cada vez que el sistema garantiza el agua (Battermann & Macke, 2001).

Como el caudal recibido en las viviendas depende de la carga de presión, esta situación genera grandes flujos en las primeras horas de suministro, aumentando las pérdidas de carga; por consiguiente, los consumidores ubicados en los puntos de suministro más alejados recibirán menos agua que los más cercanos a la fuente (Totsuka et al., 2004).

Según mediciones en el sistema de suministro intermitente por bombeo de Judayta (Jordania), realizadas en una campaña de registro de 12 zonas (M1 a M12) que duró dos días (Battermann & Macke, 2001), puede apreciarse la variación del consumo o caudal y la presión a lo largo del periodo de suministro (Fig. 2.3). Cuando comienza el suministro en las cuatro primeras zonas el segundo día, el sistema va ganando en presión progresivamente, debido a que va disminuyendo el consumo, o los depósitos domiciliarios se van llenando; se interrumpe el servicio y las presiones se reducen rápidamente a cero (Horas 40:00 del periodo de estudio o 16:00 del segundo día). Con respecto al caudal, la tendencia va del consumo de caudales grandes al inicio a caudales menores en las horas siguientes; por lo tanto, se observa el efecto de los depósitos de almacenamiento domiciliarios. Se observa que no existen picos de consumo como en los sistemas de suministro continuo, la curva de consumo varía de 13 a 19 l/s; gran parte del horario de suministro el caudal se mantiene entre 18 y 19

l/s. La razón de la disminución en el caudal es que la bomba se apaga por un periodo de tres horas; posteriormente, la bomba se conecta nuevamente y tanto la presión como el caudal aumentan hasta los niveles anteriores.

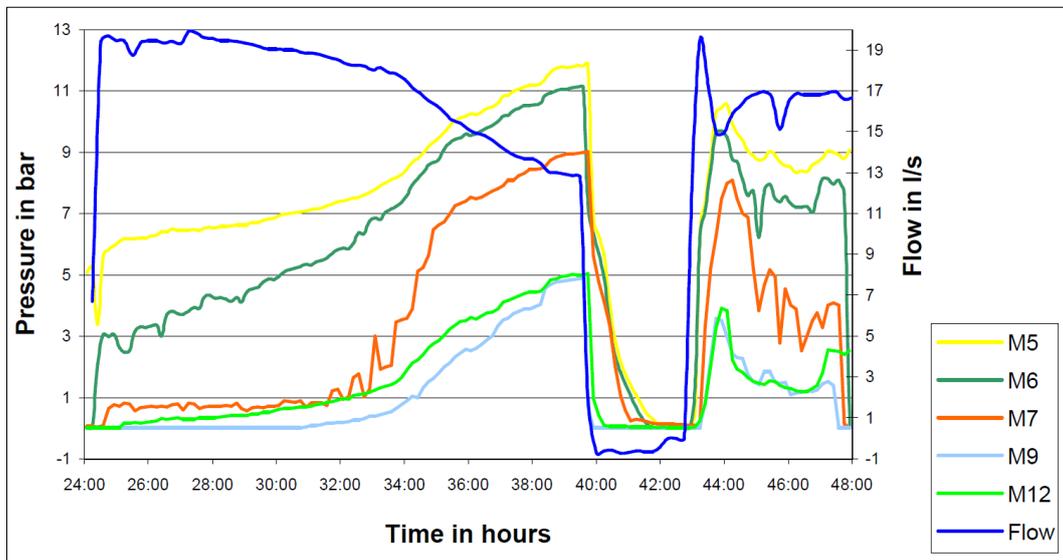


Fig. 2.3. Mediciones de presión y caudal realizadas en zonas de Judayta (Jordania), segundo día.

Fuente: Battermann & Macke (2001)

La laminación del consumo con un valor casi constante puede observarse durante las últimas diez horas de medición, donde se tienen un caudal constante de 18 l/s, ligeramente reducido en 2 l/s (Battermann & Macke, 2001).

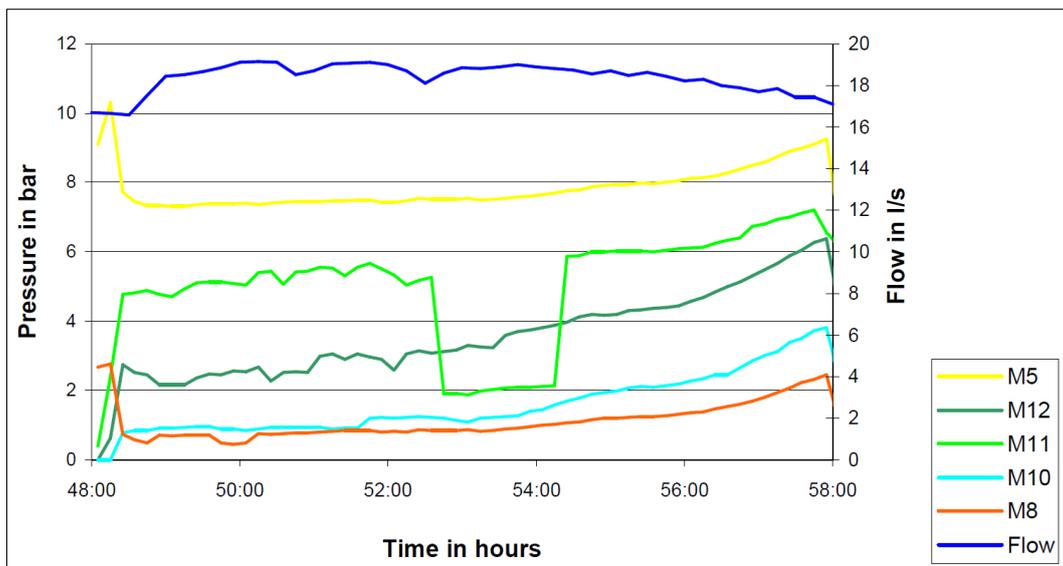


Fig. 2.4. Presión y caudal durante las 10 últimas horas de medición, Judayta (Jordania).

Fuente: Battermann & Macke (2001)

De forma general, la demanda de los usuarios es mucho más alta al iniciar el período de servicio (Chandapillai et al., 2012), lo cual reduce los niveles de presión en la red; en consecuencia, algunos usuarios son perjudicados en su suministro. La competencia entre usuarios genera que: los que se encuentran en posiciones ventajosas de mayor presión y/o baja altura, obtienen agua poco tiempo después del comienzo del período de servicio; mientras que los demás deben esperar mucho más tiempo, tras el llenado de la red (De Marchis et al., 2010).

Por lo expuesto, en un sistema de suministro intermitente, el patrón de suministro puede representarse como un bloque con caudales iniciales mayores que termina en caudales pequeños (suministro en varias horas). O también, puede simplificarse utilizando el valor medio del periodo de suministro, considerando que existe una variación del caudal de  $\pm 20\%$  a  $30\%$ . Esta curva puede ser simplificada por el efecto de laminación producida por los tanques de almacenamiento domiciliarios, pues la tendencia general es a un suministro constante u horizontal.

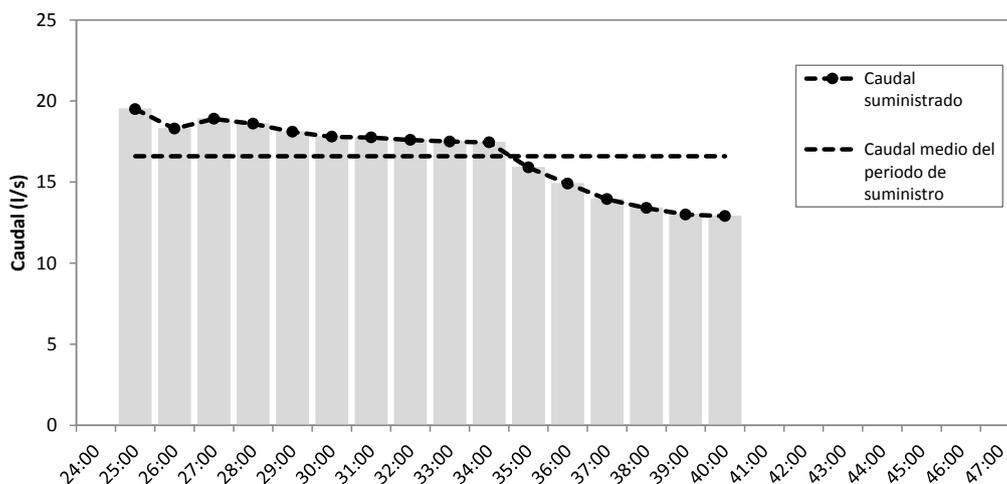


Fig. 2.5. Representación del suministro intermitente  
Adaptado del gráfico de Battermann & Macke (2001)

De esta forma, se tiene un bloque rectangular que representa el suministro en un sistema de abastecimiento intermitente:

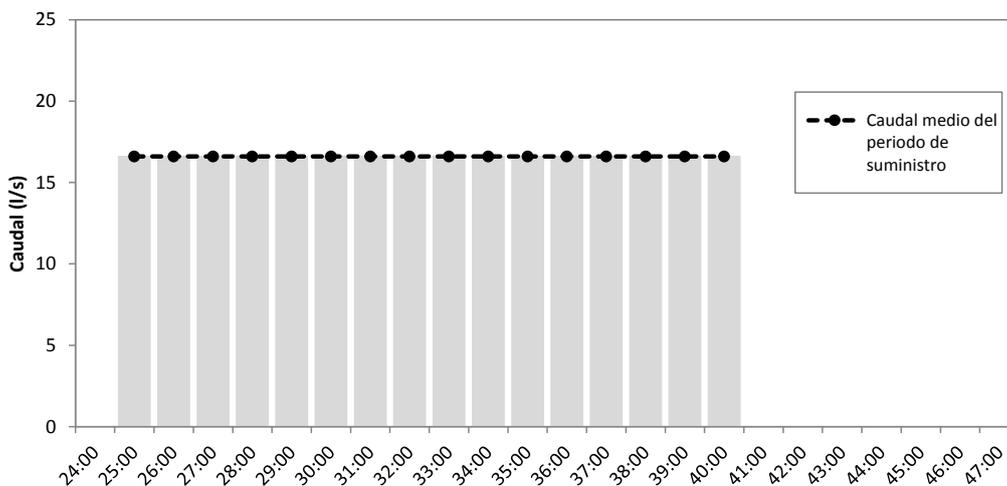


Fig. 2.6. Representación simplificada del suministro en sistemas intermitentes  
Adaptado del gráfico de Battermann & Macke (2001)

Esta simplificación permite calcular el caudal o volumen en cada hora, que representa el valor medio del consumo en el periodo de suministro. Por lo que se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Volumen por hora} = \frac{\text{Volumen diario}}{\text{Horas de suministro}}. \quad (2.2)$$

Algunos autores son más categóricos al afirmar que en redes con suministro intermitente no es necesario considerar variaciones horarias de la demanda, debido a que en el horario de servicio de una zona de la red el caudal suministrado es aproximadamente uniforme (Cabrera-Béjar et al., 2009).

Simplificando el patrón de suministro de un sector con suministro intermitente, puede utilizarse la siguiente relación que definiría los coeficientes de modulación o el factor pico (Cabrera-Béjar et al., 2009):

$$C_t = \frac{24}{\text{Horas de suministro}}. \quad (2.3)$$

El análisis detallado hasta aquí define el patrón de suministro en un sector de la red del suministro intermitente. Para establecer el patrón de suministro en toda la red, deben considerarse adicionalmente los horarios de suministro de cada uno de los sectores (Ilaya-Ayza et al., 2014).

## 2.6. Factor punta

El factor pico o punta relaciona el aumento de la demanda por encima del promedio anual, el cual se da durante periodos de tiempo especificados. Los factores pico se utilizan habitualmente como multiplicadores de la demanda media diaria; de esta forma se expresa la demanda en horas de máximo consumo (Mays, 2000). Las fluctuaciones de consumo son mayores en poblaciones pequeñas, y en las grandes el factor pico puede reducirse.

El factor pico toma en cuenta dos conceptos: la demanda máxima diaria o caudal máximo diario, que representa la demanda del día de mayor consumo del año, obtenido en base a registros anuales; y la demanda máxima horaria o caudal máximo horario, que es el consumo máximo producido en una hora durante un año de registros completo (Ministerio de Servicios y Obras Públicas de Bolivia, 2004). Generalmente, en sistemas de suministro existentes, estos valores son obtenidos de registros anuales; sin embargo, para el diseño de nuevos sistemas o ampliaciones, suele utilizarse un factor recomendado que relacionan estos consumos.

Como punto de partida se tiene al caudal medio diario, definido como el cociente entre el volumen de agua inyectado registrado o consumido en un período y el tiempo considerado; generalmente se toma un año como periodo de referencia y se utiliza el volumen acumulado con la cantidad total de días del año.

El caudal consumido por la población es variable a lo largo del día; para obtener el caudal máximo horario del día de mayor consumo, se multiplica el consumo de ese día por un factor ( $k_2$ ) que represente este incremento:

$$Q_{máxh} = k_2 \cdot Q_{máxd}, \quad (2.4)$$

donde:

$Q_{máxh}$  = caudal máximo horario

$k_2$  = coeficiente de caudal máximo horario

$Q_{máxd}$  = caudal máximo diario

Asimismo, el caudal medio diario no se mantiene constante a lo largo de todo el año, sino que varía de un día a otro. El consumo es distinto de un día laborable y uno festivo, un día frío de invierno que un día de verano. Como la red debe calcularse para asegurar el suministro bajo cualquier estado de carga, es necesario utilizar la situación más desfavorable, esto es, el día de mayor consumo de todo el año. Para tener en cuenta la variación del consumo a lo largo del año se utiliza otro coeficiente, de manera que el caudal medio del día de mayor consumo se obtiene como producto del caudal medio por dicho coeficiente ( $k_1$ ):

$$Q_{máxd} = k_1 \cdot Q_m \quad (2.5)$$

$Q_{máxd}$  = caudal máximo diario

$k_1$  = coeficiente de caudal máximo diario

$Q_m$  = caudal medio diario

El caudal máximo demandado por la red a lo largo de todo el año será el caudal pico del día de mayor consumo; combinando ambos incrementos se tiene:

$$Q_{máxh} = k_1 \cdot k_2 \cdot Q_m \quad (2.6)$$

Representando ambos factores como un solo factor pico ( $k_p$ ):

$$Q_{máxh} = k_p \cdot Q_m \quad (2.7)$$

En general, el factor punta es inversamente proporcional al número de viviendas o al tamaño de la población; cuanto mayor sea el tamaño de la población se tiene mayor laminación de los picos de consumo; y en poblaciones pequeñas se tenderá a un mayor valor del factor pico. Al aumentar el número de consumidores, la probabilidad de simultaneidad del consumo se reduce; de esta forma, la diferencia entre el caudal punta y el caudal medio es pequeña.

### 2.6.1. Factor punta en suministro intermitente

En un sistema de suministro intermitente, se tienen tres elementos que influyen en el valor del factor pico: la existencia de depósitos domiciliarios, las pocas horas de suministro y la simultaneidad de los horarios de suministro en redes sectorizadas (Ilaya-Ayza et al., 2014). La presencia de depósitos intermedios entre la red y los consumidores provoca una mayor laminación de las puntas, puesto que los usuarios consumen el agua almacenada en estos depósitos, mientras que la función de la red de distribución es llenar dichos depósitos. En escenarios con servicio continuo en los que existen tanques o depósitos domiciliarios, el factor pico tiende a reducirse; sin embargo, en sistemas de suministro intermitentes con reducidas horas de servicio, el factor pico se incrementará.

Debido a la naturaleza intermitente de la oferta, la demanda de agua en los nudos de la red no se basa en las variaciones diarias de la demanda, como sucede en los sistemas continuos; los sistemas

intermitentes limitan la cantidad máxima de agua que puede ser recolectada y almacenada durante las horas de suministro, por lo que es frecuente que la cantidad de agua suministrada a menudo esté por debajo de las necesidades reales de los usuarios (Vairavamoorthy et al., 2001); por estas razones, es lógico suponer que los consumidores aprovechan el agua del sistema de distribución durante toda la duración de la oferta; este volumen será totalmente dependiente de la presión disponible en las tuberías principales.

En países en vías de desarrollo los sistemas con suministro continuo son diseñados con factores pico de 2 a 3; sin embargo, cuando trabajan bajo suministro intermitente el pico puede crecer en demasía. Los sistemas de abastecimiento intermitentes producen factores picos en la distribución que generan posteriormente presiones bajas (Andey & Kelkar, 2009); cuantas menos sean las horas de suministro, más grandes serán los factores pico. Otro elemento que debe ser tomado en cuenta es la simultaneidad de los horarios de suministro en redes sectorizadas, pues ésta produce factores punta grandes (Ilaya-Ayza et al., 2014).

## **2.7. Características hidráulicas de sistemas de suministro intermitente**

El diseño de sistemas de distribución de agua, generalmente, parte del supuesto de suministro continuo; sin embargo, cuando se tiene un suministro intermitente las condiciones hidráulicas de funcionamiento cambian; esta situación genera pérdidas de presión y gran desigualdad en la distribución del agua (Vairavamoorthy et al., 2001).

Existe abundante literatura para la planificación, diseño, operación y mantenimiento de los sistemas de suministro continuo, mientras que el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento intermitente se basa principalmente en la experiencia y el análisis de la oferta y la demanda de agua (Faure & Pandit, 2010).

Cuando se tienen infraestructuras diseñadas para suministro continuo y se las usa para suministro intermitente, esto se traduce en el transporte de mayores caudales que los esperados por las tuberías; en consecuencia, se producen grandes pérdidas de carga en la red; los consumidores más alejados de los puntos de suministro son los más afectados, debido a que no pueden abastecerse con una cantidad suficiente de agua durante las primeras horas de suministro, cuando todos están consumiendo agua.

### **2.7.1. Equidad en el suministro**

En general, un diseño óptimo será aquel que pueda suministrar cantidades suficientes de agua a los consumidores con presiones adecuadas al menor costo. En países desarrollados donde existe una cantidad suficiente de agua, el objetivo del diseño es encontrar el sistema de menor costo que proporcione una presión por encima de un valor mínimo especificado. Sin embargo, en los países en vías de desarrollo donde se usan sistemas de suministro intermitente, este objetivo no es el adecuado; debería buscarse que la cantidad limitada de agua se distribuya de la manera más justa y equitativa posible (Vairavamoorthy et al., 2001). Buscar la equidad en el suministro de agua es uno de los mayores problemas del suministro intermitente (Gottipati & Nanduri, 2014).

Los principales factores que intervienen en la equidad del suministro son: presiones en los nudos, caudales de suministro, velocidades, diferencias de elevación, el tamaño del área de suministro (Manohar & Kumar, 2014), la configuración de la red y la ubicación de las fuentes de suministro (Gottipati & Nanduri, 2014). Asimismo, Vairavamoorthy et al. (2008) incluyen como elementos a tomar

en cuenta para mejorar la equidad de suministro: la duración de la oferta, el horario de la oferta, el tipo de conexión y la ubicación de la conexión.

Si un sistema de agua potable es diseñado considerando la equidad del suministro, la gravedad de la escasez del agua puede ser reducida (Chandapillai et al., 2012).

## 2.7.2. Demanda dependiente de la presión

Convencionalmente, se ha optado por el análisis DDA (*Demand Driven Analysis*) para resolver problemas hidráulicos de redes. Esta técnica supone que la cantidad de agua requerida a lo largo de las tuberías se conoce y estas pueden ser agrupadas en un punto de demanda (nudos de la red); por lo tanto, se obtiene el comportamiento del sistema calculando presiones y caudales; la resolución de las ecuaciones se basa en valores fijos de demanda en los nudos. En este tipo de análisis, cualquier relación entre la demanda y la presión es ignorada y las demandas son siempre satisfechas aunque las presiones en los nudos del modelo matemático puedan llegar a estar por debajo de cero; esto implica que los consumidores pueden tener un suministro normal con presiones bajas e incluso negativas. Obviamente, esta hipótesis no es realista y representa la principal deficiencia de los enfoques DDA (Cheung et al., 2005), (Gottipati & Nanduri, 2014).

Entonces, un modelo de distribución de agua convencional se crea mediante el uso de la formulación del enlace de nudos, basados en leyes de conservación, balance de masa en nudos y conservación de energía alrededor de un circuito hidráulico. El nudo es un punto en el que se asigna el consumo de agua, que se define como demanda; como es un valor conocido, la carga hidráulica en el nudo puede resolverse. Sin embargo, esta formulación es válida sólo si las presiones hidráulicas en todos los nudos son las adecuadas para que la demanda sea independiente de la presión (Wu et al., 2006). En muchos casos la presión nodal no es suficiente para satisfacer la demanda deseada; por ejemplo, cuando existen caudales grandes consumo en incendios, fallas de equipos de bombeo o rotura de tuberías (Gupta & Bhave, 1996); en estas situaciones la demanda pasa a depender de la presión, a este enfoque se lo conoce como PDD (*Pressure Dependent Demand* o *Pressure Driven Demand*).

Por ejemplo, cuando se produce un corte de energía en un sistema de suministro continuo, las presiones nodales se ven afectadas y algunos sectores pueden tener una presión insuficiente, la cual puede caer por debajo de un nivel de referencia; la presión de referencia es aquella que garantiza el suministro con el 100% de la demanda deseada o de referencia (Wu et al., 2006).

En sistemas con suministro intermitente, la cantidad de agua suministrada a los usuarios depende de la presión disponible en la red (Gottipati & Nanduri, 2014).

La relación PDD está definida por una función potencial y un tramo lineal (Gupta & Bhave, 1996), (Wu et al., 2006), las relaciones son las siguientes:

$$\begin{aligned} 0 & H_i \leq 0 \\ \frac{Q_i^s}{Q_{ri}} &= \left( \frac{H_i}{H_{ri}} \right)^\alpha & 0 < H_i < H_t, \\ \left( \frac{H_i}{H_{ri}} \right)^\alpha & & H_i \geq H_t \end{aligned} \quad (2.8)$$

donde:

$H_i$  = presión calculada en el nudo

$Q_{ri}$  = demanda de referencia o demanda solicitada en el nudo

$Q_i^s$  = demanda calculada en el nudo

$H_{ri}$  = presión de referencia que se considere para abastecer la demanda total solicitada o de referencia

$H_t$  = límite de presión; por encima de este valor la demanda es independiente de la presión del nudo

$\alpha$  = exponente de la relación de demanda/presión

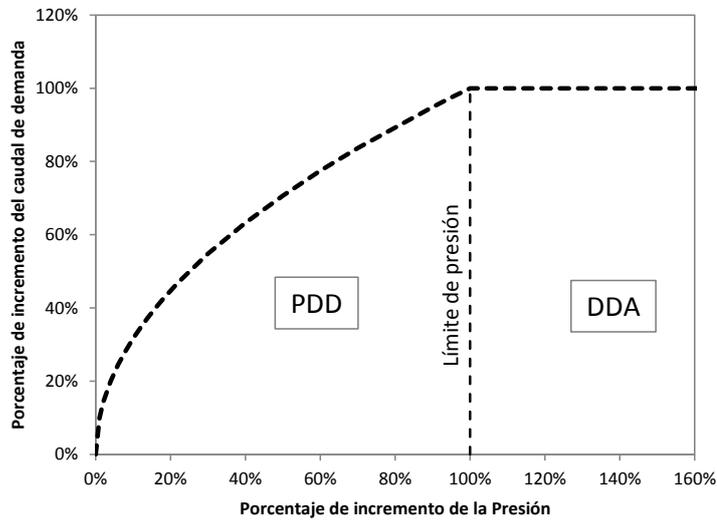


Fig. 2.7. Curva típica de la Demanda Dependiente de la Presión (PDD)

Adaptado de Wu et al. (2006)

Según Gupta & Bhawe (1996), la relación parabólica entre la demanda y la presión es la que mejor se ajusta en el cálculo PDD.

A diferencia del modelo de distribución de agua convencional, donde la demanda en el nudo es un valor conocido, en el enfoque de modelización de la demanda dependiente de la presión (PDD), se establece que tanto la demanda como la presión en el nudo son valores desconocidos.

Este enfoque puede ser incluido en el algoritmo global de gradiente (GGA) (Todini & Pilati, 1988), Wu et al., (2006) estableciendo la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{12} \\ \dots & \ddots & \dots \\ A_{21} & \dots & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ \dots \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10}H_0 \\ \dots \\ -q \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Es añadida una nueva matriz diagonal  $A_{22}$ :

$$A_{22}(i,i) = Q_i^s \quad (2.10)$$

La formulación de la demanda dependiente de la presión se puede resolver como:

$$\begin{bmatrix} D_{11} & \dots & A_{12} \\ \dots & \ddots & \dots \\ A_{21} & \dots & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dQ \\ \dots \\ dH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dE \\ \dots \\ dq \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

La única diferencia del método GGA original es la nueva matriz diagonal  $D_{22}$ , que ingresa a cambio de  $A_{22}$ , con las siguientes características:

$$D_{22}(i,i) = \begin{cases} 0 & H_i \leq 0 \\ \alpha \left( \frac{H_i}{H_t} \right)^{\alpha-1} \cdot Q_i & 0 < H_i < H_t \\ 0 & H_i \geq H_t \end{cases} \quad (2.12)$$

### 2.7.3. Presencia de aire en las tuberías con suministro intermitente

El problema de la presencia de aire en los sistemas de suministro intermitente se produce debido a que existen horas en las cuales no hay suministro; estas interrupciones y la salida de agua como parte del consumo de clientes aguas abajo, por juntas, válvulas, acometidas u otros sectores en los cuales existen fugas, llegan a producir presiones manométricas negativas en los puntos máximos relativos y con ello la presencia de aire atrapado en la tubería.

El aire también ingresa a las tuberías cuando se pone en servicio el sistema por primera vez o cuando las tuberías han sido vaciadas por cualquier causa, por ejemplo, tras una reparación.

El aire en las tuberías de agua aparece principalmente como bolsones grandes y estacionarios o como burbujas grandes o pequeñas móviles. Cuando el aire se junta en diferentes partes de la tubería sin moverse el paso del agua puede ser obstruido al punto de impedir el flujo de agua, o bien el agua circulará escurriéndose por debajo de los bolsones de aire (Corcos, 2003).

El aire atrapado se constituye en un problema, debido a que puede ser la causa de roturas de la tubería; si existe una bolsa de aire atrapada entre dos masas de agua, esta puede ser comprimida por el movimiento de la masa aguas arriba y la inercia al movimiento de la que se encuentra aguas abajo; de esta forma la bolsa de aire se comprimirá hasta conseguir presiones grandes y, finalmente, lograr mover la columna aguas abajo. Sin embargo, esta presión grande puede dañar seriamente a la tubería; el aire atrapado debe ser desalojado de la tubería con mucho cuidado. Según (Izquierdo et al., 1999) las causas de sobrepresión en las tuberías debidas a la presencia de aire pueden darse debido a:

- El choque violento entre dos columnas de agua, antes separadas por una columna de aire atrapado que ha sido purgada de la conducción con excesiva rapidez.
- El choque de la columna de agua que avanza con la propia ventosa que, al presentar al movimiento y expulsión del aire una resistencia muy inferior a la que ofrecería a una columna análoga de agua, cierra bruscamente cuando el aire ya ha sido purgado en su totalidad.

## 2.8. Modelización y simulación

Simulación es el proceso en el cual se utiliza una representación matemática de un sistema real, denominado modelo; de esta forma, se replica la dinámica del sistema existente o propuesto

(Walski et al., 2003); se realiza la simulación cuando no es práctico para el sistema real ser sometido directamente a la experimentación, o con el propósito de evaluar un sistema antes de que se construya.

Las simulaciones pueden ser utilizadas para predecir las respuestas del sistema ante eventos con un alto espectro de condiciones sin producir interrupciones en el sistema real; asimismo, se pueden evaluar soluciones sin realizar inversiones de tiempo, dinero y materiales, necesarias para un proyecto real.

La modelización matemática y la simulación de redes de agua es muy importante en el proceso de diseño, operación o mantenimiento de un sistema de suministro de agua potable; el modelo ayuda en la representación de estos sistemas que tienen una topología compleja, crecimiento y cambio frecuente, además de un gran tamaño.

La simulación de la red de distribución de agua es útil para varios propósitos (Walski et al., 2003), entre ellos:

- Planificación a largo plazo, que incluye el desarrollo de la red y la rehabilitación
- Estudios de protección contra incendios
- Investigaciones de calidad del agua
- Gestión de la energía
- Diseño de sistemas
- Uso y operación de sistemas de suministro, capacitación de operadores, respuesta ante emergencias y solución a problemas.

Los modelos matemáticos utilizados para los sistemas de suministro de agua son del tipo estático y dinámico; cuando son dinámicos, los modelos pueden ser inerciales y no inerciales.

### **2.8.1. Modelos de análisis estático**

Son denominados también como modelos en régimen permanente, calculan las variables para un instante definido en base a unas condiciones dadas (Abreu et al., 1995), (Izquierdo et al., 2004), (Iglesias et al., 2010), no toman en cuenta las variaciones temporales que puedan tener variables como: la demanda, las presiones, niveles en los depósitos y otros.

### **2.8.2. Modelos de análisis dinámico**

Se los conoce también como modelos de análisis en régimen transitorio, en este tipo de modelos se introduce la variable temporal que afecta a las variables y los resultados (Abreu et al., 1995), (Izquierdo et al., 2004); a su vez, se clasifican como:

#### **2.8.2.1. Modelos no inerciales**

En este modelo se desprecia la inercia del fluido en el sistema; es dinámico porque se dispone de una serie de condiciones de contorno variables con el tiempo (Abreu et al., 1995), (Izquierdo et al., 2004), (Iglesias et al., 2010), pero el análisis para cada momento es estático. Por estas condiciones de

cálculo también es denominado cuasi-estático o modelo de simulación en periodo extendido; es la forma de cálculo más extendida en software para el análisis de redes de distribución de agua (EPANET, WATERCAD).

### 2.8.2.2. Modelos inerciales

Estos modelos sí consideran la inercia del fluido en movimiento; son utilizados para analizar operaciones bruscas en el sistema. Este tipo de modelos se divide a su vez en dos: elástico, en el cual se considera la elasticidad tanto del fluido como de la conducción; y rígido, que no toma en cuenta la elasticidad del fluido ni de la conducción (Abreu et al., 1995), (Izquierdo et al., 2004).

### 2.8.3. El proceso de modelización

La modelización es un proceso iterativo, donde cada uno de los procesos debe ser dividido en sus componentes para trabajar paso a paso.

Para el desarrollo de cualquier modelización de un sistema de suministro, primeramente debe lograrse un consenso dentro la misma empresa operadora de la red, analizando la necesidad del modelo y los objetivos que se quieren conseguir a corto y largo plazo; será importante tener el compromiso de toda la empresa, desde ejecutivos hasta los trabajadores, apoyando con tiempo, recursos humanos y financieros; la modelización no debe ser vista como un esfuerzo aislado del personal encargado, sino más bien, como una tarea de toda la empresa donde el modelador es la pieza clave.

Cuando el modelo es aceptado por su utilidad, continúan las decisiones sobre la extensión del modelo, esqueletización y calibración del mismo.

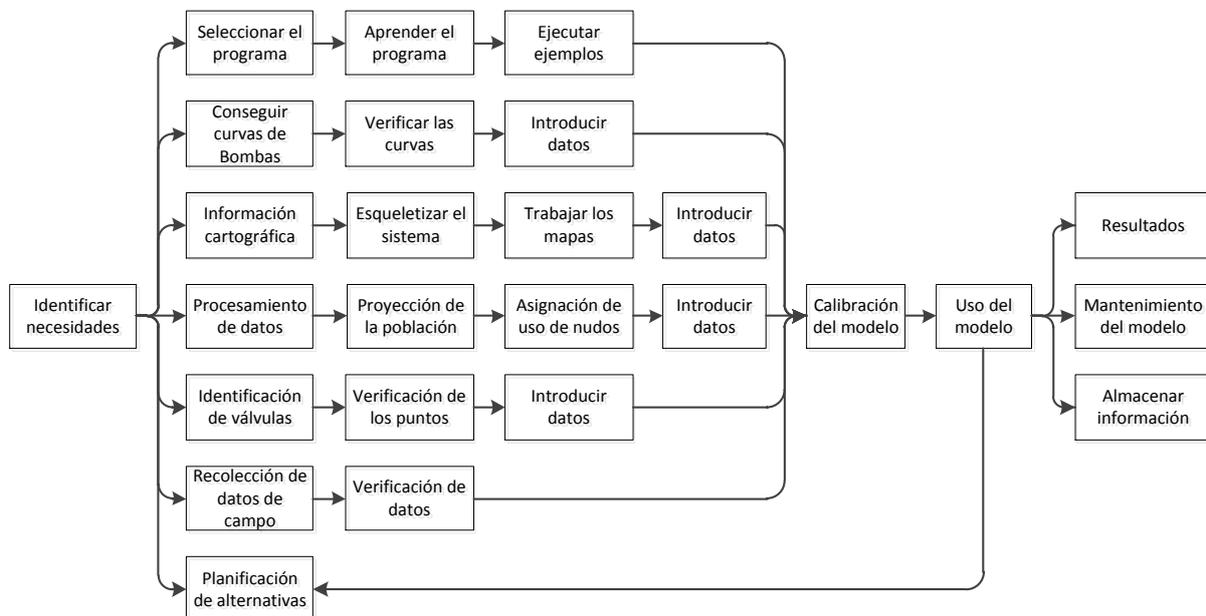


Fig. 2.8. Diagrama de flujo del proceso de modelado

Fuente: Walski et al. (2003)

Según Walski et al. (2003), la mayor parte del trabajo en la modelización se debe hacer antes de que el modelo pueda ser utilizado para resolver problemas reales; por esta razón, es muy importante tiempo y presupuesto suficientes.

La elaboración del modelo implica una serie de abstracciones; en primer lugar las tuberías, bombas y otras instalaciones existentes son representadas en mapas y dibujos; posteriormente estos mapas son convertidos en un modelo que representa las instalaciones como enlaces y nudos. Adicionalmente, debe introducirse al modelo el comportamiento de los nudos descrito matemáticamente. Entonces, se resuelven las ecuaciones del modelo, cuyas soluciones generalmente se muestran en mapas o tablas. Un modelo es valioso en la medida que represente las abstracciones que faciliten el diseño eficiente de las mejoras del sistema o de un mejor funcionamiento del sistema existente.

Debe considerarse que el proceso de modelización incluye la etapa de esqueletización, en la cual la red es simplificada; de esta forma, es frecuente que muchos usuarios individuales deban asignarse a un mismo nudo de la red. Esto supone en cierta medida un promedio o ponderación espacial de los consumos, debido a que los criterios de cálculo de caudales en los nudos suelen estar basados en parámetros espaciales, como la calle o la manzana donde reside cada cliente. Del mismo modo, conforme se calcula un modelo, se sigue produciendo una suavización de los consumos; avanzando hacia aguas arriba las tuberías van abasteciendo a un número de usuarios cada vez mayor (Walski et al., 2003).

En función de los objetivos perseguidos por el modelo, puede utilizarse un modelo dinámico o en periodo extendido (cuasi-estático), por ejemplo, en sistemas de suministro continuo en los que se quiere conocer la regulación óptima de la red; en este caso será necesario tener un conocimiento muy preciso del funcionamiento de la red a lo largo de periodos de tiempo largos, por lo que se requerirán curvas de modulación de la demanda en cada nudo.

Por otra parte, si el objetivo del modelo es estudiar la vulnerabilidad de la red frente a situaciones excepcionales o simplemente en una situación futura, será necesario disponer de un conocimiento general de la misma en dichas situaciones. Se estudiará por tanto un escenario probable de funcionamiento de la red. En estos casos, rara vez se utilizan modelos dinámicos, sino que se utiliza un modelo estacionario o estático con una asignación de cargas basada en unas demandas calculadas para dicho escenario (Walski et al., 2003).

Dependiendo del modelo, se pueden calcular variables como presiones en nudos, caudales y velocidades de flujo, cambios en el nivel de agua del tanque, calidad y otros atributos. La calidad de los elementos de ingreso impacta directamente en la calidad y exactitud de los resultados de la simulación. Por ello, es esencial ajustar la calidad de los parámetros de los datos ingresantes a las tareas deseadas del modelo y lograr un equilibrio entre los esfuerzos de adquisición de datos y el valor informativo de los resultados del modelo.

Los parámetros del modelo, para los esfuerzos y calidad de adquisición de datos, se pueden clasificar de la manera siguiente:

- Parámetros que se pueden medir directa y exactamente (por ejemplo la ubicación de la red de tubos, las geometrías de los tanques, las características de las bombas y los controles del sistema).
- Parámetros que se pueden medir directamente, pero con exactitud insuficiente (por ejemplo consumo de agua de los consumidores domésticos).

- Parámetros que no se pueden medir directamente (por ejemplo rugosidad del tubo, diámetro interno, pérdidas de agua).

El último grupo de parámetros del modelo se puede determinar a través de la calibración del modelo.

#### **2.8.4. Calibración del modelo**

La calibración del modelo se describe como el proceso de comparar condiciones reales, medidas del sistema, con resultados del modelo simulado, bajo las mismas condiciones de contorno. El modelo tiene que ajustarse hasta que las discrepancias entre la realidad y los resultados simulados se minimicen.

El proceso de calibración usualmente involucra los parámetros de rugosidad del tubo, consumo de agua, pérdidas de agua y controles del sistema, y se asigna la mayor importancia a la rugosidad del tubo (Walski et al., 2003).

En la mayoría de casos, se determina la rugosidad integral de la red; este factor comprende no solamente la rugosidad real del tubo, sino también la pérdida de carga local y la reducción de diámetros internos debido a las incrustaciones y sedimentación así como a factores desconocidos (por ejemplo, válvulas parcialmente cerradas o información incorrecta sobre los diámetros).

En sistemas de suministro continuo se realizan pruebas de flujo contra incendios, utilizadas para determinar el flujo y los datos de presión: estas pruebas generalmente consisten en seleccionar y aislar una sección de tubo de medición en donde se induce el flujo abriendo un hidrante contra incendios. Se toman simultáneamente las mediciones de flujo y presión cuando la sección del tubo alcanza condiciones de flujo constantes. Los sistemas SCADA también son una buena fuente de datos para la calibración del modelo.

Antes del proceso de simulación se debe obtener una simulación fiable del estado de la red en el o los instantes de medidas; para lo cual es necesario hacer funcionar el modelo en el programa de simulación, comprobar que la conectividad de los elementos es la correcta y que los resultados son lógicos en un modelo sin ajustar.

Para el proceso de calibración, las técnicas se basan en la experiencia del proyectista y en métodos matemáticos que utilizan técnicas de optimización con el fin de reducir el error entre los valores medidos y los resultados de la simulación.

#### **2.8.5. Simulación y modelización en sistemas con suministro intermitente**

La modelización en sistemas de suministro intermitente es una tarea difícil; debe considerarse que la red de tuberías no está presurizada por completo en los primeros minutos de suministro; en consecuencia, las presiones son muy bajas; las horas limitadas de suministro por día y los puntos de consumo conectados a tanques de almacenamiento domiciliarios generan el vaciado y llenado frecuente de las tuberías, complicando la modelización dinámica con software convencional (Ingeduld et al., 2006).

Un modelo dinámico del sistema de suministro de agua intermitente necesitaría simular el proceso de carga en las tuberías; se requeriría la integración de la ecuación de momento y la ecuación de velocidad para conocer las posiciones de la primera línea de agua en la red en cualquier momento (Battermann & Macke, 2001), (De Marchis et al., 2010). Se estimó que este tiempo es de

aproximadamente 20 a 30 minutos, después del cual el suministro se reanuda con tuberías llenas en un estado presurizado (Ingeduld et al., 2006).

Entre los planteamientos para resolver esta dificultad, destaca la solución propuesta por (Cabrera-Béjar & Tzatchkov, 2009), en la cual se propone utilizar SWMM (*Storm Water Management Model*) para modelar la carga inicial de las tuberías y, posteriormente, EPANET para el estado presurizado de la red.

Anteriormente, (Vairavamoorthy et al., 2000) desarrollaron cuatro componentes para modelar el suministro intermitente de agua:

- Modelo de Demanda
- Modelo de Red Secundaria
- Modelo de carga de red
- Modificación del método de análisis de red

Aunque este enfoque es muy sofisticado y puede proporcionar buenos resultados, requiere de software especializado.

Otros enfoques parten del principio de sustituir las demandas con depósitos de almacenamiento (Battermann & Macke, 2001); de esta forma se logra el modelo de demanda dependiente de la presión; para este fin se utilizaron los software EPANET y ArcView. Se usó el mismo criterio para la simulación de las fugas, considerando un tanque de almacenamiento adicional. La descripción de este modelo es ampliada a continuación:

- En este modelo, el tamaño de los depósitos depende de si la red es modelada hasta el nivel de conexión de la vivienda individual o no; si se llega hasta las viviendas, se utilizan los volúmenes de los tanques de almacenamiento reales en cada vivienda. Cuando se quiere utilizar un nudo, como en los sistemas continuos, esta metodología plantea el uso de un depósito ubicado en el centro de gravedad de los usuarios considerados.
- El caudal de llenado de los depósitos individuales depende principalmente de la pérdida de carga a través de la tubería que conecta al mismo a la red. En el caso de que se utilicen depósitos como nudos, será necesario graduar el diámetro de la tubería de conexión dependiendo del tamaño del depósito utilizado.
- El modelo dinámico de suministro intermitente está relacionado con la presión de servicio en base a los siguientes elementos: la demanda de los usuarios es dependiente de la presión, debido a la instalación de depósitos de almacenamiento domiciliarios y las fugas, que dependen de la presión.
- Debido a que las fugas están relacionadas con la presión, cuando no se tenga agua en la tubería las pérdidas serán mínimas.
- El modelo elaborado por Battermann & Macke (2001) considera la implementación de depósitos conectados a la red con tuberías cortas de diámetro pequeño; de esta forma se relaciona la pérdida o fuga con la presión; a diferencia de los depósitos utilizados en la modelización del consumo doméstico, los depósitos utilizados para modelar las fugas no

deben llenarse por completo, la fuga sólo debería estar limitada por la pérdida de carga a través de la tubería de conexión.

El modelo planteado por Battermann & Macke (2001) tiene las siguientes limitaciones:

- No se consideró el consumo real, debido a que no se modela los depósitos de almacenamiento domiciliarios.
- No existe el soporte para tuberías vacías o parcialmente llenas en la etapa de llenado.
- Las demandas se asignan a la tubería más cercana, lo que podría ser diferente en la realidad.
- La consideración de la distribución espacial desigual de fugas requiere procesamiento adicional.

Mohapatra et al. (2014) usan reservorios artificiales en los puntos de demanda; para replicar el exceso de consumo. La conexión de la red a estos reservorios se realiza a través de una tubería equivalente, que sustituye a las tuberías que conectan las viviendas al nudo; esta tubería incluye una válvula antirretorno que no permite la inyección de agua del reservorio cuando se presentan presiones bajas. El diámetro de la tubería equivalente es calculado mediante la ecuación que plantea Walski et al. (2003) para el proceso de esqueletización para remover tuberías en paralelo:

$$D_r = \left( \frac{L_r^{0.54}}{C_r} \cdot \sum \frac{C_i \cdot D_i^{2.63}}{L_i^{0.54}} \right)^{0.38} \quad (2.13)$$

donde:

$D_r$  = diámetro de la tubería equivalente,

$L_r$  = longitud de la tubería equivalente,

$C_r$  = coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams de la tubería equivalente,

$D_i$  = diámetro de la tubería individual conectada al usuario,

$L_i$  = longitud de la tubería individual conectada al usuario,

$C_i$  = coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams de la tubería individual conectada al usuario.

Una de las desventajas del proceso planteado es su difícil implementación en redes grandes (Mohapatra et al., 2014).

Entre los procedimientos más interesantes de análisis dinámico para sistemas con suministro intermitente, se encuentra el elaborado por De Marchis et al. (2010), propuesto para la red de Palermo (Italia). Se plantea un modelo de análisis que considera el proceso de llenado inicial para este tipo de suministro, en base a la hipótesis de que la presión del aire dentro de la red es siempre igual a la presión atmosférica y que la columna de agua no puede ser fragmentada. La velocidad inicial del frente de agua, cuando se abre una válvula en una tubería previamente vacía, puede ser grande debido al gradiente de presión alto entre la presión atmosférica y la presión del agua. Se utiliza el método de las características, que incluye las propiedades tanto de la tubería como del agua. Asimismo, se considera que los depósitos modifican el patrón de consumo; la demanda de los usuarios es mucho

más alta de lo normal al comienzo del periodo de suministro, reduciendo el nivel de presión de la red, perjudicando a los usuarios más desfavorecidos.

## 2.9. Pérdidas de agua en el sistema de abastecimiento

La pérdida de agua en el sistema de abastecimiento es un problema crítico con el que tropiezan las empresas o entidades del sector; muchas veces este problema pasa desapercibido porque la deficiencia de agua en el sistema se soluciona de la forma más “sencilla”, buscando nuevas fuentes de abastecimiento, cuando la reducción en estas puede generar un caudal adicional que ya tiene el tratamiento y la calidad necesaria para el abastecimiento a la población.

La cantidad de agua que se pierde en un sistema de suministro de agua es un indicador importante que muestra la evolución positiva o negativa de la eficiencia de la distribución del agua; el aumento en los volúmenes anuales de pérdidas de agua es un indicador que muestra una construcción y planificación ineficientes; deficiencias en las tareas de operación y mantenimiento deberían ser el detonante para el inicio de un programa de control activo de fugas (Lambert & Hirner, 2000).

Las pérdidas de agua pueden darse en cualquier parte del sistema de agua potable: obras de toma, aducciones, plantas de tratamiento, depósitos de almacenamiento, estaciones de bombeo y redes; sin embargo las pérdidas de agua en estas últimas representan la mayor cantidad y son las más difíciles de encontrar.

Una red libre de pérdidas no es un objetivo técnico o económico realizable; un bajo nivel de pérdidas de agua no se puede evitar, incluso en las mejores condiciones de operación y mantenimiento en aquellos sistemas en los que se da mucha atención al control de la pérdida de agua (Lambert & Hirner, 2000), (Hamilton et al., 2006).

### 2.9.1. Pérdidas de agua en la red de distribución

La enorme cantidad de agua perdida por fugas en las redes de distribución de agua (pérdidas físicas o reales de agua) y los volúmenes de agua distribuidos sin facturación o sin medir ni cobrar (pérdidas de agua aparentes) son elementos que complican la situación del suministro de agua en las empresas encargadas del suministro de agua potable.

Las pérdidas de agua generan los siguientes impactos negativos (Ziegler et al., 2012):

- **En el ámbito económico:** las pérdidas implican costes adicionales, producto del agua y la energía que se pierden en la captación, bombeo, tratamiento y distribución del agua, agua que no llegará al consumidor y tampoco será facturada. Generalmente, las roturas y reventones de tuberías necesitan obras de reparación caras; asimismo, resultan ser un grave inconveniente cuando causan daños considerables a la infraestructura adyacente, generando costes adicionales.
- **En el ámbito técnico:** producto de las pérdidas reales o fugas; se reduce la cantidad de agua disponible en el sistema, lo cual incide en la reducción de la cobertura; si la situación se agrava puede dar paso a un suministro intermitente.
- **En el ámbito social:** los inconvenientes técnicos, como presiones bajas, interrupciones del servicio, inequidad en el servicio y los riesgos en la calidad del agua (producto de la presencia de fugas) pueden producir molestias en la población. Uno de los inconvenientes

más peligrosos para la salud de la población es el riesgo de contaminación, debido al ingreso de agua contaminada a la red a través de las fisuras, por donde se producen las fugas, en horas de presiones bajas o negativas.

- **Impacto ambiental:** una solución habitual para compensar las pérdidas de agua es el incremento del caudal de suministro, buscando nuevas fuentes de abastecimiento, lo cual implica una mayor extracción de agua, incorporando presión adicional sobre los recursos hídricos de la zona, utilizando energía adicional y causando indirectamente emisiones de dióxido de carbono.

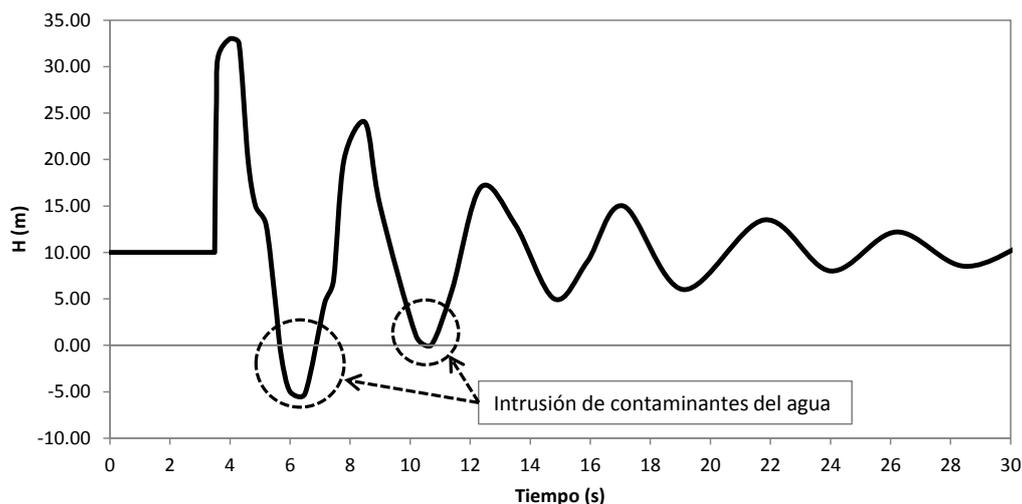


Fig. 2.9. Riesgo de contaminación del agua durante un transitorio

Fuente: Brunone & Ferrante (2004).

Las pérdidas de agua pueden calcularse para todo el sistema; también, para subsistemas o partes del sistema de suministro, como las líneas de conducción de agua desde la fuente, las tuberías principales y redes de distribución. En cada caso, serán componentes del cálculo las pérdidas reales y aparentes.

La experiencia internacional muestra que la mayor parte de las pérdidas se produce en las conexiones de servicio, más que en la red, excepto en zonas de baja densidad de conexiones (Lambert & Hirner, 2000).

Las pérdidas de agua se constituyen en un problema muy crítico, que puede llevar a sistemas con suministro continuo a tener suministro intermitente debido a la reducción del volumen suministrado (Ziegler et al., 2012).

## 2.9.2. Pérdidas reales

Las pérdidas reales o físicas están influenciadas por muchos factores, entre los cuales se incluyen: las condiciones del suelo, la calidad de materiales de tubería, la proximidad a las corrientes eléctricas, el régimen de presión y otros más (Hamilton et al., 2006).

Según Lambert & Hirner (2000), la cantidad de pérdidas reales en un sistema de distribución de agua varía en función de factores locales, tales como la presión de servicio, topografía, longitud de la red, número de conexiones, calidad del servicio y de las tareas de operación y mantenimiento del sistema. Es necesario que en un sistema bien operado las pérdidas de agua deben ser observadas y controladas, registrándose cada año.

Cada sistema de suministro tiene influencias locales clave que limitan las posibilidades de una gestión de pérdidas reales de agua; estas deben ser reconocidas para establecer las acciones necesarias a seguir; las más importantes son (Lambert & Hirner, 2000), (Hamilton et al., 2006):

- El número de conexiones de servicio,
- La longitud de la conexión de servicio,
- La longitud de la red,
- La presión media de funcionamiento, cuando el sistema está presurizado,
- El porcentaje de tiempo al año en el cual el sistema está presurizado,
- Condiciones de infraestructura, materiales, frecuencias de fugas y explosiones,
- Continuidad del servicio,
- El tipo de suelo y las condiciones del terreno, la forma en que influyen en el porcentaje de fugas y explosiones, si muestran rápidamente el agua en la superficie del suelo.

Uno de los elementos que mayor influencia tiene sobre las fugas es la presión; a continuación se citan las principales consecuencias (Farley, 2001):

- Las fugas en las tuberías o las juntas defectuosas se incrementarán con el aumento de la presión.
- En sistemas grandes, el aumento de la presión, incluso por unos pocos metros, puede generar un gran número de fugas distribuidas en un tiempo relativamente corto. Por el contrario, la reducción de la presión puede reducir la velocidad de ocurrencia de estas fugas.
- Las presiones grandes en la red permiten el incremento del caudal y la velocidad de la fuga; esta situación puede ayudar temporalmente a localización de fugas; debido a que las mismas aparecerán más pronto, al producirse más ruido, serán ubicadas de forma más sencilla por métodos de resonancia.
- Por el contrario, en los sistemas con presiones pobres y/o suministro intermitente, las fugas y los efectos sonoros de las mismas se reducen, por lo que su ubicación es una tarea más difícil.
- Los transitorios hidráulicos son causa de fugas; el aumento repentino de la presión puede hacer que las tuberías se fracturen o se muevan los bloques de anclaje, dañando las juntas. También hay evidencia de que el aumento de la presión puede causar que los tubos se

doblen y se muevan contra las rocas, generando fracturas si el entorno de la tubería no fue construido de forma adecuada, especialmente en tuberías de PVC.

- En los sistemas de suministro intermitente se tiene una variación continua de las presiones, de valores altos a bajos y viceversa, lo cual puede producir fatiga en las tuberías y, en consecuencia, fugas. Asimismo, en tuberías de PVC, las malas prácticas de almacenamiento pueden ser causa de debilitamiento de la tubería.

Las pérdidas reales se pueden clasificar de acuerdo a su ubicación dentro del sistema, su tamaño y el tiempo durante el cual se produce la fuga.

Según su ubicación las fugas pueden ser:

- Fugas producidas en tramos principales y secundarios.
- Fuga desde la abrazadera de conexión hasta el punto del contador del usuario.
- Fuga y reboses de tanques de almacenamiento.

Las pérdidas reales clasificadas según el tamaño y tiempo de fuga son:

- Fugas reportadas o visibles, que son reventones grandes en tuberías de distribución principales; estas fugas son visibles porque el agua aparecerá en la superficie rápidamente, dependiendo de la presión del agua y su tamaño, además de las características del suelo. Debido a que son visibles inmediatamente, no se requiere equipo especial para detectar este tipo de fugas.
- Fugas no reportadas u ocultas; producen caudales grandes con presiones de servicio normales; sin embargo, por las condiciones del entorno no suelen aparecer en la superficie. Para su detección se utilizan técnicas y equipos especializados.
- Fugas de fondo son aquellas pérdidas de agua que tienen caudales muy pequeños a presiones de servicio normales. Estas fugas son filtraciones o goteo en uniones, válvulas o accesorios no herméticos, etc.; son difíciles de detectar; se considera que este tipo de pérdidas son eliminadas o reducidas con el reemplazo de la parte o accesorio defectuoso (Farley, 2001). Las fugas de fondo, generalmente, causan una buena parte de las pérdidas reales de agua, debido a su gran número y el largo tiempo durante el que ocurren.

En el siguiente gráfico, que relaciona el tiempo y caudal fugado, se observan las diferencias entre los diferentes tipos de fugas.

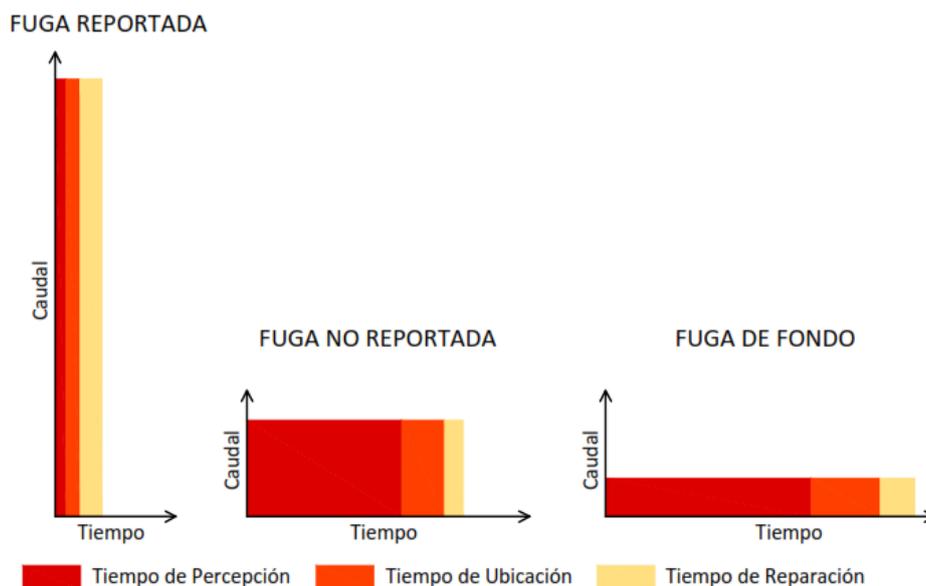


Fig. 2.10. Características del caudal y del tiempo en diferentes tipos de fugas

Fuente: Morrison et al. (2007)

### 2.9.3. Pérdidas aparentes

Las pérdidas aparentes son pérdidas que no se deben a fugas físicas en la infraestructura; estas son causadas por otro tipo de factores, como los siguientes:

- Inexactitudes de medición debido a contadores descompuestos o descalibrados.
- Manejo de datos y errores de transcripción en mediciones realizadas.
- Consumo no autorizado debido a conexiones clandestinas.

Las pérdidas aparentes comprenden toda el agua que se entrega al usuario pero que no se mide o registra con exactitud, por lo que puede decirse que son proporcionales al consumo (Almandoz et al., 2005). En redes de abastecimiento de agua que no cuentan con contadores domiciliarios y que tienen conexiones clandestinas, las pérdidas aparentes pueden representar cantidades significativas de agua. Estas pérdidas aparentes generan costes de producción sin generar ingreso para la empresa de agua potable.

### 2.9.4. Pérdidas en sistemas con suministro intermitente

La cuantificación de los niveles de pérdidas en condiciones de suministro intermitente es difícil; la reducción de horas de suministro daría lugar a una reducción proporcional de las fugas (Kingdom et al., 2006), sin embargo, esto afectaría negativamente a los consumidores; por otro lado, el incremento de horas de servicio daría lugar a un incremento en las fugas.

Las fugas en los sistemas de abastecimiento intermitente agravan los problemas y deficiencias de este tipo de suministro. Según Farley (2001), los problemas están asociados a:

- La duración del suministro, la cual está limitada a reducir el volumen de las fugas y el desperdicio de los clientes.

- Un mayor tiempo de suministro reduce la demanda máxima, pero esto sólo es posible si se toman medidas necesarias para limitar las fugas.
- Los clientes tienden a usar la mayor cantidad posible de agua, instalando y/o construyendo tanques de almacenamiento domiciliarios.
- Los suministros intermitentes de baja presión restringen las fugas en el sistema, pero esta situación no es satisfactoria para el cliente y provoca un riesgo de salud pública de ingreso de contaminación a la red.
- Los métodos convencionales de control y detección de fugas, por ejemplo el método de caudal mínimo nocturno y gestión de la presión para reducir las fugas, no son aplicables a los suministros intermitentes. De hecho, para que los métodos de detección de fugas tengan la eficiencia deseada, se requiere presión alta en la red.

Generalmente, los niveles de fuga de las zonas que tienen suministro intermitente son muy bajos; esto no debe interpretarse como una red libre de fugas; estas situaciones ocurren cuando las presiones de operación también son bajas. Sin embargo, también debe controlarse la presión en los sectores, porque la reducción de la presión de alguno de ellos permitirá que los demás, con problemas, tengan suministro con menos problemas (Morrison et al., 2007).

### **2.9.5. Métodos para estimar las fugas en sistemas con suministro intermitente**

Debido a que los clientes, en sistemas intermitentes, usan comúnmente depósitos domiciliarios, el llenado de los mismos distorsiona las características del caudal nocturno; por estas razones los métodos convencionales no son utilizados para evaluar las fugas (Farley, 2001), (Farley & Trow, 2003).

#### **2.9.5.1. Método de cisternas móviles**

El método de las cisternas móviles se basa en el uso de una fuente de agua extra (cisterna), que se utiliza para abastecer al área durante el período de prueba. El método se desarrolló para superar las dificultades de desviar el suministro a áreas pequeñas y aisladas; de esta forma, no se perturba la operación normal y se puede limitar la cantidad de agua perdida. El procedimiento consiste en la inyección de agua al sistema desde un camión cisterna, manteniendo la presión de prueba deseada utilizando una bomba; al igual que el método anterior, en éste tampoco se puede suministrar agua a los usuarios durante el período de prueba (Central Public Health and Environmental Engineering Organisation, 2005).

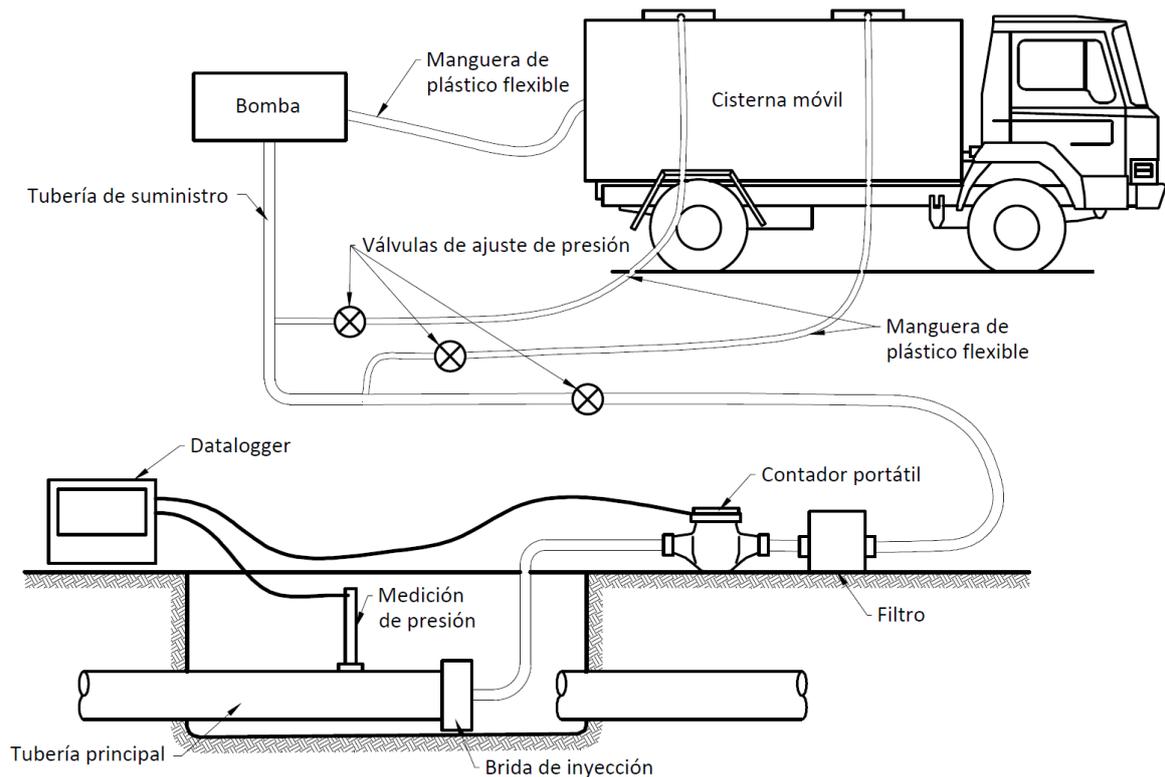


Fig. 2.11. Método de detección de fugas por cisternas móviles

Fuente: adaptado de Central Public Health and Environmental Engineering Organisation (2005)

### 2.9.5.2. Método de cierre de grifos

Este método se aplica en áreas pequeñas, aisladas a través del cierre de válvulas. Como paso siguiente, todas las conexiones de los clientes deben cerrarse, para evitar el llenado de los depósitos domiciliarios. El sistema entonces es presurizado, por lo que se podrán detectar las fugas, este procedimiento dará una idea de su ubicación; sin embargo, aún no puede realizarse un balance hídrico apropiado, ya que el modo de operación no está en línea con las condiciones normales. Una desventaja de este método es la pérdida de considerables volúmenes de agua en los puntos de fuga; asimismo, se dificulta la identificación de todas las fugas durante el corto período de prueba, además de que los usuarios se quedan sin suministro por varias horas (Farley & Trow, 2003).

### 2.9.6. Hidráulica de las pérdidas reales

Las fugas o pérdidas reales, normalmente, constituyen una proporción importante de las pérdidas totales de agua. Las fisuras, agujeros y defectos en la unión de las tuberías son las principales causas para la presencia de fugas. La sensibilidad del caudal de fuga con respecto a la presión es ampliamente demostrada (Lambert, 2000); esto implica que elevar la presión incrementará la fuga de acuerdo con la siguiente relación:

$$q = c \cdot p^\alpha, \quad (2.14)$$

donde:

$q$  = caudal de fuga,

$c$  = coeficiente de fuga,

$p$  = presión en la tubería,

$\alpha$  = exponente de fuga.

Como puede observarse, la fuga es directamente proporcional a la presión en la tubería. El comportamiento hidráulico de las fugas puede describirse utilizando una versión general de la ecuación del orificio (Ziegler et al., 2012).

En sistemas con suministro intermitente, donde las fugas son limitadas por el tiempo de suministro, puede usarse una expresión más general para el cálculo del volumen de fugas:

$$V_f = c \cdot p^\alpha \cdot t, \quad (2.15)$$

donde:

$t$  = tiempo de suministro.

### 2.9.7. Gestión de las pérdidas reales

Las pérdidas reales actuales anuales (*PRAA*) son calculadas a través del balance hídrico; este volumen tiende a crecer con la ocurrencia de nuevas roturas y el deterioro de la infraestructura. Sin embargo, este volumen puede ser controlado a través de una combinación apropiada de gestión de la presión, velocidad y calidad de las reparaciones, control activo de fugas y gestión de la infraestructura (ver Fig. 2.12).

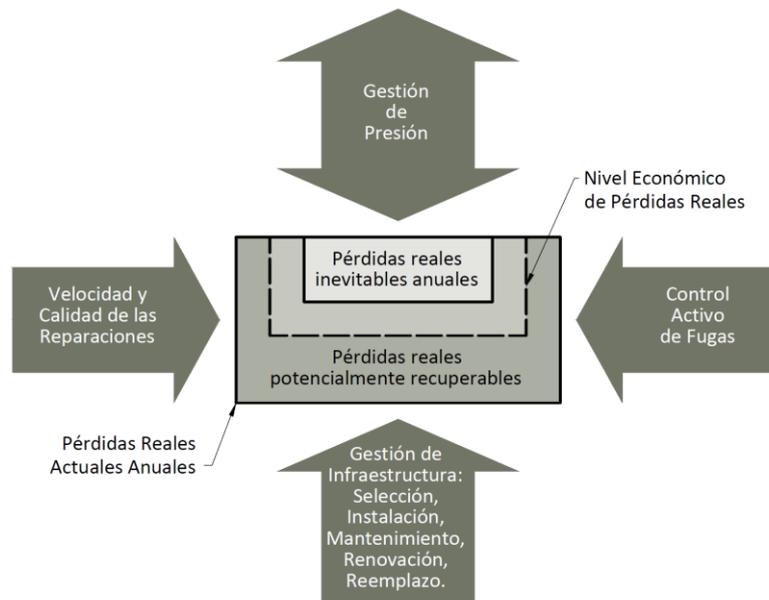


Fig. 2.12. Enfoque de cuatro componentes para la gestión de las pérdidas reales

Fuente: Lambert & Fantozzi (2005)

Las pérdidas reales inevitables anuales (*PRIA*) se definen como el volumen más bajo que técnicamente se puede alcanzar. Este valor puede ser calculado en base a la longitud de las tuberías principales, el número de acometidas, la longitud de las acometidas y la presión media de la red.

Normalmente, no es económico lograr la *PRIA*, a menos que el agua sea muy escasa y/o muy cara (Lambert & Fantozzi, 2005). El nivel económico de las pérdidas reales, por lo general, se

encuentra en un punto intermedio entre la *PRIA* y las pérdidas reales potencialmente recuperables. Muy pocos sistemas, en el contexto internacional, logran un nivel económico de pérdidas reales demostrables (Lambert & Fantozzi, 2005). El nivel económico de pérdidas reales es definido como el nivel de fuga en el que cualquier reducción adicional incurriría en costos superiores a los beneficios derivados del ahorro.

### 2.9.7.1. SRELL, short-run economic leakage level

Lambert & Fantozzi (2005) establecen una metodología para calcular el nivel económico de fugas a corto plazo (*SRELL* por su nombre en inglés). El método permite evaluar la frecuencia de la intervención económica (parámetros presupuestarios y volumétricos asociados) para una política de control activo de fugas basada en una inspección regular. Para los cálculos se utilizan tres parámetros fundamentales: el índice natural de aumento fugas (*INAF*), el costo marginal del agua (*CMA*), y el coste de la intervención (*CI*). Este enfoque permite evaluar:

- en sistemas pequeños, la frecuencia de la intervención económica para encontrar fugas no reportadas;
- en grandes sistemas, el porcentaje económico del sistema que se debe inspeccionar cada año;
- un presupuesto anual adecuado para este tipo de actividades;
- el volumen económico anual de pérdidas reales, correspondiente a la frecuencia de la intervención económica.

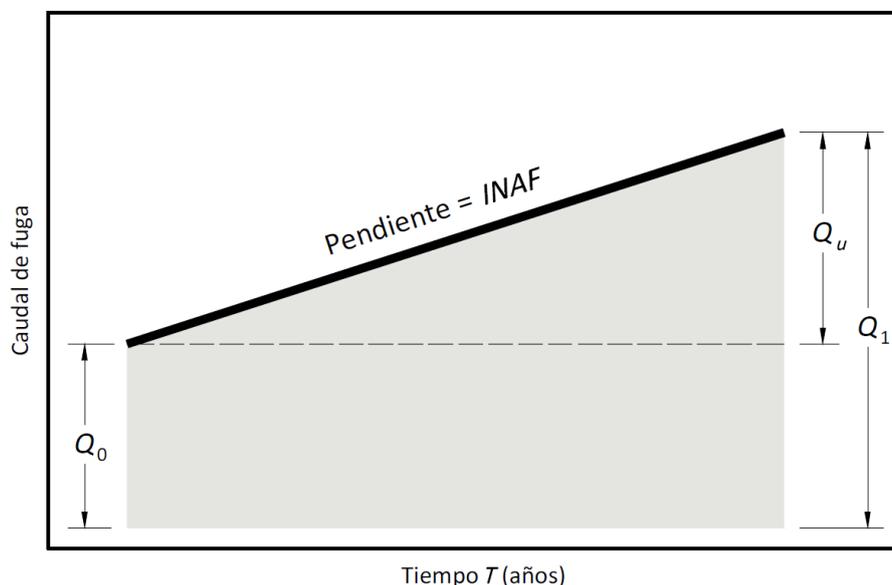


Fig. 2.13. Forma general simplificada del incremento de la tasa de fugas no reportadas Vs. tiempo

Fuente: Lambert & Fantozzi (2005)

Se supone que el coste marginal del agua y la velocidad de aumento de las fugas no reportadas son aproximadamente constantes para cualquier sistema individual o subsistema (Lambert & Fantozzi, 2005).

La tasa promedio de incremento de las fugas no reportadas es denominada como Índice Natural de Aumento de Fugas (*INAF*):

$$Q_u = Q_1 - Q_0, \quad (2.16)$$

$$INAF = \frac{Q_u}{T}. \quad (2.17)$$

El volumen de fugas no reportadas es:

$$V = \frac{T \cdot (INAF \cdot T)}{2} = \frac{INAF \cdot T^2}{2}. \quad (2.18)$$

Si el coste marginal del agua (*CMA*) es representado en €/m<sup>3</sup>, el coste del agua del volumen de fugas no reportadas es:

$$Coste\ agua = CMA \cdot V = \frac{CMA \cdot INAF \cdot T^2}{2}. \quad (2.19)$$

La definición de intervención económica establece una frecuencia de intervención en la cual el costo marginal del control activo de fugas es igual, en promedio, al costo variable de la fuga de agua (Lambert & Fantozzi, 2005); por lo tanto:

$$Coste\ agua = CI. \quad (2.20)$$

En base a lo cual, la frecuencia óptima de inspección (*FOI*) es:

$$T = \sqrt{\frac{2 \cdot CI}{CMA \cdot INAF}}, \quad (2.21)$$

$$FOI = \sqrt{\frac{2 \cdot CI}{CMA \cdot INAF}}. \quad (2.22)$$

Si el *INAF* es expresado en m<sup>3</sup>/d/año, la *FOI* en meses es:

$$FOI = \sqrt{\frac{0.789 \cdot CI}{CMA \cdot INAF}}. \quad (2.23)$$

En sistemas grandes, si la *FOI* excede de 1 año, es preferible intervenir en un porcentaje adecuado del sistema de cada año, en lugar de esperar y luego intervenir en todo el sistema una vez cada pocos años (Lambert & Fantozzi, 2005).

Con la *FOI* en meses, el porcentaje de la red inspeccionada por año (*RI*), es calculada por:

$$RI = \frac{12}{FOI} \cdot 100. \quad (2.24)$$

El coste anual de inspecciones (*CAI*):

$$CAI = RI \cdot CI. \quad (2.25)$$

El volumen de agua desperdiciada (*VAAIP*) es:

$$VAAIP = \frac{CAI}{CMA}. \quad (2.26)$$

De esta forma, es posible establecer un nivel de fugas a partir del cual es necesario realizar una inspección y llegar a un nivel aceptable de pérdidas reales (Fig. 2.14).

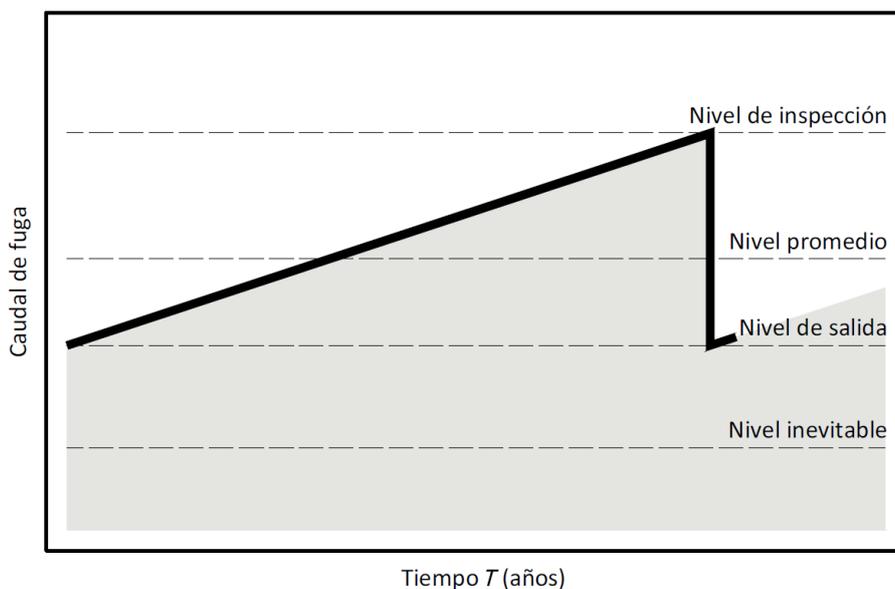


Fig. 2.14. Niveles de fugas para calcular el nivel económico de fugas a corto plazo

Es importante también incluir a las fugas por roturas notificadas.

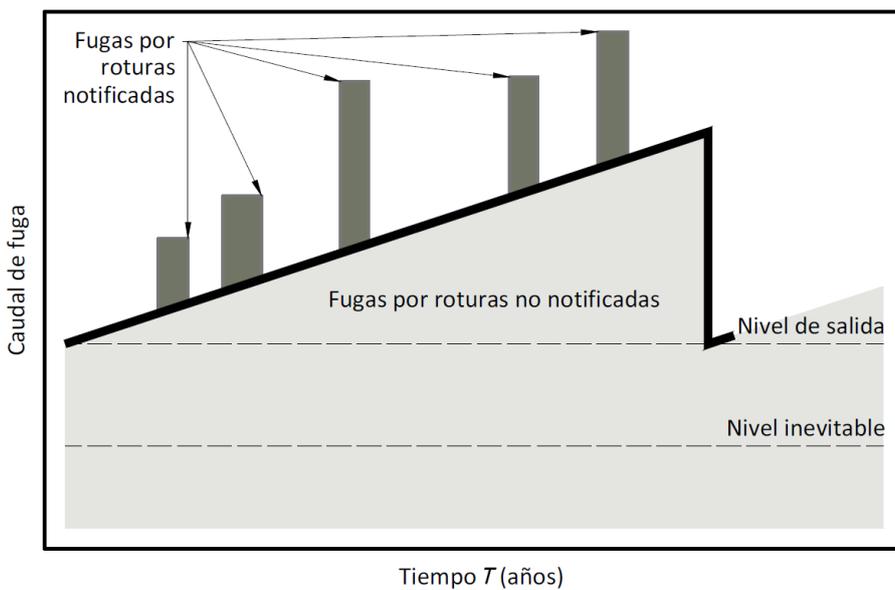


Fig. 2.15. Fugas por roturas notificadas y fugas por roturas no notificadas

Estas relaciones permiten establecer un nivel de fugas que representa al coste total mínimo (inspecciones y reparaciones más el coste del agua perdida) mostrado en la Fig. 2.16.

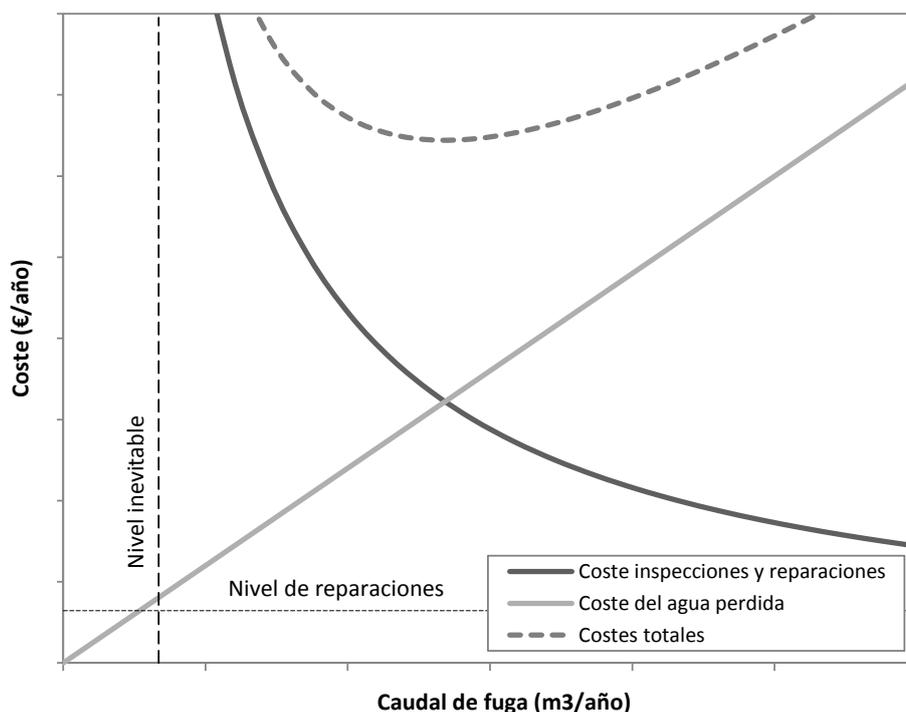


Fig. 2.16. Nivel económico de fugas a corto plazo

### 2.9.7.2. Gestión de presión

A la técnica de la reducción de las fugas en base a una reducción de la presión se la denomina gestión de presión, por medio de la cual se opera la red con presiones en niveles óptimos para un servicio adecuado, de forma que se asegure un suministro suficiente y eficiente (Ziegler et al., 2012). Los efectos positivos de la gestión de la presión se traducen en la reducción de las pérdidas reales de agua, porque se evitan las presiones excesivas, en el marco del suministro normal o causadas por transitorios hidráulicos. La relación directa entre el caudal de las fugas y la presión hacen de la gestión de la presión un método de intervención que permite tener un impacto positivo.

Se puede utilizar la ecuación definida en hidráulica de fugas para estimar los efectos de la gestión de la presión en toda una red; un elemento importante en la modelización de las fugas es el exponente de fuga, el cual varía desde valores cercanos a 0.5 cuando el área de fuga es constante, hasta valores de 1.5 cuando las fisuras que producen las fugas tienen áreas variables (Puusta et al., 2010). La relación presión-fuga establece la proporcionalidad entre la reducción de la presión y la reducción del flujo de fuga en las grandes redes.

De acuerdo con (Lambert A., 2000), la eficiencia en la gestión de la presión se puede expresar mediante:

$$q_1 = q_0 \cdot \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^\alpha \quad \text{o} \quad \frac{q_1}{q_0} = \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^\alpha, \quad (2.27)$$

donde:

$q_0$  = caudal de fuga inicial a presión  $p_0$ ,

$q_1$  = caudal de fuga a presión ajustada  $p_1$ ,

$p_0$  = presión promedio inicial en la zona,

$p_1$  = presión promedio ajustada en la zona,

$\alpha$  = exponente de fuga.

En muchos países se reconoce que el control de la presión es uno de los aspectos más importantes de la gestión adecuada de las fugas. La reducción de la presión no sólo reduce la pérdida de agua a través de las filtraciones existentes, sino que también reduce la frecuencia con que se producen nuevas fugas (Hamilton et al., 2006). Debe considerarse que las sobrepresiones y el exceso de presiones pueden tener un efecto significativo en la frecuencia de nuevas fugas y reventones (Fantozzi & Lambert, 2007).

Fantozzi & Lambert (2007) proponen una manera práctica en la que los efectos de la gestión de la presión pueden ser incluidos en los cálculos de nivel de fuga económica a corto plazo (*SRELL*), teniendo en cuenta los cambios en el *INAF*, los cambios en el número de fugas y los costos de reparación. Como se observa en la Fig. 2.17, tras una actuación de gestión de presión, si las presiones y sobrepresiones son reducidas, el *INAF* se reduce y la frecuencia de las fugas y reventones reportados (en la mayoría de los casos) también se reduce.

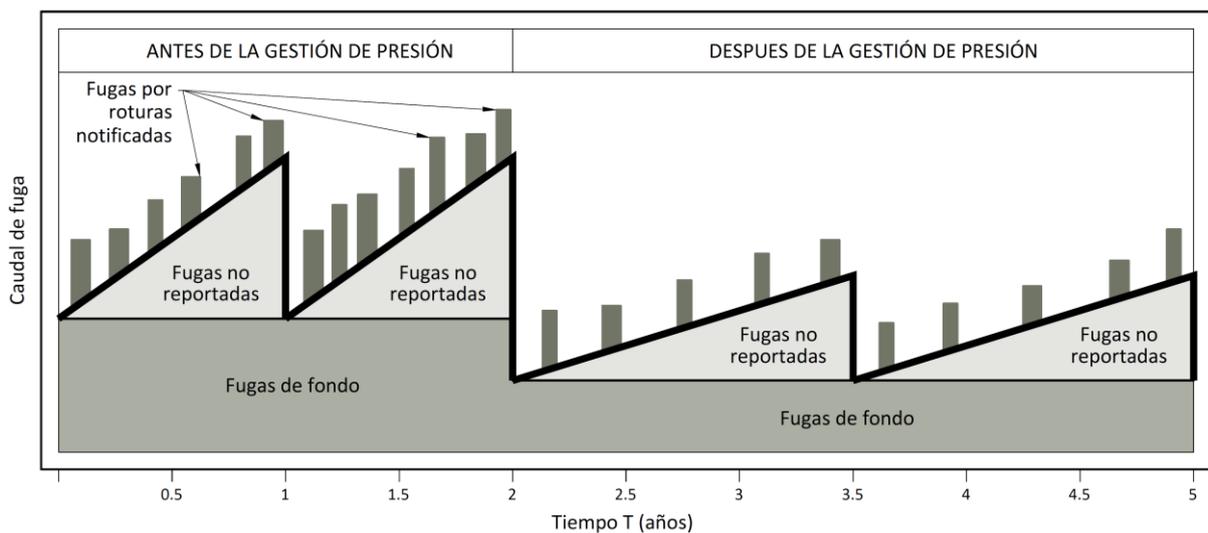


Fig. 2.17. Influencia de la gestión de presión en los componentes del *SRELL*

Fuente: Fantozzi & Lambert (2007)

La reducción prevista del coste anual antes y después de la gestión de la presión está justificado por los siguientes tres elementos (Fantozzi & Lambert, 2007):

- la reducción del volumen *SRELL* multiplicado por el costo variable supuesto del agua,
- la reducción en el costo anual de las intervenciones económicas, y
- la reducción en el costo anual de las reparaciones debido a un menor número de fugas y reventones.



## **CAPÍTULO 3. Capacidad de la red de suministro y la presencia de nudos desfavorables**

---

### **3.1. Introducción**

Generalmente, se considera que los sistemas con suministro intermitente se originan únicamente por escasez física de agua. Sin embargo, existen otros elementos más que son causa para el suministro intermitente.

Tanto la capacidad de la red, como la presencia de nudos desfavorables en la misma, son dos factores poco analizados y suelen ser considerados como elementos cualitativos del sistema. Sin embargo, su análisis es fundamental para comprender las deficiencias que favorecen la imposición del suministro intermitente.

La capacidad de la red es uno de los primeros aspectos que se debe tomar en cuenta para comprender mejor la existencia de los sistemas con suministro intermitente y para el planteamiento de propuestas de mejora. En el presente capítulo, se plantea el “caudal máximo teórico”, un indicador que otorga una dimensión cuantitativa a la capacidad de la red; de esta forma, se convierte en una herramienta muy útil para una mejor planificación, gestión y diseño de los sistemas de suministro de agua potable, no solamente los intermitentes.

Asimismo, es importante comprender la función de los nudos desfavorables, sus características y su influencia en el suministro intermitente. La presencia de nudos desfavorables implica la existencia de nudos favorables, los cuales tienen posibilidades de derroche y desperdicio de agua, mientras que los nudos desfavorables ven limitado su suministro debido a las condiciones impuestas por la red. Esta clasificación permite comprender la inequidad en la entrega de agua y las causas de la falta de agua en los nudos desfavorables, situación que puede ser interpretada erróneamente como escasez física de agua.

### **3.2. Capacidad de la red de suministro**

Generalmente, la capacidad de los elementos de un sistema de agua potable puede ser cuantificada con relativa sencillez; por ejemplo: la capacidad de la fuente de suministro, el volumen de

almacenamiento de los depósitos, la capacidad de tratamiento de las estaciones de tratamiento de agua potable o la potencia, caudal y altura manométrica de las bombas. Sin embargo, uno de los componentes más importantes del sistema de agua, como es la red de distribución (Gottipati & Nanduri, 2014), no tiene definida una forma para la cuantificación de su capacidad.

Es común considerar a la capacidad de la red como un elemento cualitativo del sistema, el cual puede ser identificado mediante la reducción de presiones y las quejas de la población (Alegre et al., 2006). Evidentemente, estos elementos caracterizan la falta de capacidad en la red; sin embargo, no la cuantifican. Al no contar con un valor que defina la capacidad de la red, no es posible tomar decisiones precisas con relación a las acciones que se deben tomar para mejorar esta situación.

En la presente tesis, se considera que la capacidad de la red representa la demanda máxima (o flujo) que puede ser satisfecha, mientras se mantienen las presiones adecuadas en la red, garantizando estrictamente la presión mínima requerida en el punto con la menor presión. Cuando este caudal no cubre la demanda de la población, se puede decir que la red no tiene capacidad suficiente. Ante este escenario, la red responde reduciendo las presiones en los nudos hasta alcanzar la demanda total de los usuarios; esta situación puede poner en riesgo la continuidad del suministro de agua.

Muchas veces, en casos de deficiencia de capacidad de la red, los modelos matemáticos basados en DDA (*Demand Driven Analysis*) obtienen presiones negativas, lo cual no tiene un significado físico, por lo que es más conveniente representar esta deficiencia en magnitudes de caudal.

Se propone el uso de la curva de consigna (Martínez et al., 2009) para calcular el caudal máximo teórico, sujeto a las restricciones de presión. Para la evaluación de la capacidad de la red de un sistema con suministro intermitente, el caudal máximo teórico es comparado con el caudal máximo requerido por la población en suministro continuo; de esta forma es posible establecer las posibilidades de convertir el suministro intermitente en continuo.

La medición de la capacidad de la red, a través del caudal máximo teórico, se realiza en condiciones de suministro normales; es decir, no se consideran incrementos bruscos de la demanda, como situaciones de incendios o reventones en la red. Asimismo, se asume que la demanda en la red es uniforme; por lo tanto, el incremento o decremento del caudal demandado es también uniforme en los nudos de la red.

Para la mejor descripción del caudal máximo teórico, a continuación se detallan primero las propiedades de la curva característica del sistema y posteriormente se analiza la curva de consigna y algunas de sus características.

### **3.3. Curva característica del sistema**

Un concepto bastante utilizado, principalmente en el dimensionamiento de sistemas de bombeo, es la curva característica del sistema, la cual describe la relación entre el caudal en una tubería y la pérdida de carga producida por la circulación de este caudal (Bosserman, 1999). Los elementos esenciales de la curva característica son: la altura de presión estática del sistema, definida por la diferencia entre las superficies de agua del depósito desde donde se bombea y el depósito al que se bombea; y las pérdidas de carga en el tramo. La curva característica del sistema se desarrolla sumando la altura de carga estática y las pérdidas de carga, que se incrementan a medida que crece el caudal. La curva del sistema es una parábola que tiene origen en el valor de la altura de presión estática.

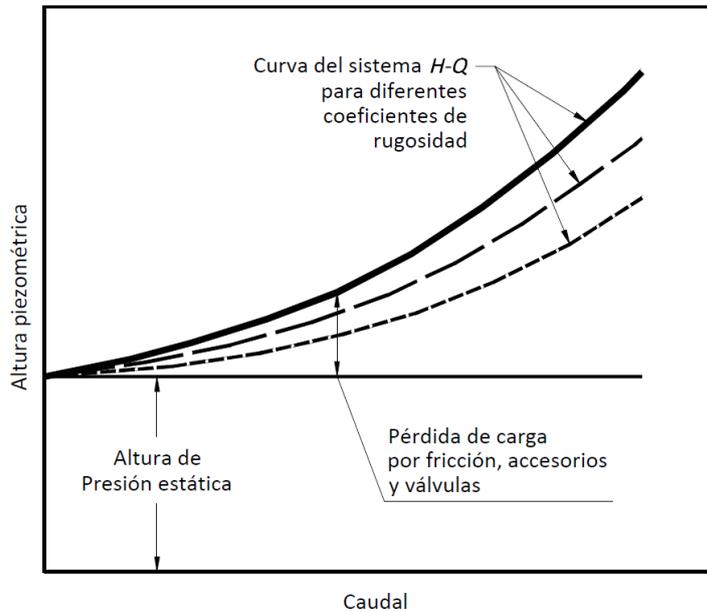


Fig. 3.1. Curva característica del sistema

Fuente: Bosserman (1999)

La curva característica en una red puede variar en función de los puntos de consumo; en horas valle algunos usuarios no requieren agua por lo que empiezan a cerrar las tomas de agua y se produce mayor pérdida de carga para reducir el caudal; en las horas punta, se abren las tomas reduciendo las pérdidas de carga esperando obtener un mayor caudal (Martínez et al., 2009), (Shammas & Wang, 2015). Nótese que la reducción del consumo requiere generar mayor pérdida de carga en la red; en estas condiciones se tendrán presiones en los puntos de consumo superiores a la presión mínima (ver Fig. 3.2). Si para estos consumos se otorga la presión estrictamente necesaria (presión mínima), puede calcularse la presión o altura manométrica necesaria para cumplir este requisito. Por lo que la diferencia entre la altura suministrada y la necesaria es un derroche de energía en la red.

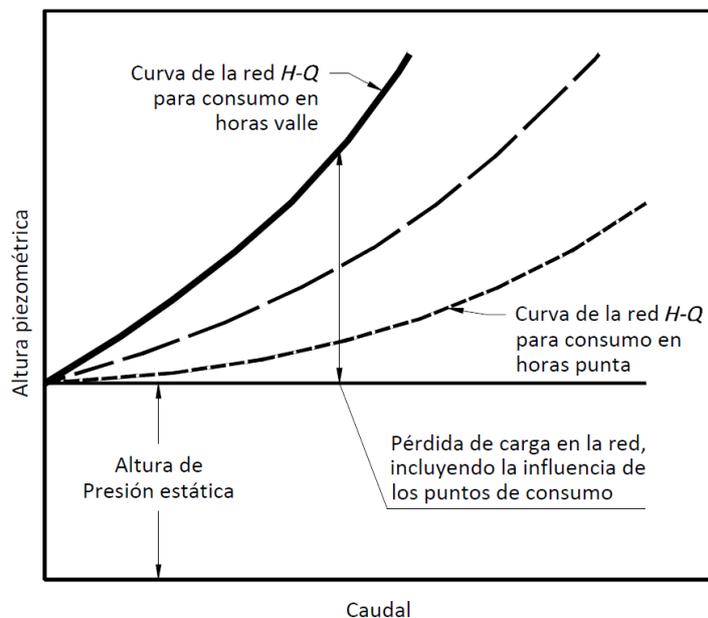


Fig. 3.2. Curva característica de la red

### 3.4. Curva de consigna

Si en lugar de esperar que los usuarios de la red generen la pérdida de energía a través de su consumo y la manipulación de las tomas de agua, configurando diferentes curvas características para la red (Martínez et al., 2009), (Shammas & Wang, 2015), se regula la altura piezométrica o presión de ingreso en la fuente de suministro, con el fin de llegar a los puntos de consumo con la presión mínima necesaria, se lograría reducir esta pérdida de energía. De esta forma, se obtendría no una altura piezométrica o presión de consigna, sino una curva de consigna que asegure en cada estado de carga de la red la presión mínima estrictamente necesaria en los puntos de consumo (Martínez et al., 2009).

Fijando una presión mínima en el nudo más desfavorable y el caudal consumido en cada uno de los nudos de la red ( $Q_{cons}$ ), es posible calcular la altura piezométrica en cabecera ( $H_a$ ) y el caudal inyectado desde la fuente de suministro ( $Q_{iny}$ ) (ver Fig. 3.3). Dependiendo del caudal demandado en la red, o estado de carga, se tendrá una altura piezométrica en la cabecera.

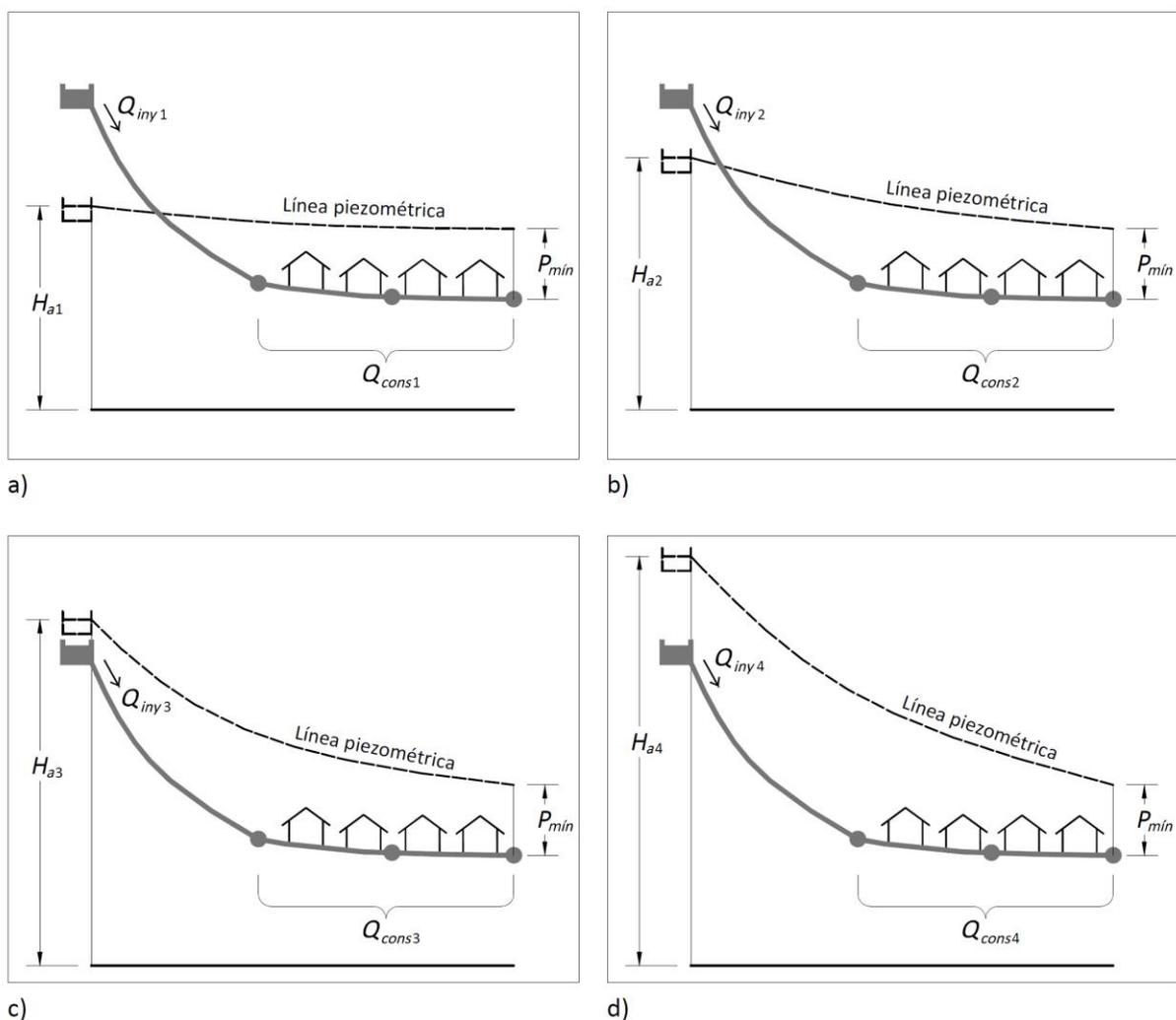


Fig. 3.3. Cálculo de la altura piezométrica en cabecera y el caudal inyectado para diferentes estados de carga:  $Q_{cons1} < Q_{cons2} < Q_{cons3} < Q_{cons4}$ .

Cuando el consumo en la red es pequeño y se busca cumplir estrictamente con la presión mínima en los nudos (ver Fig. 3.3, a) y b)), existe exceso de energía entre la fuente de suministro y los nudos de consumo. Si el consumo en la red es grande (ver Fig. 3.3, c) y d)), la fuente de suministro

puede encontrarse en una situación desfavorable que no permita llegar a la presión mínima en el nudo evaluado. Si la altura piezométrica calculada es igual a la altura piezométrica física o real de la fuente, consideramos que se produce el caudal máximo teórico de la red (ver Fig. 3.16).

El conjunto de pares ordenados de caudal inyectado y altura piezométrica calculada para diferentes estados de carga, configura el desarrollo de la curva de consigna (ver Fig. 3.4).

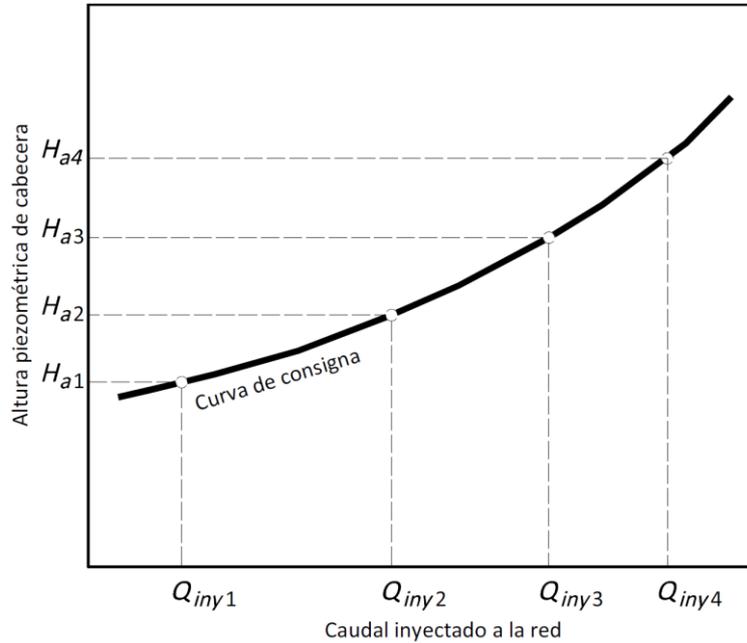


Fig. 3.4. Curva de consigna

A diferencia de la curva característica de la red, que cambia de pendiente en función de las exigencias de caudal y la resistencia impuesta en la red por parte de los usuarios (Shammas & Wang, 2015), la curva de consigna mantiene una posición estable, lo cual es muy ventajoso y útil para la resolución de problemas relacionados con el suministro de agua.

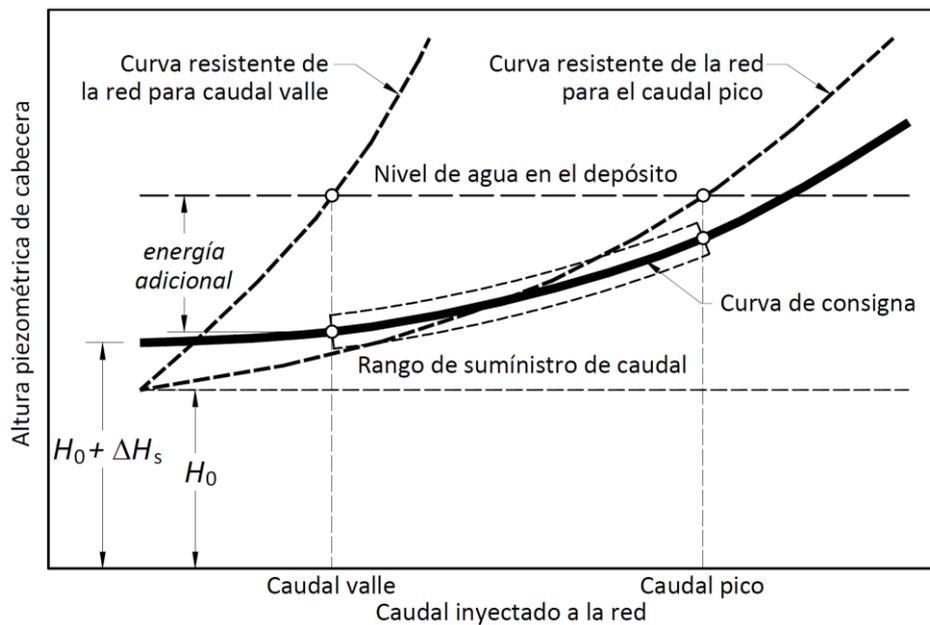


Fig. 3.5. Representación de las curvas resistentes de la red y la curva de consigna

La curva de consigna es utilizada para regulación de sistemas de bombeo (Martínez et al., 2009) y en la optimización energética de sistemas de suministro de agua (Planells et al., 2001), (Iglesias et al., 2002), (Planells et al., 2005), (Oyarzún, 2011). Asimismo, una aproximación a la curva de consigna, es la utilizada como curva de modulación del flujo o curva de consigna para Válvulas Reductoras de Presión (PRV), en la optimización de la operación de los DMAs (Prescott et al., 2003), (Ulanicki et al., 2008).

Para el cálculo de la curva de consigna, debe disponerse de un modelo matemático de la red fiable (Iglesias et al., 2002); de esta forma es posible evaluar las pérdidas de carga en la red en función de las diferentes cargas soportadas por la red. El seguimiento de la curva de consigna asegura en cada momento que la presión inyectada en las acometidas es la estrictamente necesaria para tener un buen servicio; de esta forma se establece un ahorro energético; asimismo, el seguimiento de la curva minimiza las fluctuaciones de las presiones en la red, reduciendo las implicancias negativas de estas variaciones en la vida útil de la red (Martínez et al., 2009).

En el diagrama de flujo mostrado en la figura 3.6, se resumen los pasos seguidos para la determinación de la curva de consigna cuando se tiene solo un punto de alimentación. Una vez que se cuenta con el modelo matemático de la red, es necesario establecer la presión mínima de servicio en los nudos ( $P_{min}$ ); este valor definirá el grado de servicio que se quiere alcanzar; posteriormente, se deberán generar escenarios con un determinado estado de carga, los cuales requerirán de una altura piezométrica en la cabecera ( $H_a$ ) que garantice la presión mínima en el nudo más desfavorable; esta altura es calculada por un proceso iterativo. Finalmente, cada uno de los pares ordenados (Caudal inyectado ( $K_j Q$ ), Altura piezométrica de cabecera ( $H_a$ )) configura un punto en la curva de consigna.

La gran ventaja de la curva de consigna es la posibilidad de relacionar el caudal inyectado en la red, desde un valor mínimo hasta un máximo, y las variaciones en la presión de la fuente de suministro o cabecera. De esta forma, la curva de consigna es capaz de mostrar un funcionamiento adecuado globalmente en la red para diferentes caudales o estados de carga.

Para el cálculo de la curva de consigna es recomendable introducir los caudales medios de consumo en cada uno de los nudos del modelo matemático de la red; de esta forma se genera cada estado de carga sobre esta base.

Entre los inconvenientes de la curva de consigna se pueden citar: la dificultad de obtener una curva de consigna cuando se tienen patrones de consumo diferentes; puede requerir de un tratamiento especial cuando los nudos tienen diferentes valores de presión mínima según el tipo de uso que tenga, por ejemplo uso industrial o residencial; existe una fuerte dependencia del modelo matemático de la red, por lo que se requiere un modelo fiable. En terreno, es posible obtener la curva de consigna a través de la instalación de sensores de presión en los puntos más desfavorables de la red, haciendo un seguimiento continuo, considerando una presión en cabecera variable y realizando mediciones del flujo de entrada (Ulanicki et al., 2008).

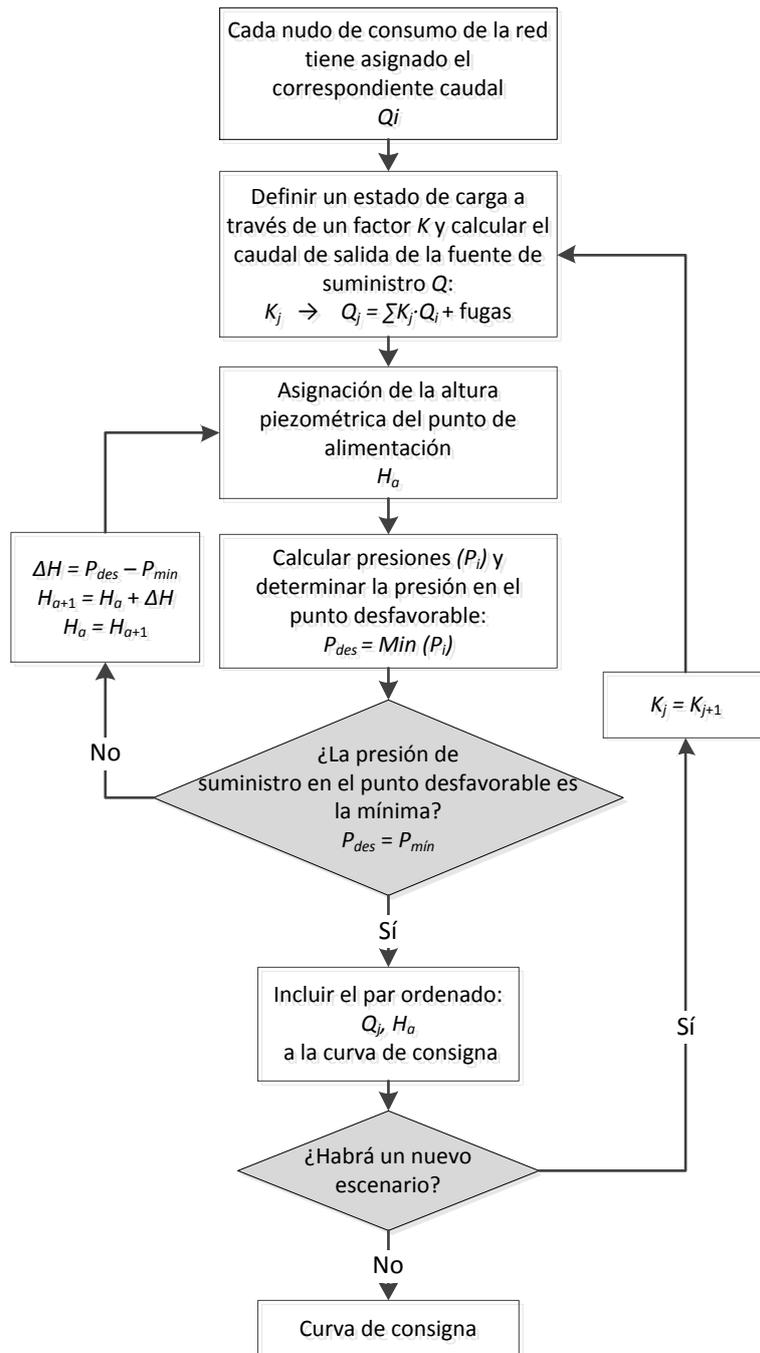


Fig. 3.6. Diagrama de flujo para la determinación de la curva de consigna

### 3.4.1. Características de la curva de consigna

Para analizar las características de la curva de consigna y evaluar sus posibles usos se propone un ejemplo a partir del cual se irán desglosando diferentes posibilidades de configuración para evaluar su comportamiento (Ilaya-Ayza et al., 2015a).

La figura 3.7 muestra un esquema de la red de suministro de agua alimentada por una sola fuente de suministro; todas las tuberías de la red tienen una rugosidad de  $\epsilon=0.10$  mm; las características de los nudos se muestran en la tabla 3.1 y las de los tramos o tuberías en la tabla 3.2.

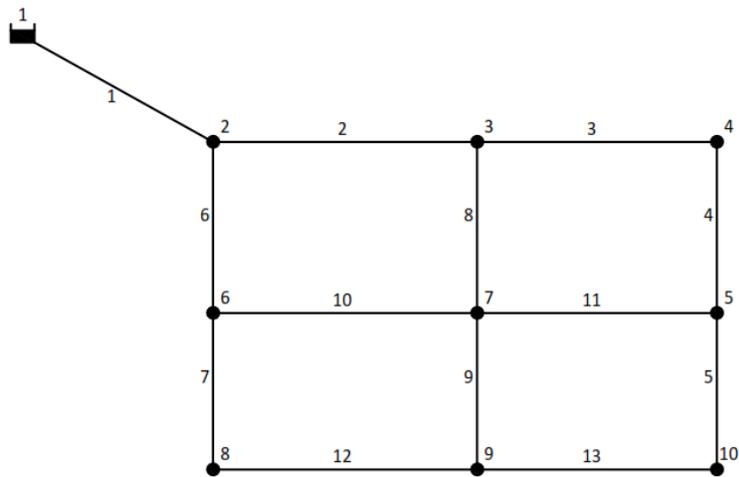


Fig. 3.7. Red modelo para la determinación de la curva de consigna

Tabla 3.1. Características de los nudos de la red

Nudo	Cota (m)	Demanda (l/s)
2	15	25
3	15	32
4	8	30
5	0	25
6	10	25
7	5	25
8	7	21.5
9	3	22.5
10	0	20

Tabla 3.2. Características de las tuberías de la red

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)
1	432	300
2	220	300
3	250	200
4	210	200
5	189	150
6	203	200
7	188	200
8	205	200
9	195	150
10	300	250
11	320	250
12	201	200
13	200	150

Calculando las curvas de consigna a diferentes valores de presión mínima de servicio ( $P_{min}$ ), se establecen las alturas piezométricas de cabecera ( $H_a$ ) necesarias para diferentes estados de carga de la red; en este primer ejemplo no se considera la presencia de fugas.

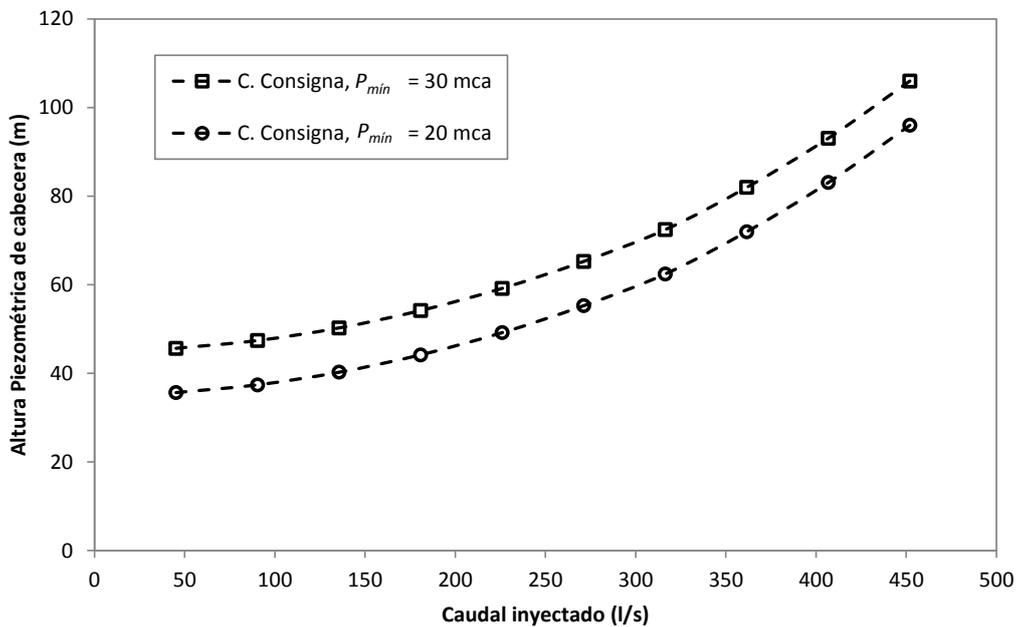


Fig. 3.8. Curvas de consigna para diferentes valores de presión mínima de servicio

La curva de consigna adopta valores menores de altura piezométrica de cabecera cuando se reducen los valores de presión de servicio. Dependiendo de la configuración de la red, las curvas pueden llegar a ser paralelas con una separación igual a la diferencia de la presión de servicio.

Como la modelización es realizada en EPANET 2.0 (Rossman, 2000), es posible incluir emisores en los nudos que permitan simular la presencia de las fugas en la red; de esta forma, se calculan las curvas de consigna para diferentes valores de  $P_{min}$  con un exponente de fugas  $\alpha = 0.5$ .

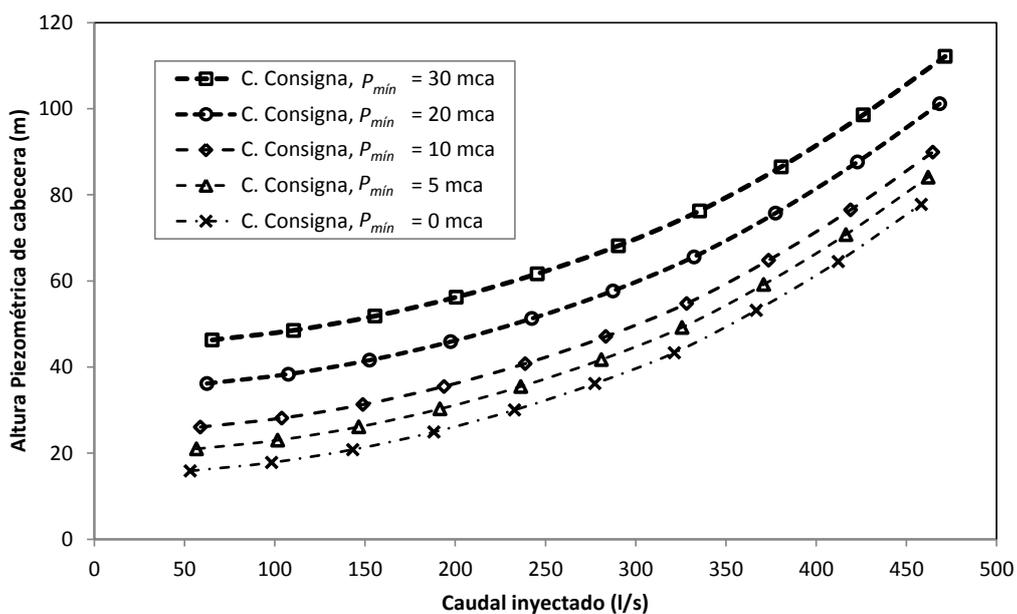


Fig. 3.9. Curvas de consigna para diferentes valores de presión mínima de servicio incluyendo fugas

La presencia de fugas modifica el caudal inyectado, ya que la red debe cubrir tanto el caudal demandado por los nudos como las fugas, que son dependientes de la presión. Los puntos que configuran la curva de consigna tienden a moverse hacia la derecha incrementando el caudal.

Comparando las curvas de consigna de la red, cuando se encuentra sin fugas y con la presencia de éstas, se observa que la curva de consigna que incluye fugas se encuentra superpuesta a la curva de consigna sin fugas.

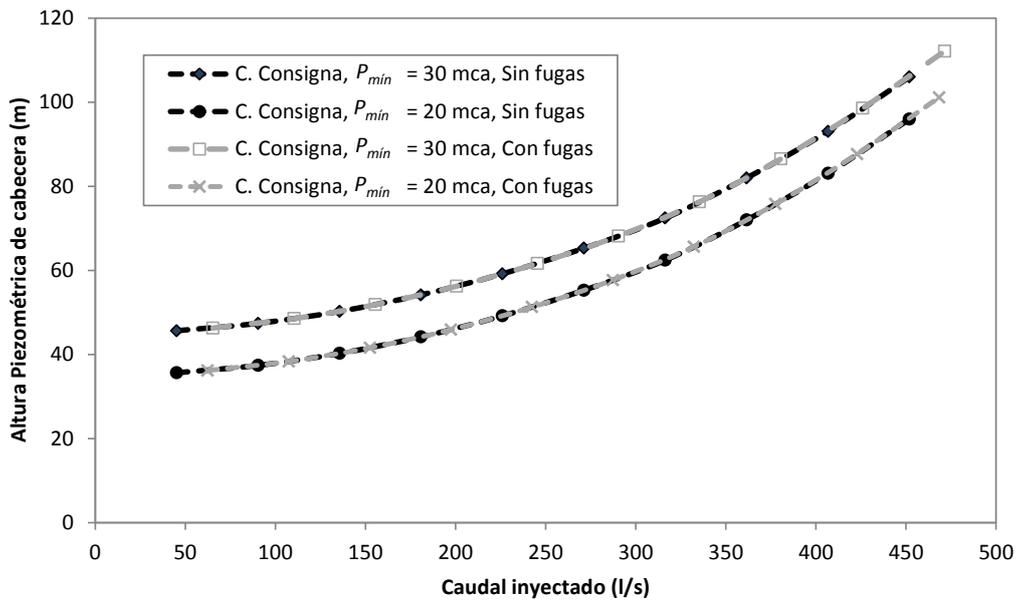


Fig. 3.10. Curvas de consigna para diferentes valores de presión mínima de servicio, con y sin fugas

En el entendido de que el ajuste de las curvas de consigna puede modificarse con valores diferentes del exponente de fugas, se elaboró el siguiente gráfico variando estos exponentes.

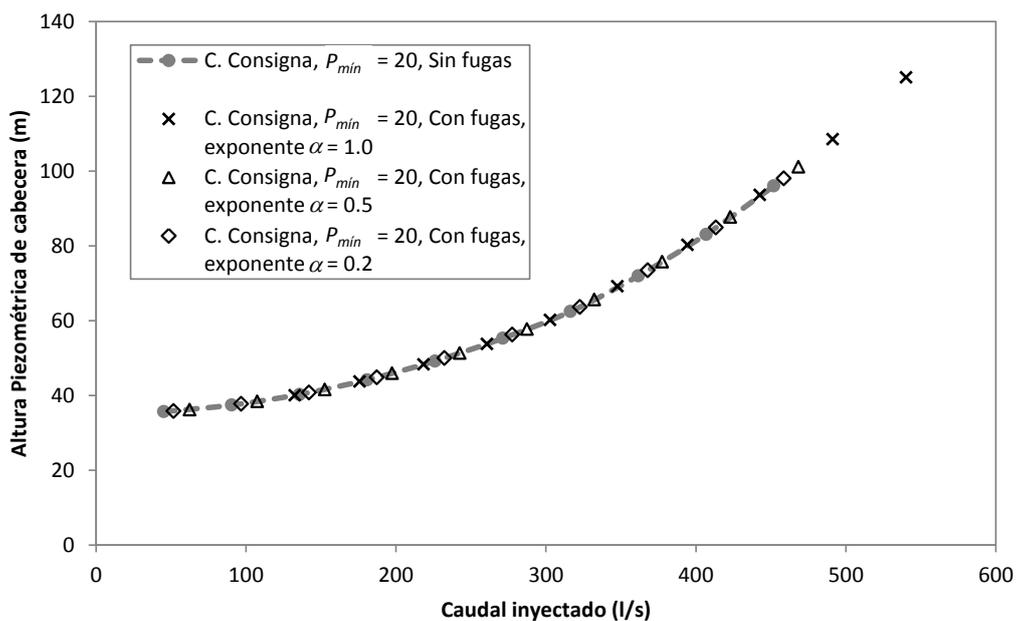


Fig. 3.11. Curvas de consigna para diferentes valores de exponente de fugas

Asimismo, se modificó el coeficiente de fugas en cada uno de los nudos para evaluar su influencia en la curva de consigna; se obtuvo el siguiente resultado:

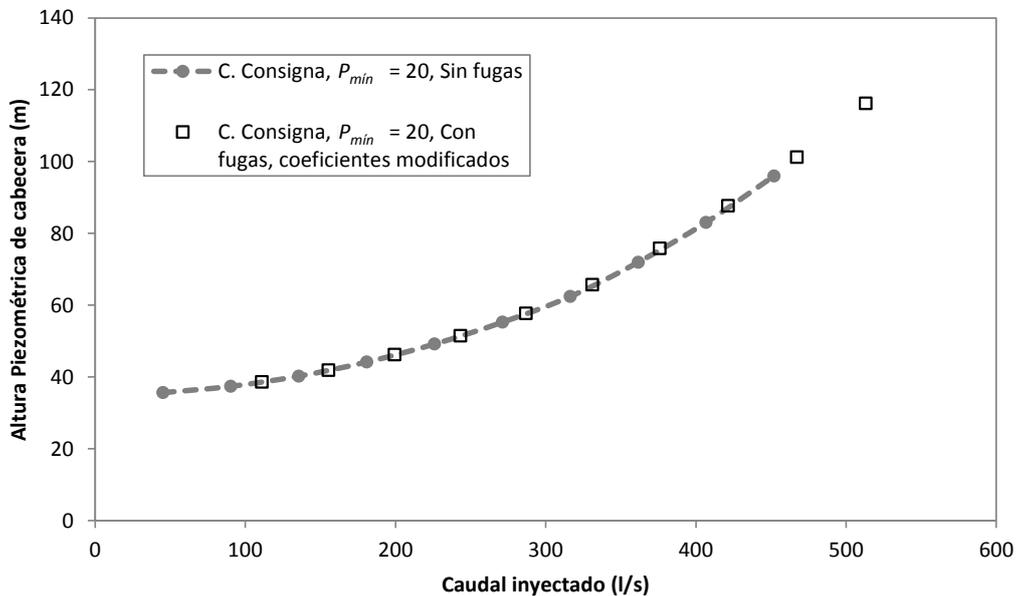


Fig. 3.12. Curvas de consigna para diferentes valores de coeficientes de fugas

Por lo observado (Fig. 3.10, 3.11 y 3.12), con variaciones uniformes de las fugas en la red, la curva de consigna con fugas se ajusta a la curva de consigna sin fugas. El caudal transportado con fugas o sin ellas requiere de una producción energética en cabecera que garantice el caudal demandado con una presión mínima. El ajuste hacia la derecha y arriba, se debe a que para mayor caudal (demanda más fugas) se requiere mayor altura piezométrica.

Por lo tanto, el cálculo de la curva de consigna en una red puede realizarse con la presencia o no de los emisores, que permiten simular la presencia de fugas.

Graficando los caudales demandados y caudales suministrados para los diferentes exponentes de fugas (Fig. 3.13) se observa que las curvas tienen la misma pendiente. Esta situación implica que si una red trabaja ajustándose a la curva de consigna, se tiene un caudal de fugas teórico constante, independiente del caudal demandado, asumiendo que el exponente de fugas es constante para toda la red.

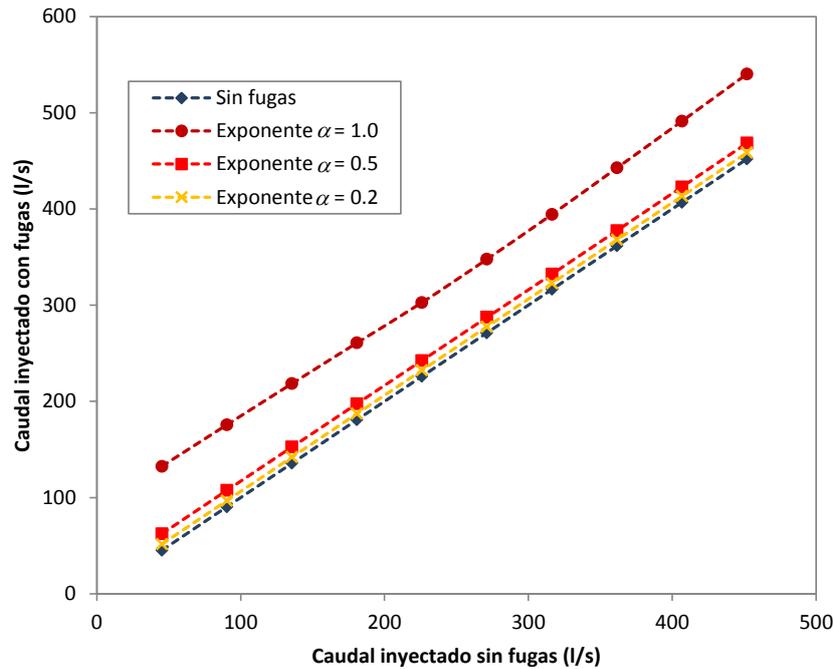


Fig. 3.13. Relación entre el caudal inyectado sin fugas y el caudal inyectado con fugas

### 3.5. Caudal máximo teórico

Al igual que en una tubería simple es posible calcular el caudal máximo que circula por la misma, tomando en cuenta las condiciones de contorno aguas arriba y abajo, como presiones o alturas manométricas, en una red o en un sector puede hacerse lo mismo.

El caudal máximo teórico es el máximo valor de caudal que se puede inyectar a la red garantizando que las presiones en los nudos no sean inferiores a un valor mínimo establecido como restricción (Ilaya-Ayza et al., 2016a). El análisis de la curva de consigna permite resolver este problema, pues se debe realizar un cálculo inverso: determinar el caudal que puede inyectarse a la red para unas condiciones de presión en los nudos y altura piezométrica en la fuente de suministro que modifica la demanda de la población. En el escenario de la demanda máxima o caudal máximo, se tiene un problema de estado estable.

La curva de consigna permite fijar las condiciones aguas abajo o en los nudos de demanda de la red, definiéndose una presión mínima que debe ser cumplida en un estado de carga específico. La condición aguas arriba, que limita las posibilidades hidráulicas de la red, está delimitada por la energía disponible en el punto de suministro; puede ser un depósito de almacenamiento, reservorio o una bomba. De esta forma, el caudal máximo teórico está descrito por la intersección de la curva de consigna, definida en base a una presión mínima, y la curva motriz de la fuente de suministro.

El caudal máximo teórico está fuertemente relacionado con la curva de consigna. Para su determinación, se requiere conocer la curva de consigna y la presión mínima de servicio en la red, además de la curva de motriz de la fuente de suministro.

$$Q_{m\acute{a}x} = f(H, P_{m\acute{i}n}, H_s), \quad (3.1)$$

donde:

$$Q_{m\acute{a}x} = \text{caudal m\acute{a}ximo te\acute{o}rico de la red,}$$

$H$  = curva de consigna de la red,

$P_{mín}$  = presión mínima de servicio en los nudos,

$H_s$  = curva motriz de la fuente de suministro, nivel de agua en depósito o curva de bombeo.

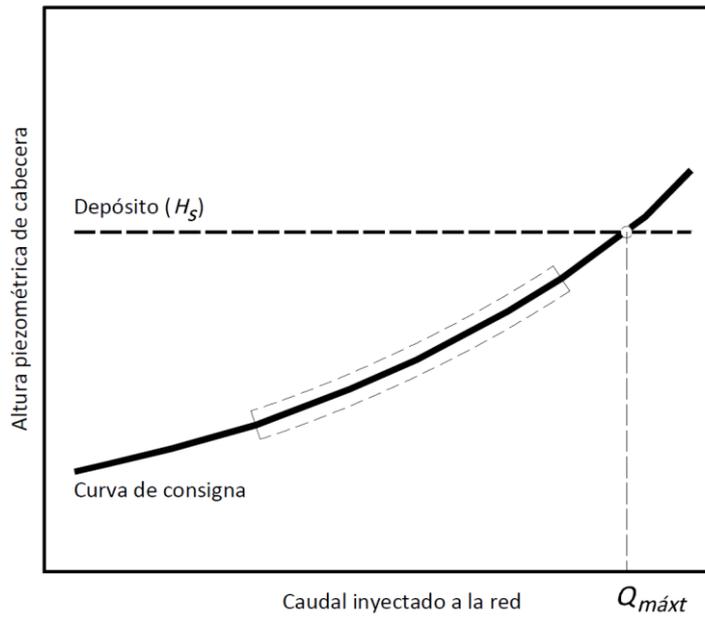


Fig. 3.14. Caudal máximo teórico para una red alimentada por un depósito.

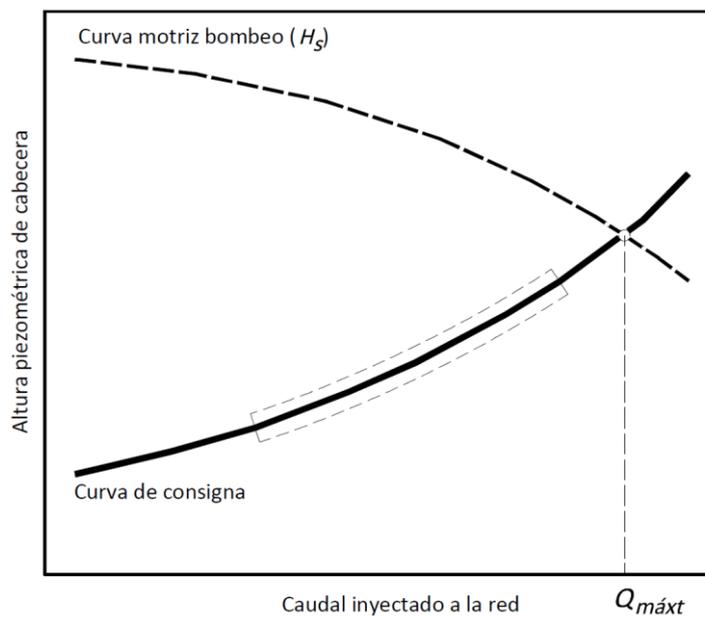


Fig. 3.15. Caudal máximo teórico para una red alimentada por un equipo de bombeo

El caudal máximo teórico, define un estado de carga en el cual se garantiza el cumplimiento de la presión mínima en el nudo más desfavorable en base a la energía disponible de cabecera (ver Fig. 3.16).

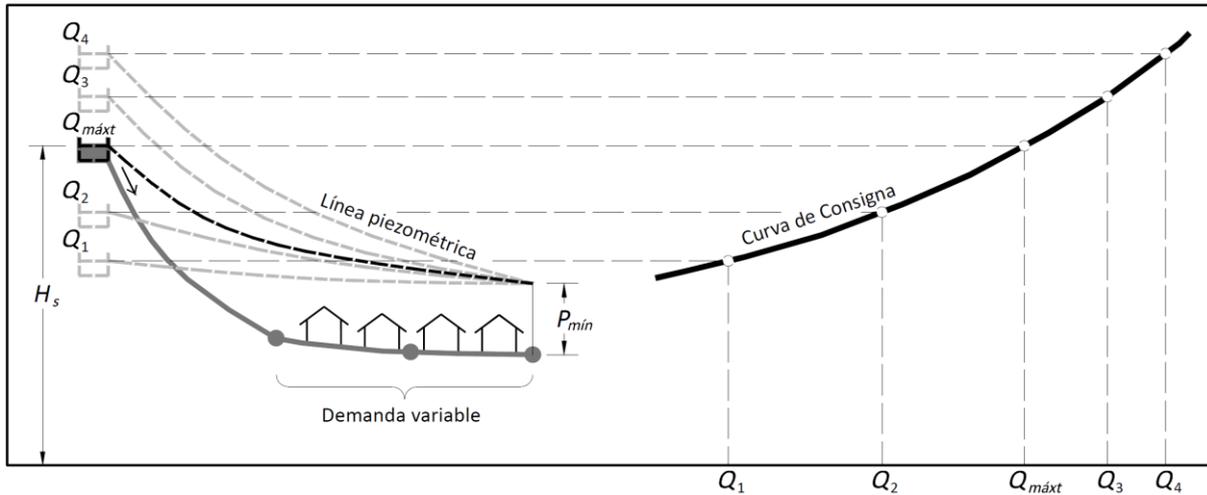


Fig. 3.16. Caudal máximo teórico

La modificación en el factor de demanda ( $k_j$ ) en el modelo, para un determinado estado de carga ( $j$ ), permite que los caudales demandados ( $Q_i$ ) en los nudos ( $i$ ) adopten nuevos valores. En consecuencia, el comportamiento hidráulico de la red responde a este nuevo estado de carga, para el cual se obtiene la altura piezométrica de cabecera ( $H_j$ ) y la altura piezométrica del punto de suministro ( $Hs_j$ ).

$$k_j \rightarrow Q_j = \sum k_j \cdot Q_i + Q_f \rightarrow H_j, Hs_j, \quad (3.2)$$

donde:

$i$  = nudos de la red,

$j$  = estado de carga,

$k_j$  = factor de demanda para el estado de carga  $j$ ,

$Q_f$  = caudal total de fugas,

$Q_j$  = caudal total de la red para en estado de carga  $j$ ,

$Q_i$  = caudal del nudo  $i$ ,

$H_j$  = altura piezométrica de cabecera para el estado de carga  $j$ , o altura en la curva de consigna para el estado de carga  $j$ ,

$Hs_j$  = altura piezométrica de la fuente de suministro para el estado de carga  $j$ .

Como se demostró en el acápite anterior, la curva de consigna de un modelo que incluye fugas se ajusta a la curva de consigna del modelo sin fugas, por lo que este elemento puede suprimirse para facilitar los cálculos.

El cálculo de la altura piezométrica en cabecera es resultado de adoptar un estado de carga en los nudos de consumo, por lo que se parte de un caudal conocido. Realizar el cálculo inverso, es decir, calcular el caudal a partir de la altura piezométrica, es una tarea que requiere otro enfoque, por lo que se recurre a un proceso iterativo cuyo objetivo es encontrar el caudal máximo teórico.

La curva motriz de suministro está definida por la recta que establece el nivel mínimo del depósito o la curva motriz de la bomba; esta última permite generalizar el procedimiento; además implica usar una altura piezométrica de suministro no estática.

$$H_s = A - B \cdot Q_n^2, \quad (3.3)$$

donde:

$A, B$  = coeficientes

$Q_n$  = caudal suministrado

Iterando a partir de dos puntos iniciales, es posible determinar la intersección de ambas curvas, obteniéndose de esta forma el caudal máximo teórico.

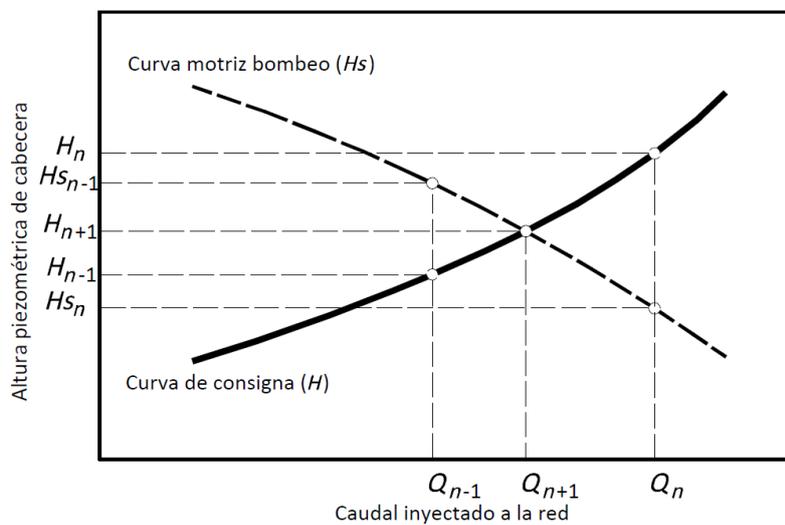


Fig. 3.17. Elementos para el cálculo del caudal máximo teórico

El caudal nuevo, para el proceso de iteración, está definido por la relación:

$$Q_{n+1} = \left( \frac{Q_n - Q_{n-1}}{H_n - H_{n-1}} \right) (H_{n+1} - H_n) + Q_n. \quad (3.4)$$

Como se busca que la altura en la curva de consigna coincida con la curva motriz de la fuente de suministro se considera que:

$$H_{n+1} = \frac{H_{s_n} + H_{s_{n-1}}}{2}, \quad (3.5)$$

$$Q_{n+1} = \left( \frac{Q_n - Q_{n-1}}{H_n - H_{n-1}} \right) \left( \frac{H_{s_n} + H_{s_{n-1}}}{2} - H_n \right) + Q_n. \quad (3.6)$$

Este nuevo caudal es utilizado para el cálculo del nuevo factor de demanda, estableciendo de esta forma un nuevo estado de carga, que define, a su vez, los caudales en los nudos y nuevos valores de altura piezométrica en cabecera y de suministro.

$$k_{n+1} = \frac{Q_{n+1}}{Q} \rightarrow Q_{n+1} = \sum k_{n+1} \cdot Q_i \rightarrow H_{n+1}, Hs_{n+1}, \quad (3.7)$$

donde:

$Q$  = caudal medio diario de la red

El factor de demanda se va modificando hasta que las alturas piezométricas en cabecera y de suministro sean iguales. Con esta base, el diagrama de flujo para calcular el caudal máximo teórico es:

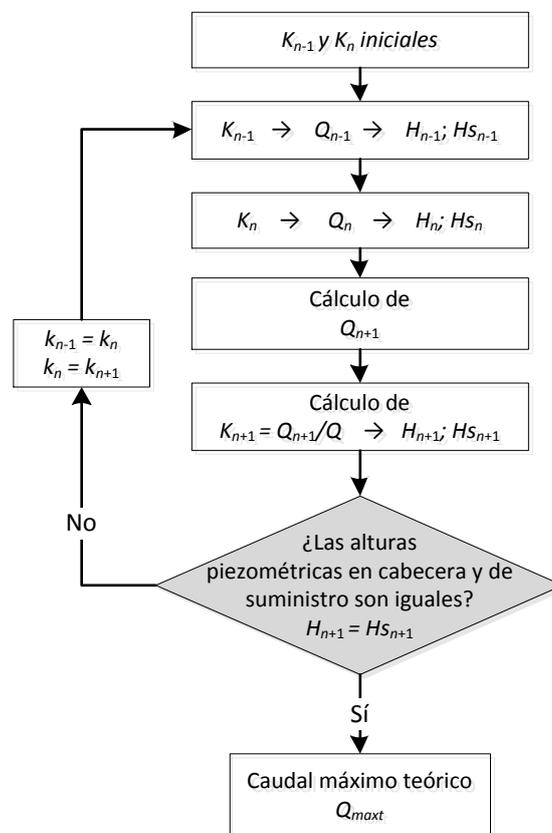


Fig. 3.18. Diagrama de flujo para la determinación del caudal máximo teórico de la red

Cuando la altura piezométrica en la fuente de suministro es muy baja, además de tener la cota también baja, por ejemplo en sectores con suministro intermitente en horas punta (ver Fig. 3.19), no existe un punto de intersección entre la curva motriz y la curva de consigna. Al tener una altura piezométrica de cabecera insuficiente, el sector o la red con esta configuración tiene capacidad nula para un suministro adecuado. En estos casos, se adopta un caudal máximo teórico igual a cero.

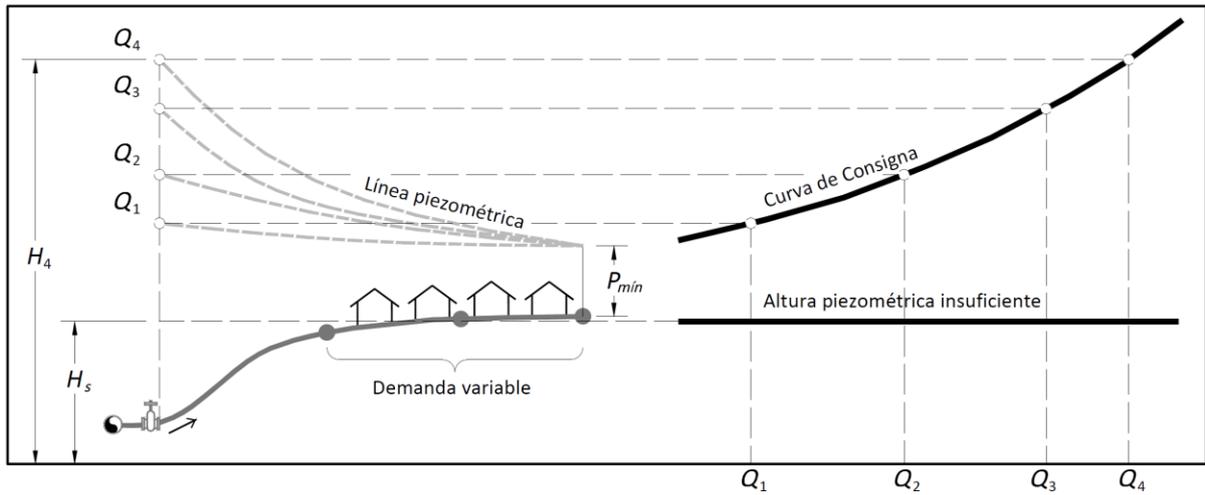


Fig. 3.19. Capacidad de la red nula por altura piezométrica de la fuente insuficiente

Para mejorar esta situación, es necesario que el sector o la red incremente la altura piezométrica en la fuente, para lograr la capacidad necesaria que permita un buen servicio.

### 3.6. Capacidad de la red con más de una fuente de suministro

Como la capacidad de la red depende de la curva de consigna, cuando se cuenta con más de un punto de suministro o alimentación, se debe definir una curva de consigna propia para cada punto de inyección. Para este fin, se deben fijar los niveles de aporte deseados en cada uno de los puntos de suministro (Martínez et al., 2009); pueden usarse porcentajes que deben ajustarse en el cálculo de cada uno de los estados de carga.

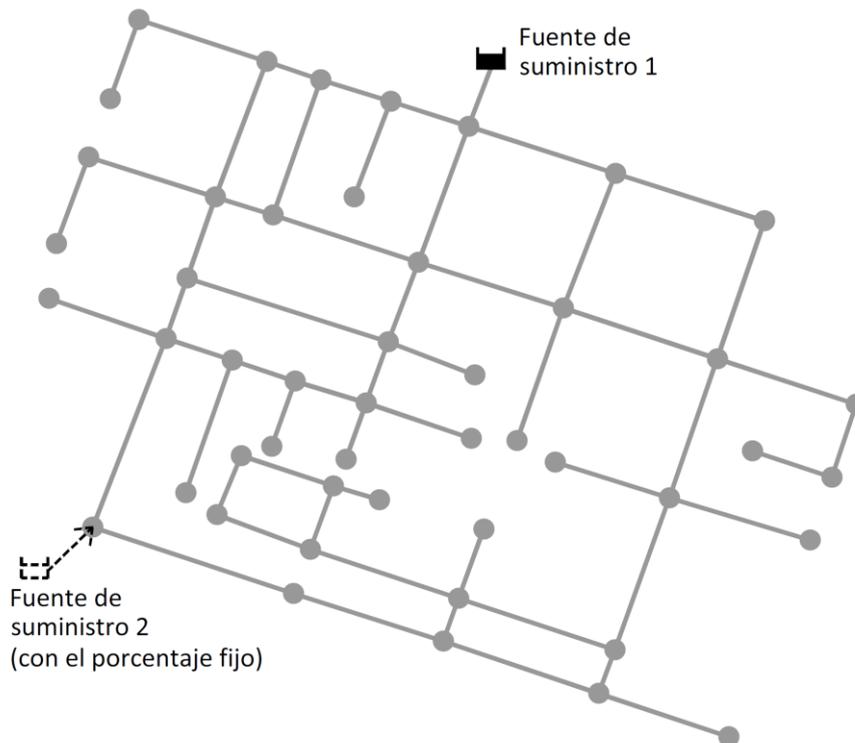


Fig. 3.20. Red con dos puntos de inyección o fuentes de suministro

Debe fijarse la cota piezométrica de una de las fuentes de suministro; la otra fuente debe ser definida como un nudo que inyecta un caudal conocido a la red, un porcentaje de consumo fijo; de esta forma se asegura que el porcentaje restante sea inyectado por la primera fuente. Al configurar la segunda fuente como un nudo en el cual se inyecta agua a la red, es posible calcular su altura piezométrica. Bajo estas condiciones se pueden calcular las cotas piezométricas de cada una de las fuentes de suministro y la presión mínima en la red; esta presión debe ser igual a la presión mínima de referencia; el ajuste de las cotas piezométricas es realizado adicionando a las actuales la diferencia entre la presión mínima calculada y la presión mínima de referencia (Martínez et al., 2009). Se construyen las curvas de consigna con las alturas piezométricas de cada una de las fuentes y los caudales inyectados respectivos.

Al igual que en las redes con una sola fuente de suministro, en una red con varias fuentes es posible obtener el caudal máximo teórico que es capaz de suministrar cada uno de los puntos de inyección (ver Fig. 3.20). El caudal máximo teórico de toda la red es el resultado de la suma de los caudales máximos teóricos calculados en cada fuente de suministro (Fig. 3.21).

$$Q_{máxt} = \sum_{s=1}^{ts} Q_{máxt,s} , \quad (3.8)$$

donde:

$Q_{máxt,s}$  = caudal máximo teórico de la fuente de suministro  $s$ ,

$ts$  = número total de fuentes de suministro.

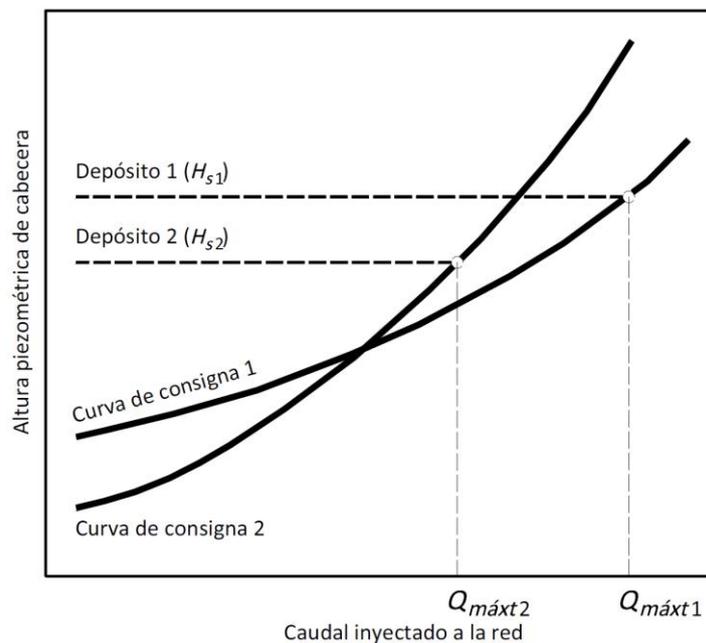


Fig. 3.21. Curvas de consigna y caudal máximo teórico de cada fuente de suministro

### 3.7. Caudal máximo requerido en suministro continuo

La capacidad de la red debe ser contrastada con el requerimiento de caudal de la población, o viceversa. Para lo cual, se debe conocer el requerimiento de la población, que corresponde al valor pico de la demanda según el tipo de suministro, continuo o intermitente.

En sistemas con suministro continuo, el caudal máximo requerido es igual al caudal máximo horario.

$$Q_{máxr} = k_p \cdot \frac{Pob \cdot D}{86400} = k_p \cdot Q_m, \quad (3.9)$$

donde:

$Q_{máxr}$  = caudal máximo requerido,

$k_p$  = factor punta,

$Pob$  = población,

$D$  = dotación,

$Q_m$  = caudal medio diario.

Para el cálculo del caudal máximo requerido, además de la demanda de la población, debe tomarse en cuenta las previsiones de crecimiento, pérdidas y otros usos o necesidades de agua en el futuro.

Cuando la capacidad de la red o caudal máximo teórico es inferior al caudal máximo requerido, existen deficiencias en el servicio. Se tiene un suministro con presiones bajas o incluso puede llegarse a tener un suministro intermitente. En sistemas con escasez económica o con mala gestión, el suministro intermitente suele ser una respuesta a la reducción de la capacidad de la red, percibida erróneamente como escasez física de agua.

### 3.8. Caudal máximo requerido en suministro intermitente

El cálculo del caudal máximo requerido en sistemas con suministro intermitente dependerá de la configuración de la red. En redes que no se encuentran sectorizadas, en las cuales existe un solo periodo de suministro, el caudal máximo requerido puede ser calculado como:

$$Q_{máxr} = Q_{int} = \left( \frac{24}{t} \right) \cdot Q_m, \quad (3.10)$$

donde:

$Q_{int}$  = caudal medio del periodo de suministro o caudal en suministro intermitente,

$t$  = tiempo de suministro por día, en horas,

$Q_m$  = caudal medio diario.

Esta misma relación puede ser utilizada para evaluar el caudal máximo requerido de cada uno de los sectores de la red de forma individual.

Cuando la red está sectorizada y los sectores tienen horarios de suministro diferentes, es necesario calcular el caudal punta que representa el máximo requerimiento de la red. Para ello, se tendrá que elaborar la curva de suministro del sistema en base a la demanda media de cada sector, las horas de suministro y los horarios de entrega de agua. La simultaneidad de los horarios de suministro de los sectores produce caudales pico grandes (Ilaya-Ayza et al., 2014).

### 3.9. Nudos favorables y desfavorables en una red

En una red, en la cual los usuarios cuentan con depósitos domiciliarios, la demanda es dependiente de la presión disponible. Los usuarios que cuentan con presiones grandes recolectan más agua que los usuarios con baja presión (Vairavamoorthy & Elango, 2002); estos últimos pueden llegar a no cubrir su demanda del todo (Chandapillai et al., 2012).

Esta situación permite realizar una clasificación entre nudos favorables y nudos desfavorables en la red. Es decir, existen nudos que con niveles suficientes de presión pueden cubrir el caudal demandado, y otros que disponen de presiones bajas que limitan su suministro, llegando en casos extremos a caudales nulos. Este tipo de problemas son causa de la inequidad en los sistemas con suministro intermitente.

En el presente acápite, se plantea una forma de identificación de nudos favorables y desfavorables. Para lo cual se considera que la demanda es dependiente de la presión; por lo tanto, existe una diferencia entre el caudal demandado y el caudal suministrado. Asimismo, se evalúa el valor del límite de presión ( $H_i$ ), para establecer el valor más conveniente, con el que se puede trabajar en el análisis en PDD.

La siguiente red modelo es utilizada para analizar la diferencia entre nudos favorables y desfavorables. Se considera una demanda igual en todos los nudos, con el fin de facilitar la evaluación de las variaciones en el caudal suministrado a partir de este patrón. Asimismo, todos los nudos en la red se encuentran en un mismo nivel; el desnivel entre el plano de los nudos y el depósito es de 50 m.

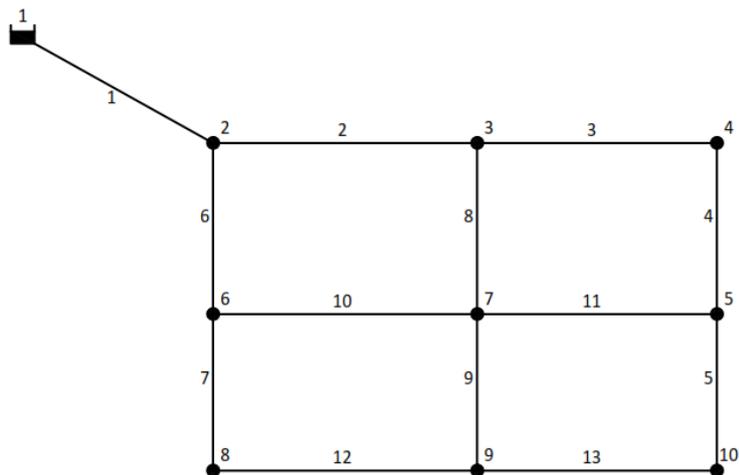


Fig. 3.22. Red modelo para el análisis de nudos favorables y desfavorables

Tabla 3.3. Características de los nudos de la red

Nudo	Cota (m)	Demanda (l/s)
2	0	30
3	0	30
4	0	30
5	0	30
6	0	30
7	0	30
8	0	30
9	0	30
10	0	30
1	50	30

Tabla 3.4. Características de las tuberías de la red

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)
1	432	300
2	250	200
3	250	200
4	250	200
5	250	200
6	250	200
7	250	200
8	250	200
9	250	200
10	250	200
11	320	250
12	250	200
13	250	200

El análisis PDD requiere establecer inicialmente la relación entre la demanda y la presión, y el límite de presión (que define el límite entre el análisis PDD y DDA). Para evaluar el límite de presión ( $H_t$ ) se adoptan diferentes valores; el exponente de la relación demanda/presión ( $\alpha$ ) utilizado es 0.5.

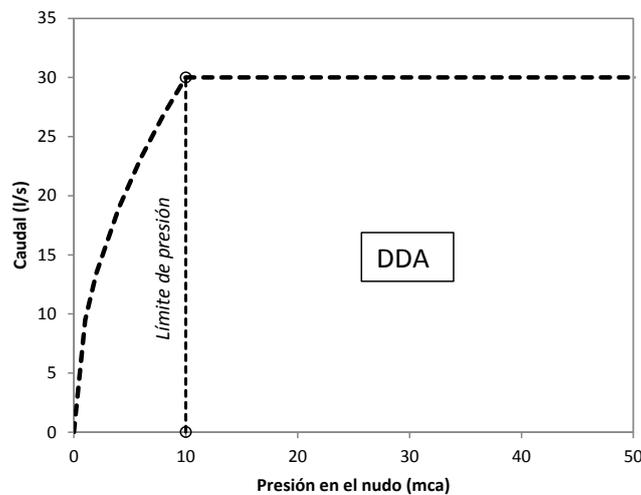


Fig. 3.23. Relación entre presión y caudal suministrado con  $H_t = 10$  mca

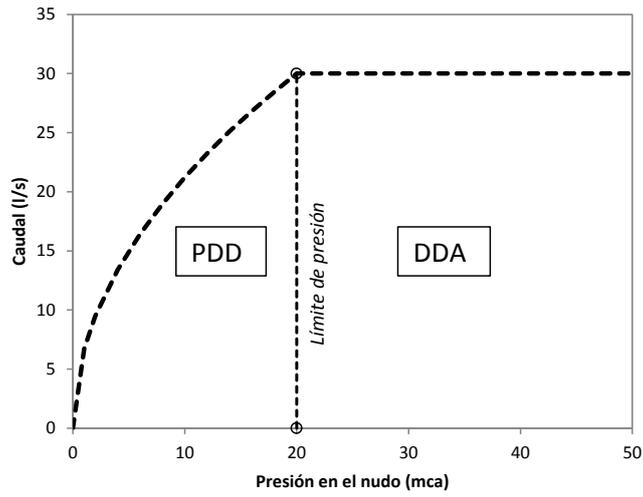


Fig. 3.24. Relación entre presión y caudal suministrado con  $H_1 = 20$  mca

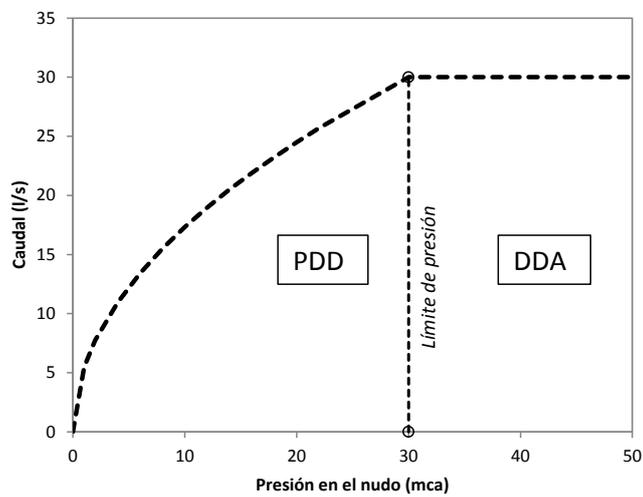


Fig. 3.25. Relación entre presión y caudal suministrado con  $H_1 = 30$  mca

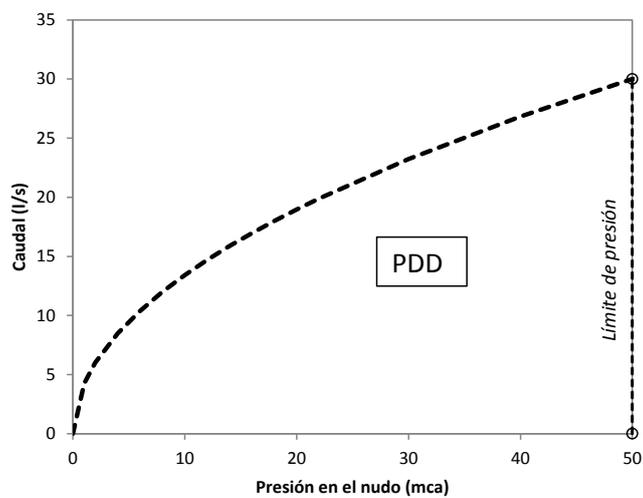


Fig. 3.26. Relación entre presión y caudal suministrado con  $H_1 = 50$  mca

Para el cálculo se utiliza EPANET 2.0, modificado por Pathirana (2010), el cual permite realizar el cálculo hidráulico con la demanda dependiente de la presión.

Para el análisis, se van incrementando los caudales demandados simultáneamente en todos los nudos; bajo estos estados de carga se calcula la presión disponible en el nudo en DDA y la presión disponible con el caudal suministrado en PDD. En el cálculo en PDD, se realiza la diferencia entre caudal demandado y caudal suministrado, pues el caudal demandado corresponde al dato y el caudal suministrado es el valor calculado. A continuación se muestran los valores calculados en cada uno de los nudos de la red, a diferentes valores de  $H_i$ , para evaluar la interrelación entre PDD y DDA.

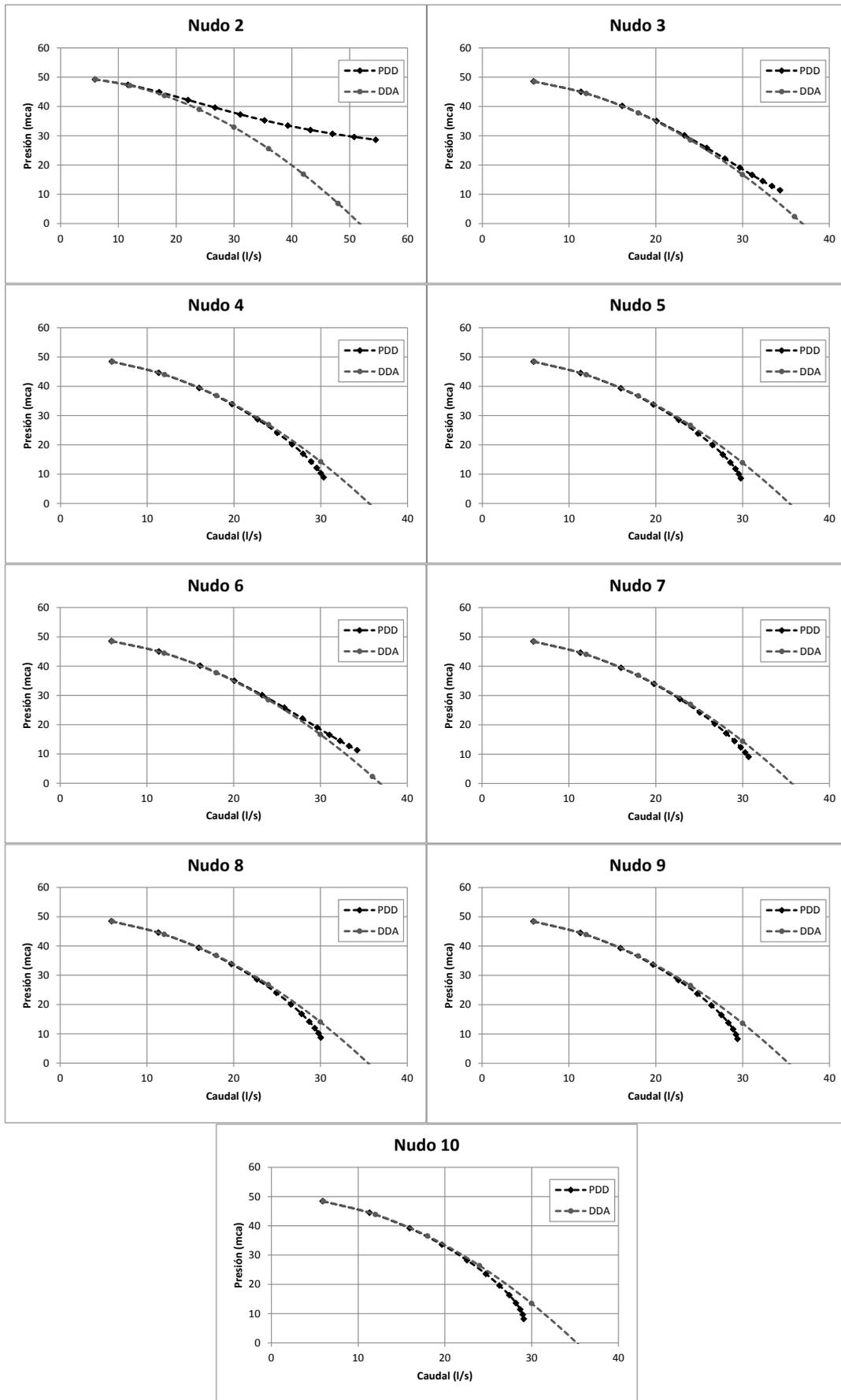


Fig. 3.27. Presión y caudal suministrado en cada nudo en DDA y PDD para  $H_t = 50$  mca

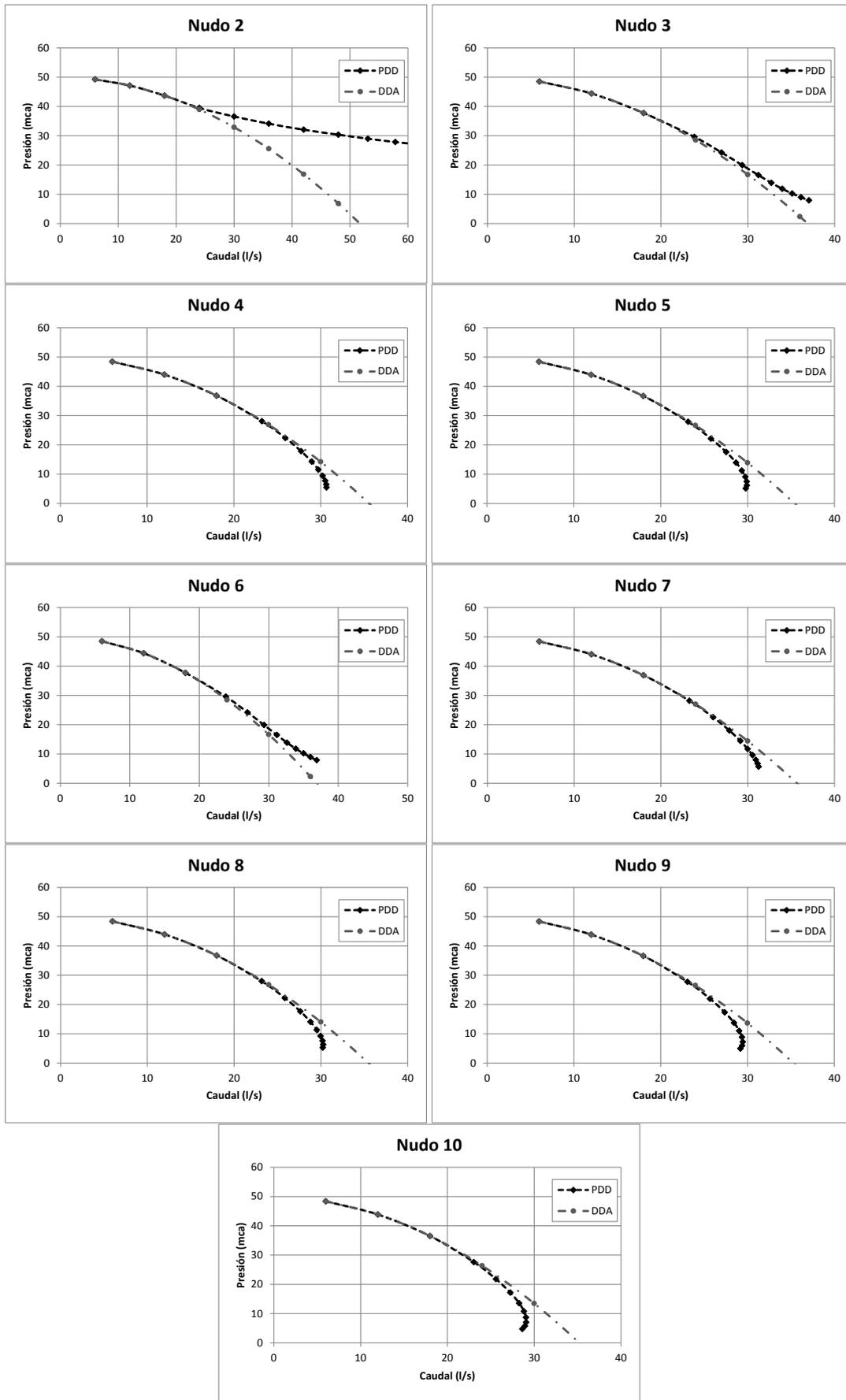


Fig. 3.28. Presión y caudal suministrado en cada nudo en DDA y PDD para  $H_t = 30$  mca

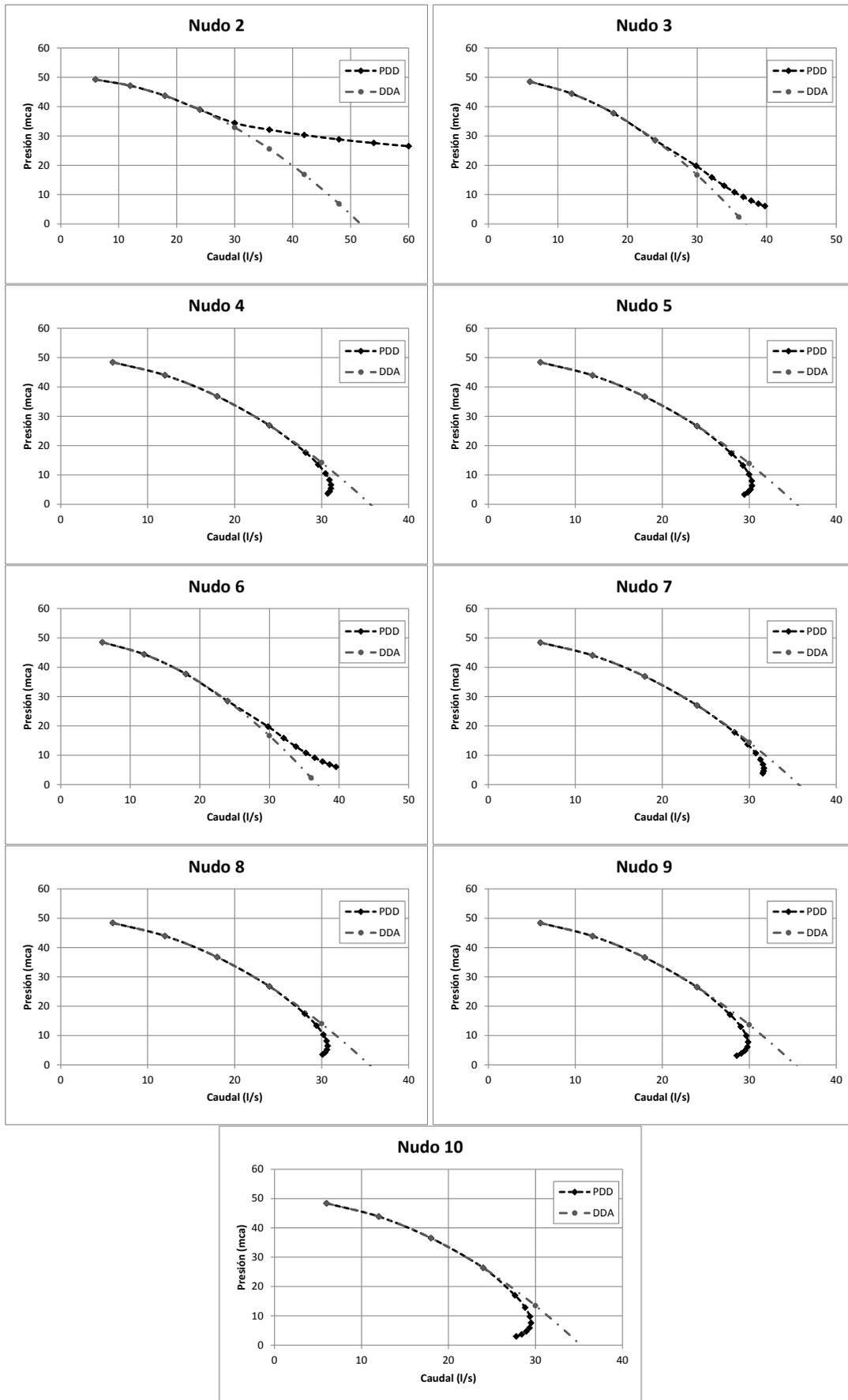


Fig. 3.29. Presión y caudal suministrado en cada nudo en DDA y PDD para  $H_t = 20$  mca

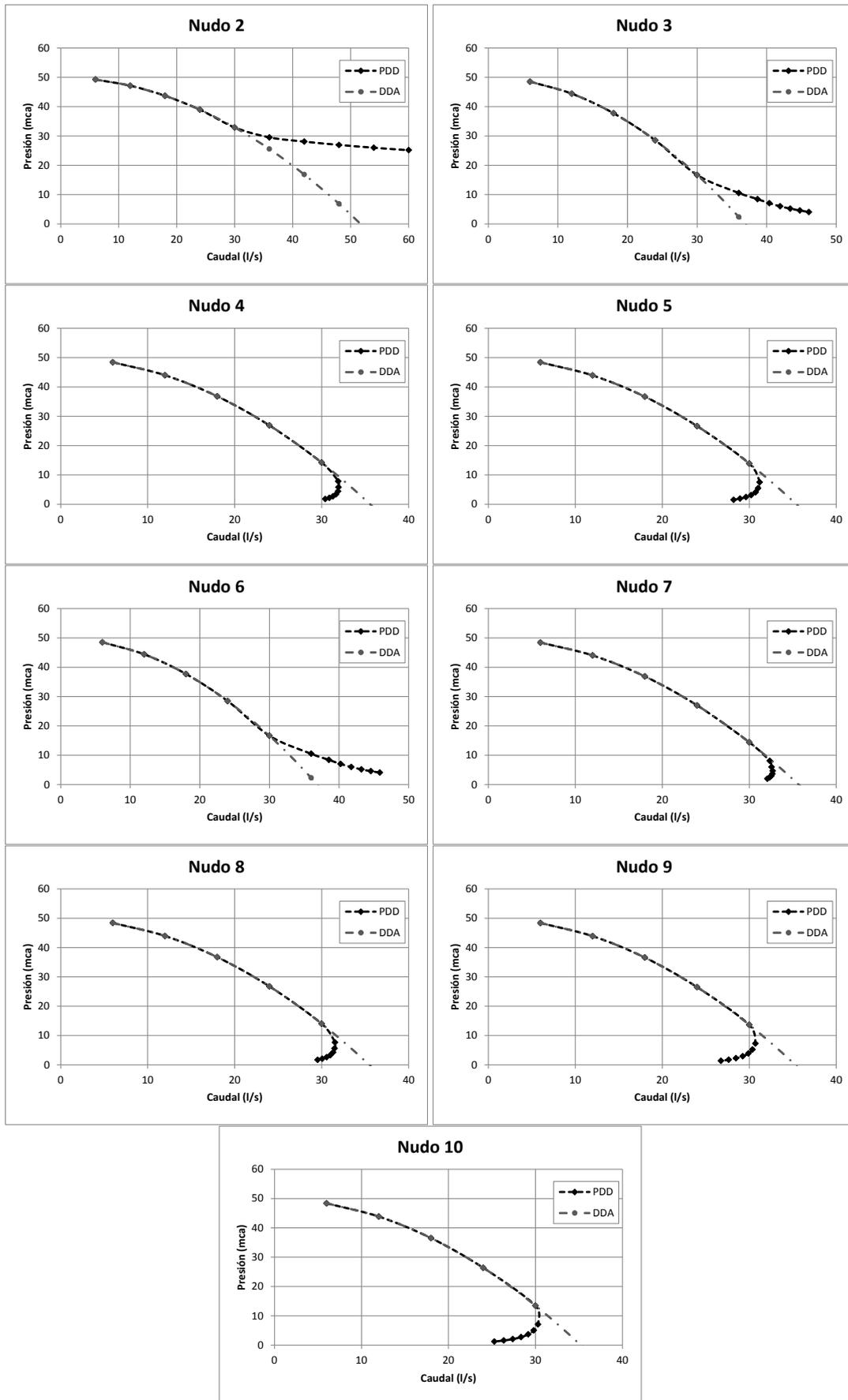


Fig. 3.30. Presión y caudal suministrado en cada nudo en DDA y PDD para  $H_t = 10$  mca

Los gráficos muestran que la posición del nudo en la red resulta ser muy determinante para recibir el caudal demandado. Aquellos nudos que cuentan con mayor presión de servicio, ubicados en zonas favorables (nudos 2, 3 y 6), pueden incrementar su demanda sin problemas, pues la red no restringe, por sí sola, el suministro; perjudicando sin duda a los demás nudos (nudos 4, 5, 7, 8, 9 y 10), los cuales ven limitado su suministro. Entre estos nudos desfavorables existe un caudal máximo de suministro que no puede ser superado; debido a las restricciones que imponen los consumos y la misma configuración de la red, muchas veces este caudal es menor al requerido por los usuarios.

Al comparar los caudales demandados en un escenarios PDD con los valores DDA, es posible ver cómo el caudal y la presión en PDD siguen a la curva DDA hasta que los nudos desfavorables pierden presión; por lo tanto, disponen de menor caudal suministrado; la reducción del caudal permite la reducción de la pérdida de carga en tramos aguas arriba y en consecuencia se dispone de mayor presión para los nudos favorables.

Es característico en los nudos favorables que la pendiente de la curva de suministro sea menor que la pendiente de la curva definida en DDA, favoreciendo sus posibilidades de obtener mayor caudal de suministro por la red; en sistemas en los que no existe medición se dan las condiciones ideales para el derroche de agua. Por el contrario, los nudos desfavorables tienen una curva de suministro que cae con mayor pendiente, lo cual tiende a limitar su caudal de suministro. Generalmente, las quejas de la población debidas a la falta de presión y agua provienen de este tipo de nudos. Es común, cuando no existe control de los caudales consumidos, asumir esta falta de agua debida a las restricciones de la red como escasez física del recurso. Una percepción que puede dar origen a decisiones equivocadas en la gestión del sistema, como optar por el suministro intermitente.

El cálculo en PDD permite una mejor aproximación para la modelización del suministro intermitente en horas de consumo con presiones bajas. Sin embargo, el cálculo en DDA otorga mayores niveles de seguridad en el diseño.

Una forma de evaluación puntual si el nudo es favorable o no, bajo un determinado estado de carga, es a través de la relación entre el caudal suministrado y el caudal demandado:

$$s_k = \frac{Q_{sum,k}}{Q_{dem,k}}, \quad ( 3.11. )$$

donde:

$s_k$  = relación entre el caudal suministrado y el caudal demandado del nudo  $k$ ,

$Q_{sum,k}$  = caudal suministrado en el nudo  $k$ ,

$Q_{dem,k}$  = caudal demandado en el nudo  $k$ .

Cuando esta relación tiene valores superiores a 1 el nudo es favorable y con valores menores a 1 el nudo es considerado desfavorable.

El caudal suministrado es diferente al caudal demandado en PDD; por otro lado, en análisis en DDA ambos caudales son iguales.

En los siguientes gráficos se muestra la evolución del caudal suministrado mientras crece el caudal demandado. Las curvas son diferenciadas por el límite de presión ( $H_t$ ). A valores pequeños de  $H_t$  (Fig. 3.33 y 3.34), los nudos de mayor presión trabajan con la demanda independiente de la presión hasta valores de demanda grandes; los nudos con presiones bajas reducen su caudal de suministro drásticamente a medida que la demanda crece. Este comportamiento en un sistema con suministro

intermitente no es real, pues incluso los nudos con presiones elevadas tienen un suministro dependiente de la presión debido a la presencia de los depósitos domiciliarios.

Cuando  $H_t$  es mayor (Fig. 3.31 y 3.32), pocos son los nudos que independizan su demanda de la presión. Por lo tanto, es recomendable que la modelización de sistemas con suministro intermitente se realice con el mayor valor de  $H_t$ ; de esta forma se incluye también a los nudos que presentan presiones grandes.

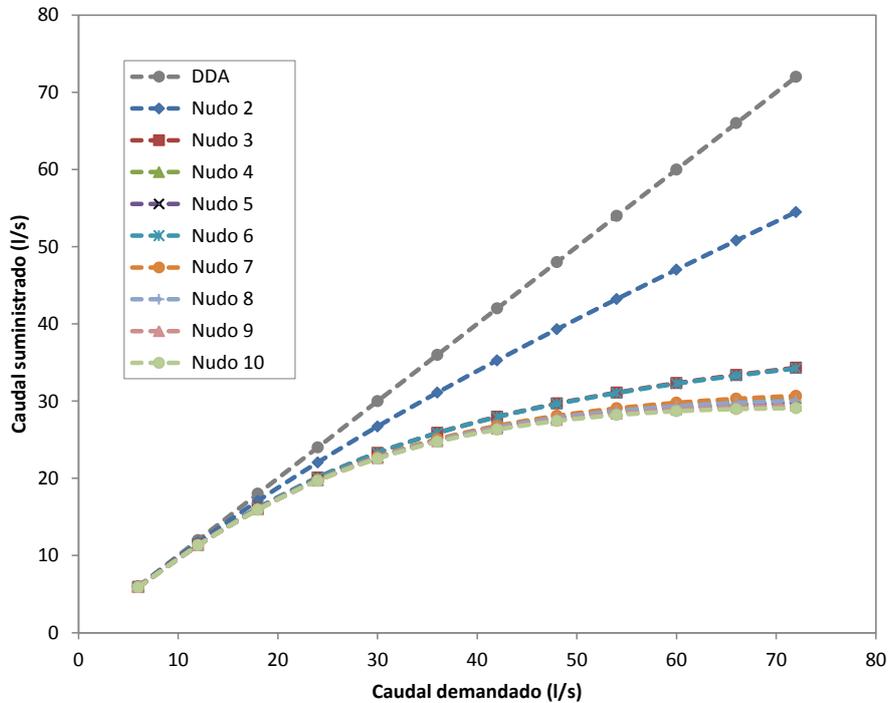


Fig. 3.31. Relación entre el caudal demandado y suministrado en cada nudo para  $H_t = 50$  mca

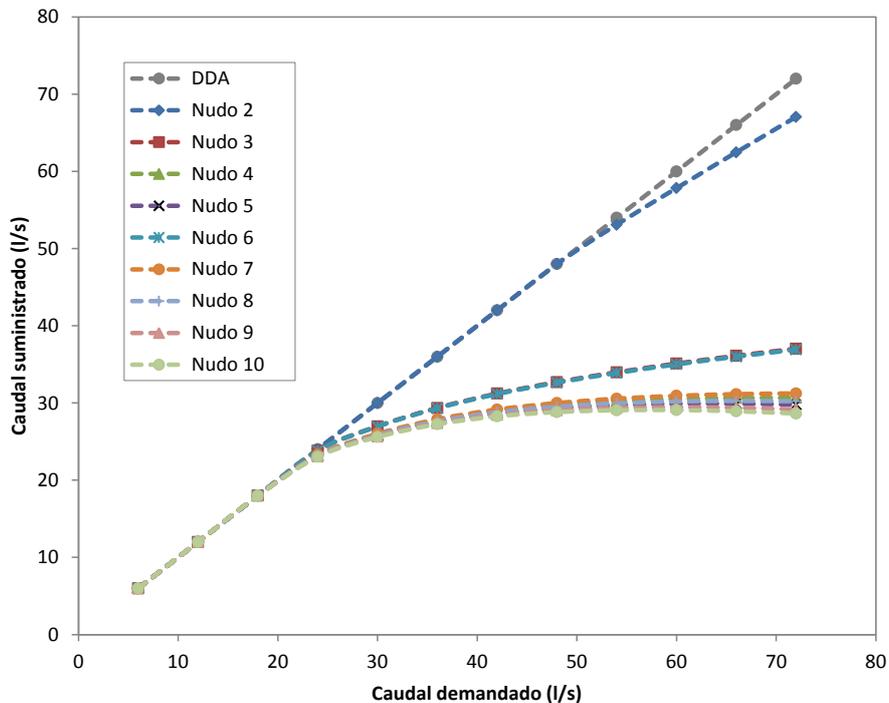


Fig. 3.32. Relación entre el caudal demandado y suministrado en cada nudo para  $H_t = 30$  mca

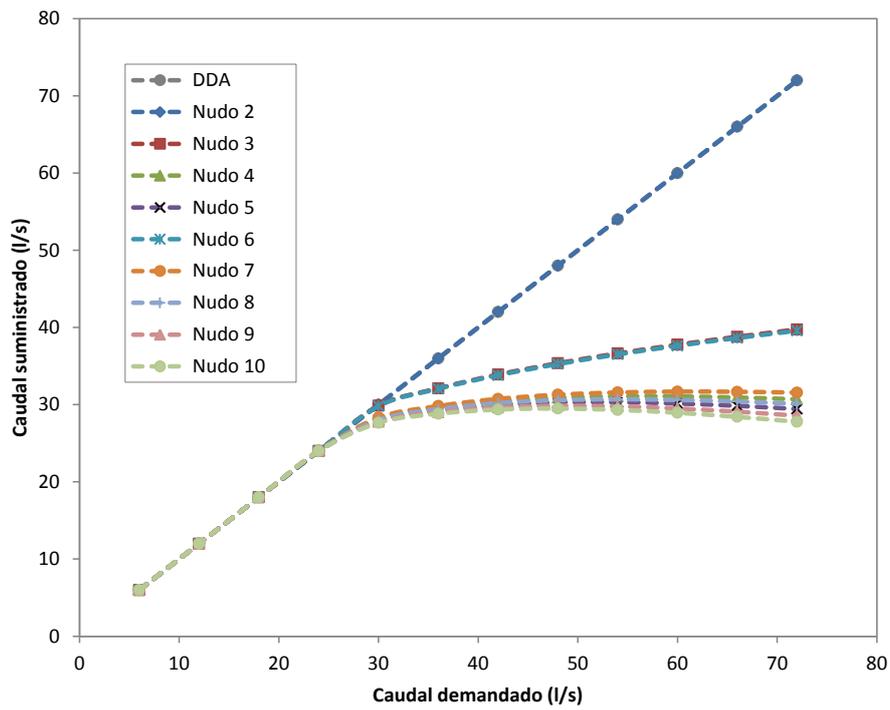


Fig. 3.33. Relación entre el caudal demandado y suministrado en cada nudo para  $H_t = 20$  mca

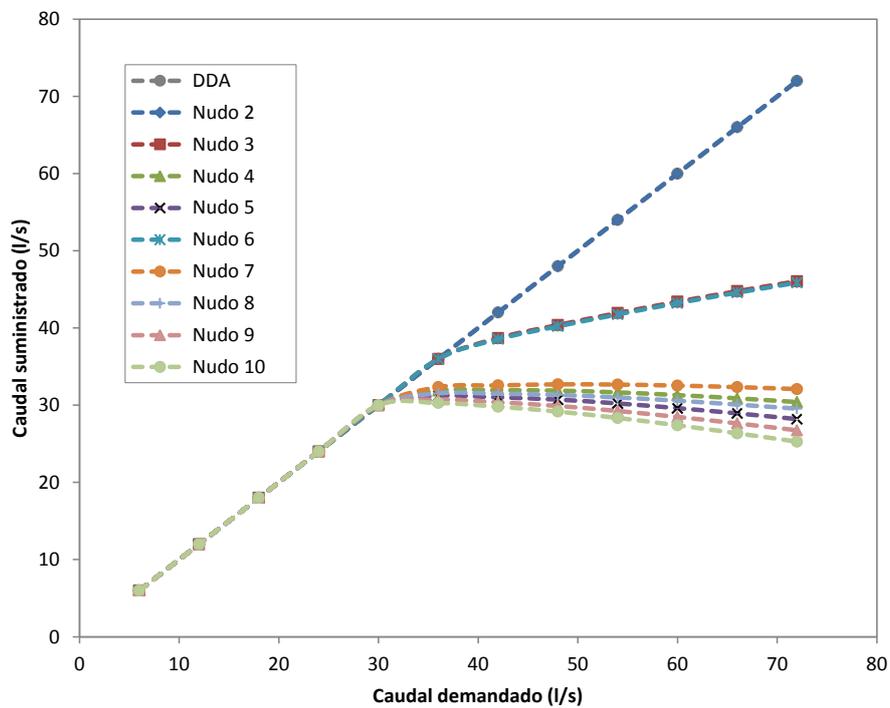


Fig. 3.34. Relación entre el caudal demandado y suministrado en cada nudo para  $H_t = 10$  mca

Aunque la modelización en PDD permite tener mayor proximidad a la realidad de los sistemas con suministro intermitente, la modelización usando DDA permite alcanzar estados más desventajosos

con relación a la presión de suministro. Mientras en PDD no se alcanzan valores negativos, en DDA sí es posible que el modelo arroje presiones negativas. Por lo tanto, se considera que la modelización en PDD es conveniente para la evaluación y gestión de un sistema con suministro intermitente, y la modelización en DDA es recomendable para el diseño, mejora de la red y el proceso de transición a suministro continuo. Asimismo, es importante considerar que en suministro continuo ya no son necesarios los depósitos domiciliarios, por lo tanto es preciso retirarlos del sistema. En consecuencia, el modelo en DDA es más útil para lograr el suministro continuo.

### **3.10. La capacidad de la red y su relación con el suministro intermitente**

La evaluación de la capacidad de la red de suministro es muy importante en el diagnóstico de un sistema de agua potable, ya sea con suministro continuo o intermitente. Permite identificar las deficiencias de la red a través de magnitudes de caudal, con lo cual la comparación con la demanda de la población es más apropiada.

Una red de suministro debe ser capaz de transportar el caudal demandado o requerido por la población, otorgando la suficiente presión de servicio en cada uno de los nudos. Por lo tanto, siempre que el caudal máximo teórico sea superior al caudal máximo requerido se cumplirá esta condición.

El suministro intermitente también se produce cuando la capacidad hidráulica de la red no puede satisfacer la demanda, o cuando la red está muy deteriorada (Charalambous, 2012a).

Si el requerimiento de la población es superior a la capacidad de la red, entonces se tienen problemas de presión en la red. En este escenario, los usuarios buscan proteger su suministro; por lo tanto existirá una tendencia a la instalación de depósitos domiciliarios para almacenar agua en aquellas horas en las cuales hay mayor presión; debe tomarse en cuenta que los depósitos distorsionan el patrón de suministro.

Si no existe medición a través de contadores, la situación puede agravarse, pues empezarán a notarse las diferencias entre nudos favorables y desfavorables. Algunos usuarios tienen posibilidades de derrochar agua y otros no llegan a cubrir toda su demanda; por lo tanto existirán quejas de “falta de agua”, aunque en realidad es un efecto de la inequidad del suministro impuesta por la misma red. Si este escenario conflictivo es analizado desde un punto de vista de escasez de agua, no como reducción de la capacidad de la red, pueden adoptarse medidas inadecuadas como el suministro intermitente, cuando en realidad una primera solución debería ser la ampliación de la capacidad de la red.

El suministro intermitente empieza con la sectorización de la red y estableciendo horarios de suministro no simultáneos entre sectores; de esta forma se solucionan temporalmente los problemas de presión y el volumen de agua será entregado a la población en menos horas. Los síntomas de reducción de la capacidad de la red que se tenían en suministro continuo son eliminados bajo el suministro intermitente; sin embargo, no se corrige el problema y el sistema puede ser condenado a trabajar indefinidamente con suministro intermitente.

No es conveniente evaluar la capacidad de la red en condiciones de intermitencia. Aunque la red trabaje con suministro intermitente, la evaluación de la red debe realizarse para un suministro continuo.

La comparación entre el caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido en suministro continuo es muy útil para evaluar los sistemas de suministro de agua (ver Fig. 3.35). Esta comparación permite establecer cómo trabaja la red según su tipo de suministro, continuo o intermitente (Fig. 3.35 y tabla 3.5).

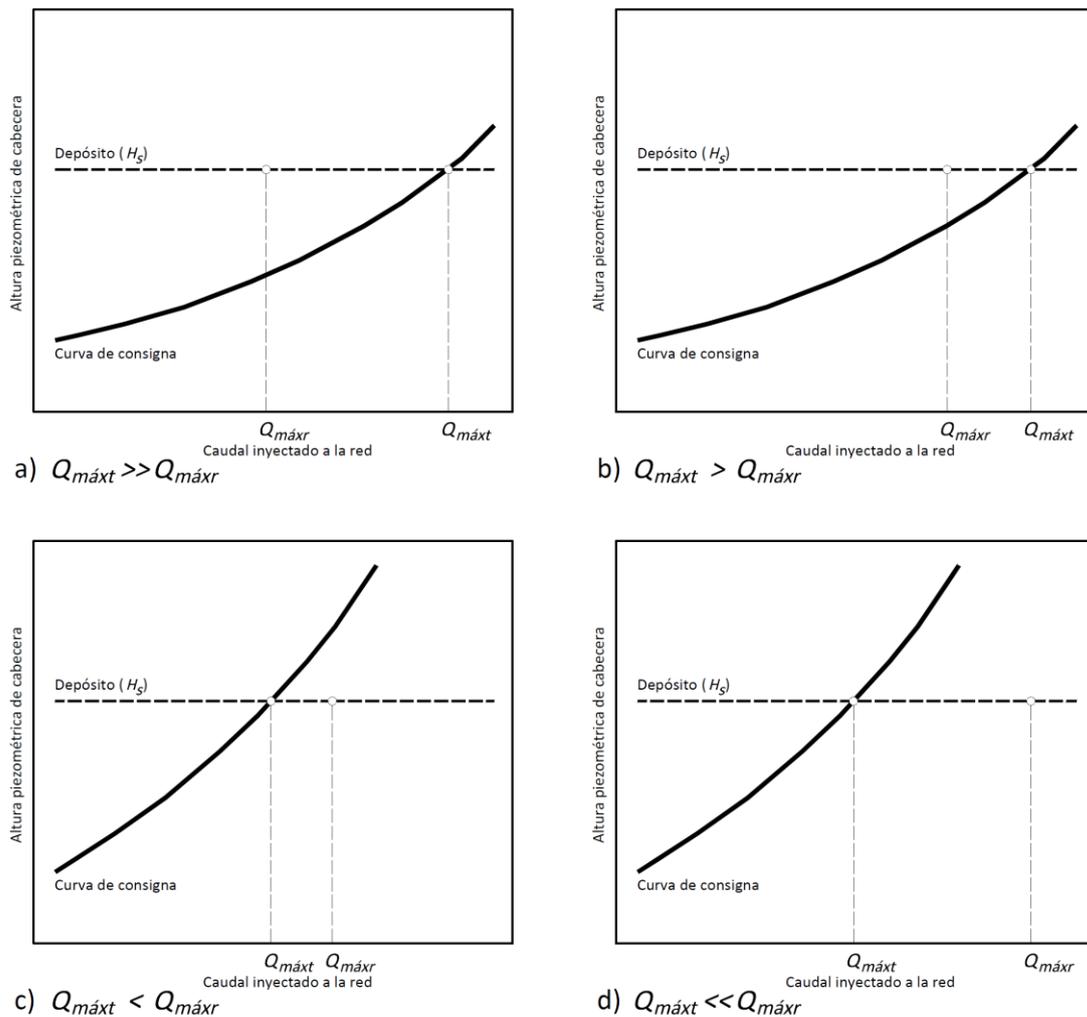


Fig. 3.35. Relación entre el caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido

Tabla 3.5. Relación entre el caudal máximo teórico, el caudal máximo requerido y el tipo de suministro de en la red

Caudal máximo teórico y Caudal máximo requerido	Observaciones referentes al tipo de suministro
$Q_{máxt} \gg Q_{máxr}$	La red está sobredimensionada. Las presiones de suministro son muy grandes. La red garantiza el suministro continuo. Si trabaja con suministro intermitente, permite el abastecimiento simultáneo sin la necesidad de sectorización.
$Q_{máxt} > Q_{máxr}$	La red trabaja de forma adecuada. Las presiones de suministro son mayores a las demandadas. La red garantiza el suministro continuo. Si trabaja con suministro intermitente puede necesitar sectorización.
$Q_{máxt} = Q_{máxr}$	La red trabaja de forma óptima. Las presiones de suministro son iguales o mayores a las demandadas. La red garantiza el suministro continuo. Si trabaja con suministro intermitente puede necesitar sectorización.
$Q_{máxt} < Q_{máxr}$	La red puede trabajar con suministro continuo pero de forma deficiente. Las presiones de suministro son menores a presión mínima requerida. Existe el riesgo de tener suministro intermitente. Para que siga trabajando con suministro continuo con presiones adecuadas requiere ampliación de la capacidad de la red.
$Q_{máxt} \ll Q_{máxr}$	La red no puede trabajar con suministro continuo por lo que se recurre al suministro intermitente. Se obtienen presiones negativas en el modelo matemático de la red calculando en DDA. Para que trabaje con suministro continuo requiere la ampliación de la capacidad de la red.

Fuente: Ilaya-Ayza, et al. (2015e)

En el caso de la evaluación de un sector aislado de la red, sí es posible y es recomendable su análisis a través del requerimiento de agua en estado de intermitencia.



## **CAPÍTULO 4. Medidas de mejora a corto plazo y transición del sistema con suministro intermitente a suministro continuo**

---

### **4.1. Introducción**

En este capítulo se analizan dos tipos de medidas para mejorar los sistemas con suministro intermitente: medidas a corto plazo y medidas a largo plazo. Asimismo, se establecen las interrelaciones entre las acciones que se deben llevar a cabo y la importancia de cada una en un contexto global y general para el proceso de mejora del sistema. Tras este análisis general, en los siguientes capítulos se procede a detallar cada una de las acciones propuestas.

Debe realizarse una diferenciación entre las acciones a largo plazo y las de corto plazo. Las acciones a largo plazo representan inversiones de capital irreversibles, mientras que las acciones a corto plazo se constituyen de acciones operacionales temporales o medidas de emergencia que pueden ser reversibles (Rosenberg et al., 2007).

Las acciones propuestas a corto plazo están relacionadas con mejoras en la gestión técnica del sistema con suministro intermitente, entendiéndolo como una realidad a la que se debe buscar propuestas de mejora. Las dos medidas son: la sectorización y la gestión de los horarios de suministro.

Las acciones propuestas a largo plazo buscan la transición a suministro continuo, por medio de grandes inversiones que mejoren la infraestructura del sistema hasta tener agua las veinticuatro horas del día. La propuesta de una transición gradual responde principalmente a la necesidad de plantear soluciones para las empresas de agua que gestionan sistemas con suministro intermitente en un estado de escasez económica.

El suministro intermitente es común en países en vías de desarrollo, donde se opera cada vez más en base a la gestión de la crisis, adoptando generalmente medidas de conservación en lugar de planificar (Vairavamoorthy et al., 2008). Por lo tanto, las herramientas planteadas en la presente tesis doctoral pretenden ser instrumentos para una planificación proactiva de estos sistemas de agua.

Es importante que los procesos de mejora en sistemas con suministro intermitente sean participativos e involucren la opinión de los expertos de la empresa de agua. Para este fin, se usa la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process*, AHP) (Saaty & Vargas, 2012).

## **4.2. Acciones a corto plazo**

En sistemas con suministro intermitente que se gestionan en entornos de escasez física o real, no se cuenta con el volumen suficiente de agua como para plantear un sistema con suministro continuo, por lo que el suministro por horas se constituye en una realidad a la cual deben plantearse soluciones.

Como acciones de gestión técnica o acciones a corto plazo, que permitan mejorar el sistema con suministro intermitente, se proponen la sectorización y la gestión de horarios; ambos enfoques basados en un suministro por horas en la red.

Estas tareas se constituyen en acciones fundamentales para conseguir un suministro equitativo. Aunque no son suficientes para lograr un suministro continuo, son primordiales para comenzar con el proceso de transición. Asimismo, pueden convertirse en las medidas adecuadas para mejorar los sistemas con suministro intermitente y escasez física.

### **4.2.1. Sectorización**

Cuando una red con suministro intermitente no cuenta con sectores diferenciados, toda la red está sujeta a caudales pico grandes, producto de la reducción de las horas de suministro, situación que requerirá diámetros mayores en la red. En este escenario, las presiones en los nudos más desfavorables son pequeñas y puede que éstos no logren recolectar la cantidad de agua suficiente, generando inequidad en el suministro causado por la propia red.

La equidad en la red puede mejorar a través de una oferta de agua escalonada (Gottipati & Nanduri, 2014), para lo cual resulta imprescindible la división de la red en sectores. Estos sectores deben diseñarse buscando equidad en el suministro; la configuración del sector y su comportamiento hidráulico debe asegurar la demanda de la población y un tiempo de suministro adecuado.

La sectorización y la definición de horarios de suministro no simultáneos (Ilaya-Ayza et al., 2014) permite reducir el caudal pico que reduce la calidad del servicio.

En el *capítulo 6* se propone una metodología para el proceso de sectorización en redes con suministro intermitente, la cual es útil para dividir redes completas o sectores grandes que presentan inequidad en el suministro.

### **4.2.2. Gestión de horarios**

Una red sectorizada no garantiza un suministro equitativo; si los horarios de entrega de agua para cada sector son mal gestionados, las condiciones de suministro pueden ser deficientes. Por ello es necesario realizar la gestión de horarios de suministro para el conjunto de sectores, de tal forma que se logre reducir los caudales pico que son característicos del suministro intermitente y, de esta forma, mejorar las condiciones del servicio y la equidad del suministro.

En una red no sectorizada, la gestión de horarios se realiza como paso posterior a la sectorización. Si la red se encuentra sectorizada, es necesario evaluar los horarios de suministro

actuales. La mejora de las condiciones de servicio puede lograrse con la modificación de los horarios de suministro de algunos sectores, reduciendo la simultaneidad de las horas de suministro.

Generalmente, en sistemas con suministro intermitente que tienen deficiencias en la gestión, la adopción de las horas de entrega de agua a cada sector de la red se realiza con poco criterio técnico, imponiéndose otro tipo de criterios.

En el *capítulo 7* se propone una metodología que permite la gestión de los horarios de suministro con la participación de los expertos de la empresa de agua.

### **4.3. Acciones a largo plazo**

En la presente tesis se proponen medidas a largo plazo cuyo objetivo es lograr la transición del suministro intermitente a suministro continuo. Se plantea un análisis donde no solo se considera el volumen de agua suficiente, como criterio principal para el suministro continuo que, si bien es un problema complejo y difícil de solucionar, existe también gran cantidad de sistemas con suministro intermitente cuya problemática se debe a deficiencias en la gestión y la escasez económica.

El suministro continuo o suministro 24x7, se logra cuando se entrega el agua de forma permanente para todos los consumidores las 24 horas al día, todos los días del año, mediante un sistema de transmisión y distribución que está continuamente lleno y que trabaja bajo presión positiva (Franceys & Jalakam, 2010), (Mrunalini, 2015).

La metodología propuesta para la transición a suministro continuo considera criterios relacionados con la cantidad del agua, la capacidad del sistema y la red, y la búsqueda de la equidad durante el proceso de transición. Se analizan aquellas causas que resultan no ser evidentes en la problemática del suministro intermitente.

Aunque, a menudo, la presencia de redes es usada como indicador de mejora de los sistemas de agua en los países en desarrollo, esto no puede ser asumido siempre como un suministro con calidad adecuada de agua (Lee & Schwab, 2005). La deficiencia en la gestión y operación, la presencia de fugas y el suministro intermitente, son causas que amenazan a la calidad del agua en la red. Una red con este tipo de deficiencias se convierte en un vehículo de transmisión de patógenos (Lee & Schwab, 2005).

La reducción de la calidad microbiológica del agua puede generar problemas a la salud de la población (Sargaonkar et al., 2013), (Kumpel & Nelson, 2014), causada indirectamente por un mal sistema de suministro de agua que produce efectos contraproducentes a los objetivos de una red de agua potable (Lee & Schwab, 2005).

Una de las mejores formas de protección de la calidad del agua en la red, reduciendo los riesgos para la salud de los usuarios, es a través del mantenimiento de presiones positivas y continuas a lo largo de la red (Geldreich, 1996), (Kumpel & Nelson, 2014). Por lo tanto, el suministro continuo garantiza la seguridad del agua, pues el suministro intermitente no constituye una estrategia eficiente ni eficaz para la gestión de las redes de distribución (Charalambous, 2012b). El cambio de suministro intermitente a suministro continuo es uno de los principales retos referidos al agua y a la salud en los países en vías de desarrollo (Mohapatra et al., 2014).

Cada una de las etapas propuestas para la transición de suministro intermitente a suministro continuo está descrita bajo un enfoque técnico viable, con el fin de proporcionar ayuda en la toma de decisiones a las empresas de agua potable y a los responsables políticos.

#### 4.4. Transición de sistema con suministro intermitente a suministro continuo

Dentro la bibliografía, se diferencian dos tendencias claras para enfrentar al suministro intermitente:

- La primera busca lograr un suministro continuo, mediante la reducción de las pérdidas de agua, mejoras en la infraestructura y la incorporación de nuevas fuentes de suministro (McIntosh, 2003), (Dahasahasra, 2007), (Franceys & Jalakam, 2010), (Sridhar, 2013), (Mrunalini, 2015).
- La segunda considera la aceptación del suministro intermitente como una realidad; en base a este paradigma, se buscan métodos de diseño y operación para poder minimizar los impactos negativos causados por este tipo de abastecimiento (Vairavamoorthy et al., 2001), (Soltanjalili et al., 2013).

Es importante reconocer a los sistemas con suministro intermitente como una realidad, se debe ser proactivos en el diseño y gestión de este tipo de sistemas; por lo tanto, es trascendental identificar los problemas asociados a este tipo de sistemas y proponer enfoques para resolverlos (Vairavamoorthy et al., 2008).

El primer enfoque para resolver los problemas de los sistemas con suministro intermitente busca su transición a sistema continuo; al respecto, se puede realizar la siguiente clasificación:

- Transición directa, que implica grandes inversiones, con resultados a corto o mediano plazo.
- Transición gradual, limitada por los recursos disponibles del operador del servicio, resultado de una serie de pasos que buscan un servicio continuo sostenible a largo plazo.

Indudablemente, la conversión de un sistema intermitente a uno continuo permitirá mejorar la condiciones de servicio para los usuarios, desde las presiones y caudales hasta la calidad del agua suministrada (Kumpel & Nelson, 2013). El suministro continuo convierte los costes de adaptación de los hogares en recursos económicos para el proveedor de servicio. Los costes de afrontamiento de los usuarios se reducen y pagan por un mejor servicio (Franceys & Jalakam, 2010).

##### 4.4.1. Transición directa y gradual

McIntosh (2003), en el documento *“Asian water supplies. Reaching the Urban Poor”*, dentro de un enfoque más social, sugiere que la gestión y las tarifas son los núcleos del problema, por lo que deben abordarse en primer lugar para pasar de un sistema con suministro intermitente a un servicio por 24 horas. En este sentido, es importante implementar programas de sensibilización y socialización con las partes interesadas y, complementariamente, mejorar hidráulicamente el sistema. También, se debe incrementar la tarifa para usuarios con el servicio por 24 horas y que todas las conexiones nuevas en zonas de 24 horas deben ser medidas. Además, deben perseguirse las conexiones clandestinas.

Las recomendaciones generales, en base a la situación de los países asiáticos, para un proceso de transición a suministro continuo son (McIntosh, 2003):

- promover el conocimiento del problema entre las partes interesadas,
- abordar las cuestiones de gestión relacionadas con la autonomía de los servicios públicos,
- incrementar las tarifas para las zonas de 24 horas,
- introducir moratorias a conexiones nuevas,
- invertir en la modificación hidráulica del sistema,
- comenzar con zonas de 24 horas para que estas se vayan expandiendo,
- cumplir con una medición estricta,
- reducir las pérdidas de agua.

India es uno de los países con más problemas relacionados con el agua y el suministro intermitente; actualmente millones de personas carecen de agua debido a la mala gestión, leyes poco claras y la contaminación del agua. La sobreexplotación de los recursos hídricos es causada, principalmente, por el bajo coste del agua y la energía eléctrica; históricamente, el agua ha sido visto como un recurso ilimitado, que no necesita ser gestionado como un bien escaso y que debe ser proporcionado como un derecho humano básico (McIntosh, 2003), (Brooks, 2007). Ninguna de las 35 ciudades de la India con una población mayor a un millón de habitantes suministra agua más de unas cuantas horas al día (Brooks, 2007). Esta condición y la preocupación existente al respecto generan un mayor número de referencias relacionadas al suministro intermitente y los procesos de transición en esta parte del planeta.

En la última década, varias ciudades en India han puesto en marcha proyectos piloto o han desarrollado propuestas para cambiar de un sistema intermitente a un continuo. Uno de estos proyectos es el desarrollado en algunas zonas de tres ciudades de Karnataka. El proyecto de transición directa tuvo financiamiento del Banco Mundial, con una duración de 183 semanas y se dividió en tres fases (Franceys & Jalakam, 2010):

- A. Preparación de un Plan de Inversiones para el logro de los objetivos, que incluyó el desarrollo de un modelo hidráulico para el sistema, la preparación de un plan de rehabilitación, y la estimación del costo de las obras en cuestión.
- B. Ejecución del Plan de Inversión, incluyendo la preparación de los documentos del contrato, selección de empresas constructoras y rehabilitación del sistema. Las fases A y B se desarrollaron en 79 semanas.
- C. Operación y mantenimiento del sistema 24x7 rehabilitado durante 104 semanas.

El coste total del proyecto fue de 52.7 millones de dólares estadounidenses, favoreciendo a 1.93 millones de habitantes (Franceys & Jalakam, 2010).

Otro caso de transición directa que destaca es el realizado en la red de distribución de Badlapur (India), la cual se dividió en 10 zonas de operación, cada una de ellas con tres o cuatro DMAs, que no contenían más de 1000 conexiones. Como resultados del proyecto, de los 34 barrios con 3 a 3.5 horas de suministro inicialmente, 8 tienen suministro de 24 horas y se redujo el promedio

del consumo de 170 l/hab/d a 140 l/hab/d (en sectores donde los tanques enterrados no tienen fugas) (Dahasahasra, 2007).

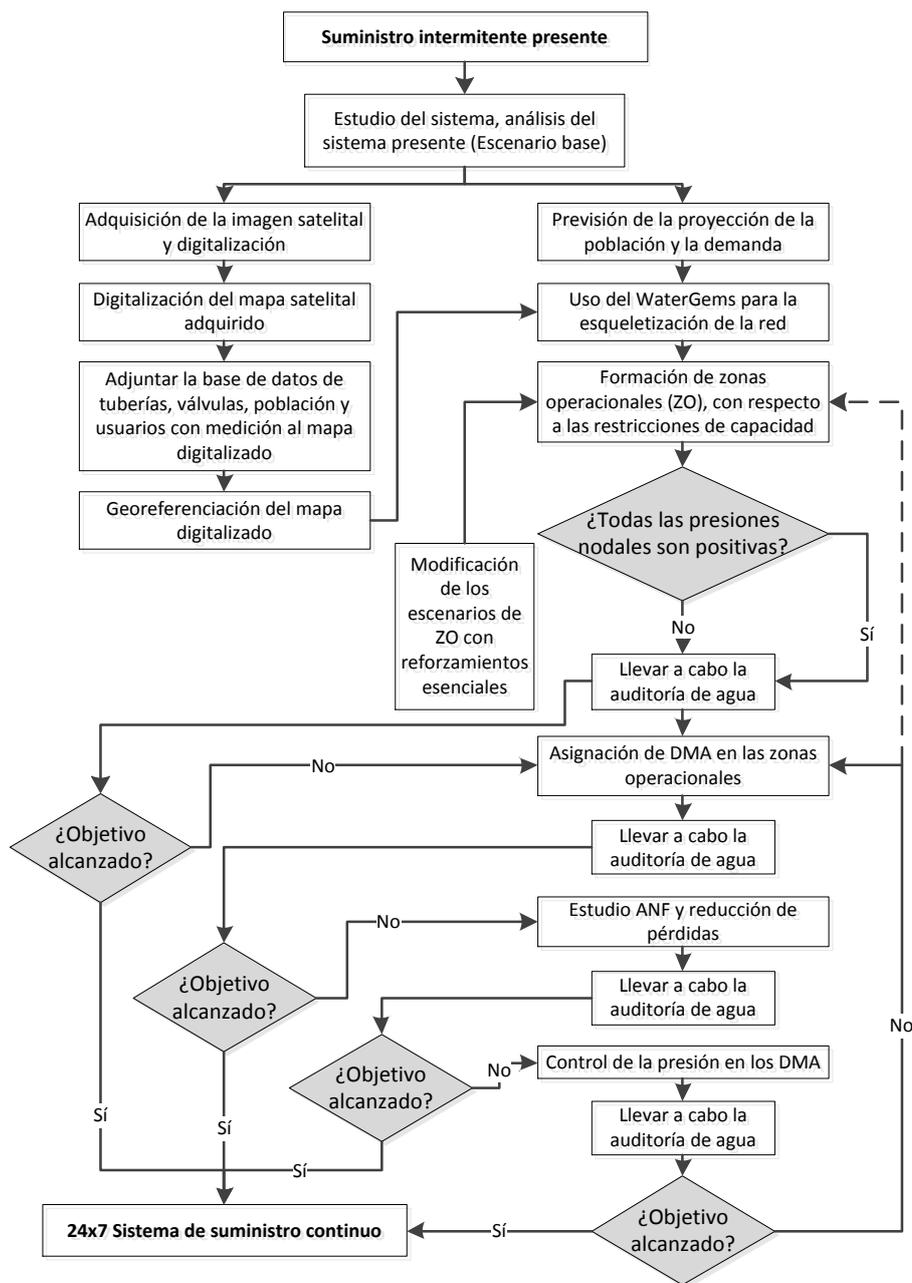


Fig. 4.1. Transición a suministro continuo de Badlapur (India)

Fuente: Dahasahasra (2007)

La propuesta de Dahasahasra (2007) refuerza la auditoría de agua y la configuración de las zonas de operación o sectores grandes (Fig. 4.1); el procedimiento consiste en:

- Estudio del sistema, análisis de la situación actual (escenario base)
- Elaboración de la cartografía del sistema
- Estimación y proyección de la población y la demanda

- Esqueletización de la red
- Formulación de las zonas operacionales con respecto a la capacidad de almacenamiento
- Si no existe presión suficiente en los nudos con la configuración de la zona, se procede a realizar la modificación de la zona operacional y su fortalecimiento.
- Si cumple con las presiones, se realiza la auditoria de volúmenes.
- Tras la pregunta de si se lograron los objetivos, si la respuesta es negativa, se procede con la asignación de DMAs en las zonas operacionales.
- Realizar la auditoria de volúmenes
- Estudio de las pérdidas de agua y reducción de las mismas
- Realizar la auditoria de volúmenes
- Control de presiones en los DMAs
- Realizar la auditoria de volúmenes
- Si se sigue con problemas, debe replantearse la formulación de las zonas operacionales o la asignación de DMAs.

No se encontraron referencias concretas relacionadas con un proceso de transición gradual. Sin embargo, existen recomendaciones que sugieren la expansión de las zonas que se van transformando a suministro continuo (McIntosh, 2003).

Generalmente, los costos de la transición de un sistema intermitente a uno continuo pueden ser significativos. Por lo que se deben buscar estrategias rentables (Kumpel & Nelson, 2013).

#### **4.5. Propuesta para la transición a suministro continuo**

La transición de un sistema con suministro intermitente a un sistema que cuente con agua por 24 horas los 7 días de la semana, es una tarea compleja. Sin embargo, analizando las causas que originan el suministro intermitente y los problemas inherentes a esta forma de abastecimiento de agua, se plantea un proceso cuya base se centra en las siguientes etapas:

- a) Diagnóstico del sistema
- b) Evaluación y ampliación de la capacidad del sistema
- c) Evaluación de la equidad en el suministro de agua
- d) Transición a suministro continuo
- e) Reducción de pérdidas de agua

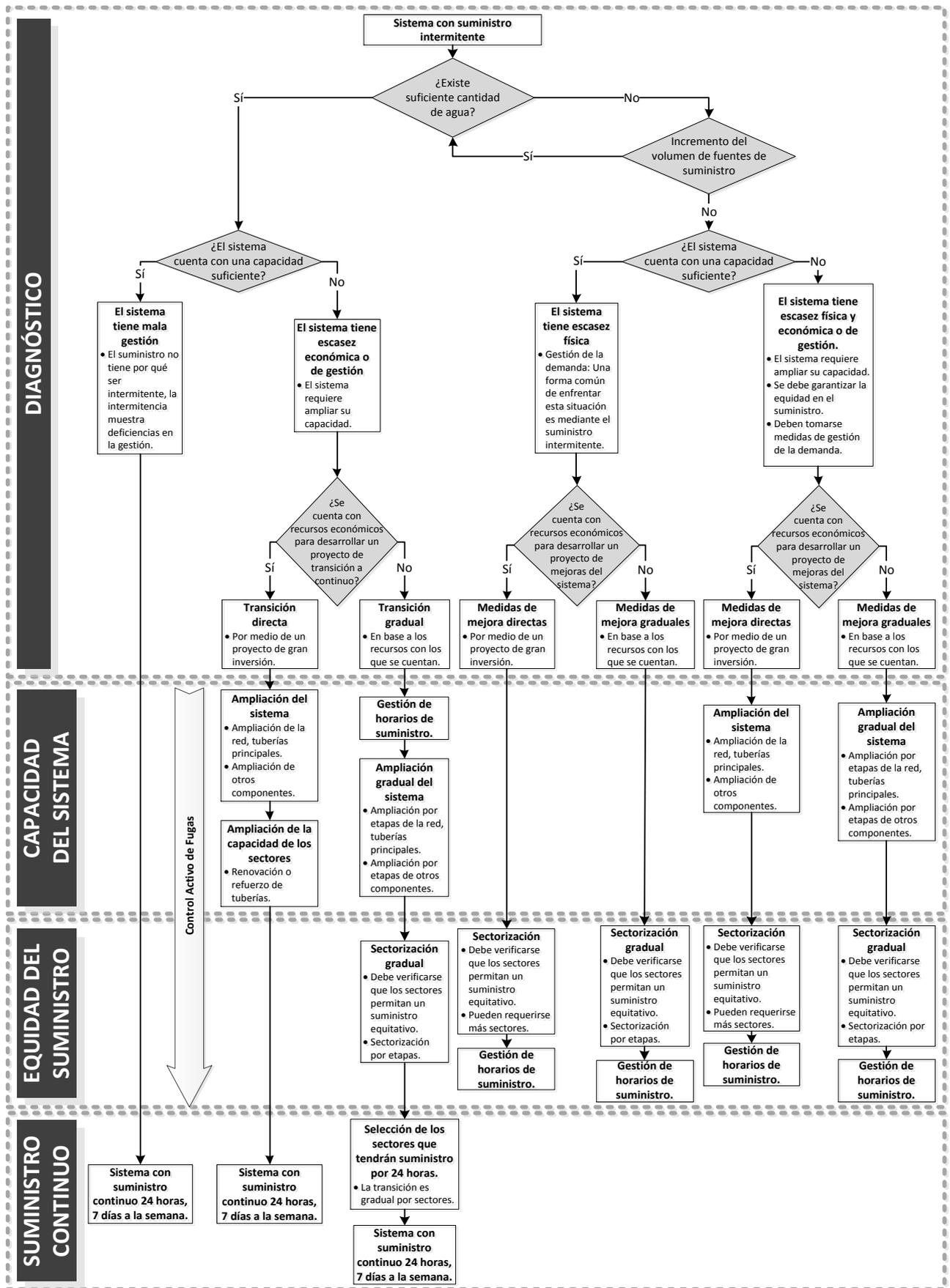


Fig. 4.2. Diagrama de flujo del proceso de transición a suministro continuo

El diagrama de flujo mostrado en la Fig. 4.2, analiza el tipo de origen y las características del suministro intermitente, en función al cual se plantean soluciones que permitirán la mejora del mismo o un proceso de transición a suministro continuo.

El proceso de transición parte del análisis de los tres tipos de escasez que son causa del suministro intermitente: escasez por mala gestión, escasez económica y escasez física del recurso (Totsuka et al., 2004); de esta forma, se identificaron los problemas y etapas que deben enfrentarse para lograr un suministro continuo.

A continuación se describen los pasos a grandes rasgos. Cada uno de éstos es detallado en un capítulo correspondiente.

#### **4.5.1. Diagnóstico del sistema**

En el diagnóstico, se evalúan los tipos de escasez del sistema; la escasez física de agua es el primer problema que debe resolverse. Generalmente, es el tipo de escasez que justifica el racionamiento del servicio (Vairavamoorthy et al., 2008); existe la percepción de que el suministro intermitente está solamente relacionado con la escasez física de agua, por lo que las soluciones principales suelen recurrir únicamente a la búsqueda de nuevas fuentes de suministro.

Una de las herramientas más importantes para determinar si el sistema presenta escasez física del recurso es el balance hídrico, el cual permite identificar cada uno de los componentes volumétricos de ingreso y salida del sistema. Asimismo, evaluar la cantidad de agua consumida per cápita, aunque se cuente con suministro intermitente, permite establecer las posibilidades de realizar la transición a suministro continuo.

Tras esta primera evaluación, se define si el sistema tiene o no escasez física; cuando este cuenta con la cantidad de agua necesaria surge la pregunta: ¿por qué el sistema sigue con suministro intermitente si hay suficiente agua? Existen dos posibles respuestas: por mala gestión o por escasez económica. El presente estudio profundiza en estos dos aspectos que son clave para la transición de un sistema con suministro intermitente a suministro continuo.

La falta de presión y caudal en puntos desfavorables de la red es un indicio de falta de capacidad de la red; puede llegarse a estos escenarios a causa de la mala gestión o planificación en los procesos de ampliación de la red, lo cual puede reducir la capacidad de la red. Esta situación puede generar una percepción de falta real de agua, aunque en los puntos favorables de la red se produzca derroche; bajo esta idea de escasez de agua, el operador puede optar por el suministro intermitente.

Otro problema con el que tropiezan los sistemas con suministro intermitente es la escasez económica, la cual limita las posibilidades de mejora de la red. El planteamiento de procesos de transición de suministro continuo a intermitente puede ser muy costoso, reduciendo aún más las posibilidades de tener un sistema con suministro de 24 horas; en este escenario deben plantearse etapas anuales planificadas que se adecuen a la capacidad de inversión de las empresas de agua. De esta forma, es posible diferenciar entre las medidas de transición directa, a través de proyectos de gran envergadura, y las medidas de transición gradual, con inversiones por etapas que consideran la convivencia del suministro intermitente con el continuo en un periodo de tiempo definido.

En el diagrama de flujo para la transición a suministro continuo (Fig. 4.2), se establecen escenarios en los cuales el sistema tiene escasez física de agua, en los cuales por lo menos debe buscarse un suministro equitativo. Las herramientas planteadas en la presente tesis resultarán útiles también en este sentido.

Es importante, como parte del diagnóstico, conocer el patrón de suministro en el sistema, los caudales, las horas de suministro, los sectores alimentados, cantidad de sectores trabajando simultáneamente y otros aspectos que puedan ser de interés. De esta forma, es posible identificar elementos de diagnóstico como el factor punta, caudal máximo, las horas críticas o las horas sin suministro.

#### **4.5.2. Ampliación de la capacidad del sistema**

La falta de capacidad de la red conlleva problemas de suministro; para tener un buen servicio, el sistema, principalmente la red, debe contar con la suficiente capacidad para que los usuarios tengan agua con la cantidad y la calidad requeridas.

La ampliación de la capacidad de la red dentro del proceso de transición es la etapa más costosa, por lo que deben buscarse formas de optimización en la asignación de los recursos y en la selección de los tramos que serán ampliados o modificados. El uso del “caudal máximo teórico” (Ilaya-Ayza et al., 2015b), propuesto en el presente trabajo, permite identificar las necesidades de ampliación de la red y ayuda en la definición de estrategias de acción para la ampliación de la red. En esta etapa, se consideran solamente las tuberías principales de la red; de esta forma se mejorarán las presiones al ingreso de los sectores.

En escenarios de escasez económica, la ampliación de la red debe ser gradual; el número de etapas o años de la transición estará delimitado por la deficiencia en capacidad de la red que se tiene que cubrir o caudal máximo al que se quiere llegar, y los recursos económicos disponibles por la empresa de agua.

Para la transición, debe buscarse una capacidad de la red que permita cubrir las cargas exigidas por el suministro continuo. La ampliación de la red en sistemas con suministro intermitente es importante porque permite mayor equidad en el suministro.

Una medida adicional para la ampliación de la capacidad del sistema es la gestión de horarios de suministro, que puede ser uno de los primeros pasos en la búsqueda del suministro continuo.

Uno de los problemas inherentes a la ampliación de la capacidad de la red es el incremento de las pérdidas reales de agua, producto de las mejoras en las presiones de servicio. Por lo tanto, este proceso debe ser acompañado necesariamente por el control activo de fugas (Farley, 2001), con el fin de no reducir el caudal ofertado a los usuarios ni llegar a sobredimensionar la red.

#### **4.5.3. Equidad en el suministro de agua**

Muchas veces, usuarios que cuentan con pocas horas de suministro no logran recibir cantidades suficientes de agua en estos horarios, mientras que usuarios ubicados en zonas hidráulicamente más favorables llegan a derrochar el agua; esta situación de inequidad en el suministro se debe principalmente a las características y la configuración de la red.

Un sistema con suministro intermitente cuenta con sectores como parte importante de su estructura; de esta forma se logra distribuir el agua en diferentes horarios. Es indudable que estos sectores deben buscar un suministro equitativo; sin embargo, esto no ocurre normalmente, pues los sectores son diseñados para suministro continuo sin este tipo de consideraciones. Por lo tanto, es muy importante establecer formas de medición de la equidad del suministro e incorporarlas al diseño o modificación de los sectores que trabajan con suministro intermitente.

Los elementos que permiten mejorar la equidad del suministro en los sectores son: el tiempo de suministro, la capacidad del sector con la modificación de algunos tramos y la reducción o división del sector.

Al igual que con la ampliación de la capacidad de los tramos principales de la red, si el sector requiere ampliación, este proceso puede ser directo o gradual, en función de la capacidad económica de la empresa de agua.

#### **4.5.4. Transición a suministro continuo**

Como se indica en anteriores acápite, dependiendo de los recursos disponibles, la transición a suministro continuo se realizará por dos vías: a través de un proceso directo o de forma gradual. Los pasos detallados hasta ahora son suficientes para el proceso de transición directa; sin embargo, para el proceso de transición gradual debe considerarse adicionalmente que existirán sectores con suministro continuo y otros sectores con suministro intermitente trabajando simultáneamente, por ser un proceso gradual e incremental. A medida que la red va ganando capacidad, permite la posibilidad de convertir un sector o varios con suministro intermitente a suministro continuo.

Como en cada etapa de mejora del sistema se plantea un escenario nuevo, en este debe seleccionarse, bajo criterios técnicos, aquellos sectores que tendrán suministro por 24 horas, buscando minimizar los efectos negativos a los sectores que seguirán con suministro intermitente. De esta forma, el número de sectores con suministro continuo va incrementándose en cada etapa, hasta que todo el sistema llega a tener un suministro ininterrumpido.

#### **4.5.5. Reducción de pérdidas de agua**

Las pérdidas de agua se constituyen en un elemento fundamental para decidir la factibilidad de realizar el proceso de transición. Si el sistema con suministro intermitente actual tiene un nivel elevado de fugas (superior a 20%), no es conveniente realizar la transición, porque el sistema trabajando en continuo generará una mayor cantidad de fugas (Charalambous, 2012a). En caso de plantearse un proceso de transición a suministro continuo, es imprescindible reducir inicialmente el nivel de fugas en la red en el actual suministro intermitente. Cuando el suministro intermitente presenta niveles de fugas bajos, se puede plantear la transición tomando en cuenta los niveles de fugas que se producirán cuando el sistema trabaje las veinticuatro horas del día. Es importante prevenir esta situación en el periodo de transición; por lo tanto, debe realizarse un control activo de fugas durante este proceso; asimismo, es trascendental realizar gestión de la presión cuando el sistema empiece a trabajar con suministro continuo.

Las pérdidas de agua en todo el proceso de transición deben ser controladas. Asimismo, se debe contar con un presupuesto adicional que permita realizar el control de fugas. Al igual que el proceso de transición, el control y reducción de fugas puede dividirse también en etapas, ajustándose a los años de duración de este proceso.

#### **4.6. Opinión de los expertos y su inclusión en la toma de decisiones**

Tanto en la recolección de información, como en los procesos propuestos de mejora y toma de decisiones, es muy importante tomar en cuenta la experiencia de los expertos de la empresa de agua.

Generalmente, los sistemas con suministro intermitente son gestionados de forma deficiente. Esta situación impide contar con toda la información deseada para el establecimiento de un modelo

que represente de manera más fiel a la red y su funcionamiento. Por lo tanto, la opinión de los expertos de la empresa de agua, con relación a algunos elementos de la red, se constituye en información muy valiosa. Las opiniones son procesadas utilizando el proceso analítico jerárquico, AHP (Saaty & Vargas, 2012).

A continuación se describe la técnica AHP, con una previa introducción a las técnicas de decisión multicriterio.

#### 4.6.1. Decisión multicriterio

El área generalizada de la toma de decisiones multicriterio (*Multiple Criteria Decision Making*, MCDM) puede ser definida como el conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales los problemas debidos al conflicto entre múltiples criterios pueden ser formalmente incorporados al proceso analítico (Moreno-Jimenez, 1996), (Ehrgott & Gandibleux, 2002). MCDM está constituido generalmente por dos ramas: optimización multicriterio y análisis de decisión multicriterio (MCDA). Mientras que MCDA está relacionada con problemas multicriterio que tienen un pequeño número de alternativas a menudo en entornos de incertidumbre (localización de infraestructura, problemas de selección), la optimización multicriterio está dirigida a los problemas formulados dentro de un marco de programación matemática, pero con un conjunto de objetivos en lugar de uno solo (Ehrgott & Gandibleux, 2002).

##### 4.6.1.1. Variables explicativas

Es importante conocer inicialmente este tipo de variables para poder aplicar cualquier método de decisión multicriterio. Las variables explicativas o elementos de comparación pueden ser clasificadas como variables directas o inversas; es común relacionarlas con el precio y de esta forma realizar su identificación de forma más sencilla. De esta forma, una variable explicativa directa define una proporción directa entre ésta y el precio; es decir, si la variable aumenta el precio aumenta y viceversa.

Variables explicativas inversas son aquellas que aumentan en sentido contrario con el precio; es decir, si la variable toma un valor grande el precio disminuye y si toma un valor pequeño el precio aumenta.

Para llevar a cabo la transformación de variables explicativas inversas a directas, se pueden utilizar los siguientes métodos (Aznar & Guijarro, 2012):

- **Transformación por la inversa.** Cuando se tiene una variable explicativa inversa  $x_i$ , esta puede ser transformada a variable directa por medio de  $1/x_i$ . No es aplicable este método cuando las variables tienen valor cero.
- **Transformación por la diferencia.** Se considera el uso de una constante  $K$ ; de este valor se sustrae el término  $x_i$ , por lo que la variable directa es de la forma  $(K - x_i)$ . Existirán variaciones en función del valor elegido de  $K$ , lo cual constituye la desventaja de este método.

#### 4.6.1.2. Normalización de variables

Para el uso de métodos de decisión multicriterio, es importante que todas las variables se encuentren normalizadas; de esta forma es posible la comparación entre ellas pues no existe diferencia entre las unidades de medida. Existen los siguientes tipos de normalización (Aznar & Guijarro, 2012):

Normalización por la suma:

$$x_{ij\_Normalizado} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}. \quad (4.1)$$

El intervalo de los valores normalizados se encuentra entre:

$$0 \leq x_{ij\_Normalizado} \leq 1 \quad \text{si} \quad x_{ij} \geq 0.$$

Normalización por el ideal o por el mayor elemento:

$$x_{ij\_Normalizado} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})}. \quad (4.2)$$

El intervalo de valores normalizados es:  $0 \leq x_{ij\_Normalizado} \leq 1$  si  $x_{ij} \geq 0$ .

Normalización por el rango:

$$x_{ij\_Normalizado} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}. \quad (4.3)$$

Las variables deben encontrarse en el intervalo:  $0 \leq x_{ij\_Normalizado} \leq 1$ .

Los dos primeros métodos mantienen la proporcionalidad entre los valores, mientras que la normalización por el rango no.

#### 4.6.2. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

La metodología AHP fue propuesta por Thomas L. Saaty (1977); es una metodología de decisión multicriterio que se adecua a múltiples escenarios, como lo demuestran numerosos estudios que utilizaron el método con diferentes temáticas, tales como selección, evaluación, planificación, asignación de recursos, resolución de conflictos, etc. Ver, por ejemplo, Vaidya & Kumar (2006) para una visión amplia de aplicaciones de AHP. Esencialmente, el AHP permite la selección de alternativas, utilizando criterios o variables que, generalmente, están en conflicto (Aznar & Guijarro, 2012), (Delgado-Galván et al., 2014). A su vez, una característica clave de AHP es que permite realizar la selección de una alternativa, entre varias, en base a criterios cualitativos, es decir, permite la manipulación de elementos intangibles, no cuantificables (Izquierdo et al., 2014).

En su forma más general, el AHP es un marco no lineal para llevar a cabo el pensamiento deductivo e inductivo sin el uso del silogismo en la toma de decisiones; esto es posible porque se toma en cuenta varios factores al mismo tiempo, lo que permite su dependencia y su retroalimentación, haciendo compensaciones numéricas para llegar a una síntesis o conclusión (Saaty & Vargas, 2012).

El AHP es elegido principalmente por su fuerza en la descomposición de un problema de decisión compleja en componentes simplificados (es decir, el objetivo, los criterios, subcriterios, etc.)

en una jerarquía. También tiene una capacidad única de comprobar la inconsistencia del juicio, y se puede utilizar tanto con datos cualitativos como con cuantitativos (Alhassan et al., 2015), (Ishizaka & Nemery, 2013).

Los psicólogos cognitivos han reconocido desde hace tiempo que hay dos tipos de comparaciones que hacen los seres humanos: absolutas y relativas. En las comparaciones absolutas las alternativas se comparan con un estándar o una línea base que existe en la memoria de uno, la cual fue desarrollada a través de la experiencia. En comparaciones relativas, las alternativas se comparan en pares de acuerdo con un atributo común. El AHP utiliza ambos tipos de comparación para obtener escalas de medición (Saaty & Vargas, 2012).

En los problemas de decisión multicriterio, se tienen factores cualitativos y cuantitativos, tangibles o intangibles, algunos de los cuales pueden estar en conflicto entre sí; para resolver este tipo de problemas algunos autores aplican la combinación de AHP y programación lineal (Ghodsypour & O'Brien, 1998). La aplicación de AHP en la optimización matemática y la investigación operativa se practica ampliamente; los pesos obtenidos por el método AHP son utilizados con frecuencia como coeficiente de las funciones objetivo (Ghazinoory et al., 2007).

En AHP se utilizan, pues, comparaciones entre elementos que pueden provenir de elementos objetivos, tales como mediciones reales, o de opiniones subjetivas emitidas por expertos o actores del problema, tomando como base una escala fundamental que refleje la fuerza relativa de sus preferencias y opiniones.

El punto de partida en la aplicación del AHP es el siguiente (Aznar & Guijarro, 2012):

- Identificar el interés del decisor en seleccionar la alternativa más interesante de un conjunto de alternativas posibles para conseguir determinado objetivo.
- Definir los criterios que se utilizarán para establecer la selección, es decir, las características que harán más deseable una alternativa sobre otra.

La figura 4.3 muestra el esquema jerárquico para la selección de la mejor alternativa en base a tres alternativas para conseguir un objetivo y dos criterios de selección entre alternativas.

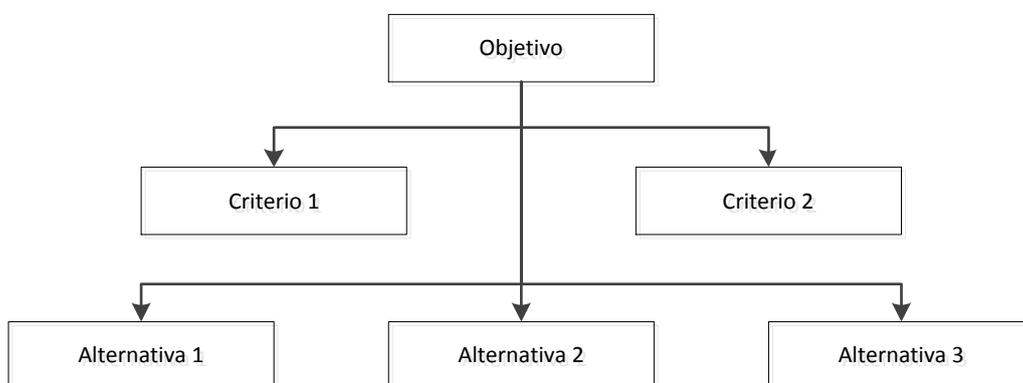


Fig. 4.3. Esquema jerárquico AHP

El siguiente, es el conjunto de pasos típico, para utilizar AHP (Saaty, 2008):

- a) Obtención de la matriz pareada: cuando ya se conocen las alternativas y los criterios utilizados, es necesario ordenar y normalizar cada uno de los criterios. Entonces, se realiza la comparación por pares de criterios en base a alguna escala de comparación (típicamente, la escala de nueve puntos de Saaty definida en la tabla 4.1).

Tabla 4.1. Escala fundamental de 9 puntos de Saaty para comparación por pares

Intensidad de importancia	Definición	Descripción
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente al criterio A sobre B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el criterio B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el criterio B esta fuera de toda duda
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar
Recíprocos de los anteriores	Reflejando el dominio de segunda alternativa en comparación con la primera	Si el criterio A es de importancia grande frente al criterio B, por ejemplo, se tiene: Criterio A frente a criterio B = 5/1 Criterio B frente a criterio A = 1/5

Fuente: Saaty & Vargas (2012)

- b) Priorización de los criterios: la comparación por pares define una matriz de comparación pareada  $n \times n$  (donde  $n$  = número de criterios), que es característica del método AHP. Obviamente, se trata de una matriz positiva. El producto repetido de la matriz por sí misma (método de las potencias) permite calcular el vector propio de Perron (Stewart, 2001); este vector proporciona la priorización de los criterios.
- c) Priorización de las alternativas por criterio: se procede de la misma forma con las diferentes alternativas, digamos  $m$ , en función de cada criterio; comparando todas las alternativas, en función de cada uno de los criterios, se obtienen primero matrices pareadas y, luego, vectores propios que otorgan valores de prioridad a las distintas alternativas en función de cada criterio.
- Con estos dos procesos se obtienen dos matrices, una  $n \times 1$  con la priorización de los criterios, y otra matriz  $m \times n$  con la priorización de las alternativas para cada criterio.
- d) Agregación de prioridades: el producto de las dos matrices tendrá como resultado una matriz  $m \times 1$  que define la ponderación de las alternativas en función de los criterios y su respectivo peso. De esta forma, se podrá elegir la mejor alternativa o se tendrán los pesos respectivos para un proceso de optimización.

#### 4.6.2.1. Consistencia de la matriz pareada

Para que las matrices de comparación pareadas sean útiles en la toma de decisiones deben exhibir un grado aceptable de consistencia; de esta forma, se garantiza la coherencia de la información recolectada. Existen diversos mecanismos para la evaluación de la consistencia de una matriz. El procedimiento más habitual para calcular la consistencia se debe a Saaty (2008), y es el siguiente:

- Se calcula el vector de Perron de la matriz pareada,  $\lambda_{\max}$ .
- Se calcula el índice de consistencia (*Consistency Index, CI*):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (4.4)$$

- El índice de consistencia *CI* es comparado con un valor aleatorio, denominado índice de consistencia aleatorio (*Random consistency index, RI*). Saaty, tras realizar una simulación con 100000 matrices, obtiene los valores para este índice mostrados en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Valores del índice de consistencia aleatorio (*RI*) en función del tamaño de la matriz

Tamaño de la matriz ( <i>n</i> )	Índice de consistencia aleatoria ( <i>RI</i> )
3	0.525
4	0.882
5	1.115
6	1.252
7	1.341
8	1.404
9	1.452
10	1.484
11	1.513
12	1.535
13	1.555
14	1.570
15	1.583
16	1.595

Fuente: Saaty (2003)

- Se calcula el ratio de consistencia (*Consistency ratio, CR*):

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (4.5)$$

Siguiendo a Saaty, la matriz de comparación pareada tiene consistencia aceptable cuando el ratio de consistencia (*CR*) no supera el 10%. No obstante, para tamaños pequeños de matrices, tal valor puede ser excesivo y se utilizan los valores recomendados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Porcentajes máximos del ratio de consistencia

Tamaño de la matriz ( <i>n</i> )	Ratio de Consistencia ( <i>CR</i> )
3	5%
4	9%
5 o mayor	10%

Fuente: Aznar & Guijarro (2012)

Cuando una matriz no tiene consistencia aceptable definida por su *CR*, es preciso mejorar la consistencia. Para ello, existen diversos mecanismos en la literatura (Saaty, 2003), (Aznar & Guijarro, 2012), (Benítez et al., 2010). Entre ellos, destacamos aquí el método de linealización (Benítez et al.,

2011a), para el que los autores establecen una fórmula sencilla (Benítez et al., 2014) de aplicación. Este método puede ser aplicado integrado dentro de un proceso de feedback con el actor o experto que ha emitido las opiniones, para conciliar sus ideas con el forzamiento que sobre los coeficientes impone la mejora de la consistencia (Benítez et al., 2011b). Además, el método de linealización admite extensiones a situaciones cambiantes, frecuentes en la toma de decisiones, tales como, incorporación de criterios nuevos y eliminación de criterios obsoletos (Benítez et al., 2012), completación de matrices pareadas, para cuando un actor no puede emitir todas las comparaciones por pares (Benítez et al., 2015), agregación de criterios (Benítez et al., 2016), etc.



## **CAPÍTULO 5. Diagnóstico básico de sistemas con suministro intermitente**

---

### **5.1. Introducción**

El diagnóstico del sistema de suministro intermitente es la primera etapa en el proceso de transición a suministro continuo; en esta etapa se analiza la situación actual del sistema y se evalúan las posibilidades de lograr el suministro continuo.

Evaluar las características del sistema tales como: número de consumidores, demanda de agua, además del estado de las tuberías de la red (McIntosh, 2003), (Dahasahasra, 2007), (Franceys & Jalakam, 2010), es un paso inicial fundamental en proyectos de transición a suministro continuo. Asimismo, el diagnóstico permite establecer si son necesarias medidas a corto plazo o medidas a largo plazo.

Generalmente, en sistemas con suministro intermitente suele contarse con muy poca información, debido a la escasez económica o la mala gestión, pues la recolección periódica de información requiere recursos adicionales que las empresas de agua no están en posibilidades de asumir. Por lo tanto, es conveniente que los procesos de mejora se adapten a las limitaciones en la información.

Bajo estas condiciones, no solo basta con la recolección de información cuantitativa, la cual es limitada, sino que, adicionalmente, debe recolectarse información cualitativa, opiniones de los operadores, administradores y expertos que conocen el sistema. Esta información complementaria es muy útil en estos casos; la recolección de esta información se realiza con el apoyo de la metodología del proceso analítico jerárquico (AHP) (Saaty & Vargas, 2012).

Los elementos planteados en este capítulo resultan útiles para establecer la clasificación de la escasez del sistema con suministro intermitente (Totsuka et al., 2004): física, económica o de mala gestión. En función del tipo de escasez, se proponen las medidas de mejora del suministro intermitente hasta llegar al suministro continuo.

#### **5.1.1. Condiciones para ejecutar medidas a corto plazo**

La razón principal que define la ejecución de medidas a corto plazo es la escasez física de agua. En este contexto es difícil afrontar medidas como la transición a suministro continuo, pues debe

reducirse el volumen de suministro y las pérdidas de agua por fugas; en ambos casos el suministro intermitente resulta ser muy útil.

Es difícil gestionar un sistema en condiciones de escasez física de agua; en este escenario se pueden lograr mejoras en el sistema a través de la sectorización y la gestión de horarios.

La herramienta básica que permite establecer la escasez física de agua es el balance hídrico, el cual permite definir los niveles de pérdidas en el sistema y la dotación media de la población.

### **5.1.2. Condiciones para ejecutar medidas a largo plazo**

En un sistema con suministro intermitente que logra superar la escasez física de agua es posible establecer medidas de mejora a largo plazo, como la transición a suministro continuo. Estas medidas pueden ejecutarse en sistemas con escasez económica o con mala gestión, siempre y cuando exista la disponibilidad de fuentes de abastecimiento para los siguientes años.

## **5.2. Diagnóstico general del área de estudio**

Es necesario conocer el contexto del sistema en el que se quieren plantear las mejoras. La interpretación de los resultados de un gestor de suministro de agua no pueden hacerse sin tener en cuenta su propio contexto; se deben conocer las características más relevantes del sistema y de la región en la que se encuentra (Alegre et al., 2006). Por lo tanto, se deben tener en cuenta básicamente las características geográficas, demográficas, climatológicas y socioeconómicas del área de estudio. Asimismo, debe buscarse la información necesaria del funcionamiento y operación del sistema de suministro de agua y sus debilidades y fortalezas, entre otros.

## **5.3. Recolección de información**

En la actualidad, las empresas de agua recolectan grandes cantidades de información (Ziegler et al., 2012). Sin embargo, en sistemas con suministro intermitente con escasez económica, los recursos son limitados para el monitoreo y recolección de datos del sistema; de esta forma, la propuesta de mejora debe adaptarse a la información básica, sin caer en la simplificación excesiva del modelo. Asimismo, deben buscarse alternativas que permitan completar la información faltante. Por lo tanto, es importante recoger información tanto cuantitativa como cualitativa

La recolección de datos no debe ser fin en sí mismo; los datos deben ser valorados, pues la toma de decisiones y la planificación del sistema requiere de buenos datos (Ziegler et al., 2012).

### **5.3.1. Información cuantitativa**

La información cuantitativa, generalmente, es la que se encuentra en la base de datos de las empresas de agua; es la información que puede contabilizarse. Estos datos también son conocidos como información objetiva (Aznar & Guijarro, 2012).

Es importante contar con una buena calidad de los datos, además de disponer de buenas rutinas para la recopilación de datos. Los costos de la recolección de datos deben reflejar los beneficios esperados (Alegre et al., 2006). La información precisa permitirá llevar a cabo un trabajo eficiente (Ziegler et al., 2012).

Para tener una estructura de información cuantitativa coherente y sostenible se deben seguir las siguientes recomendaciones (Alegre & Covas, 2010).

*Tabla 5.1. Aspectos a contemplar en la elaboración de recomendaciones sobre la mejora de la información*

Calidad de los datos	Verificación de la adecuación y calidad de los datos existentes (en términos de fiabilidad y de exactitud); los datos de catastro deberán merecer especial atención porque serán críticos en la toma de decisiones.
Coherencia entre las fuentes de información	Verificación de la coherencia entre datos de diferentes orígenes; identificación de las fuentes más fiables.
Facilidad de utilización	Verificación de la facilidad de utilización de la información disponible, no solo en términos de accesibilidad, sino también en términos de necesidad de las herramientas de análisis a usar.
Integración de las fuentes de información	Verificación del grado de eficacia de integración entre diversas fuentes de información.
Procedimiento de actualización	Establecimiento de procedimientos de actualización futura a adoptar para cada tipo de datos.
En el caso de datos existentes, las recomendaciones deberán incluir la identificación de aspectos frágiles y soluciones. En el caso de la falta de datos, las recomendaciones deberán incluir la identificación de soluciones para la recogida, procesamiento, archivo y mantenimiento; deberá tenerse en cuenta el balance entre costo-beneficio de la recogida y la inclusión de cada tipo de dato en la estructura de información con un determinado nivel de calidad.	

*Fuente: Alegre & Covas (2010)*

La información cuantitativa básica para un sistema con suministro intermitente debe estar constituida por: volúmenes de ingreso al sistema o al subsistema totalizados de forma mensual por una gestión; volúmenes de consumo mensuales de los abonados de cada sector; número de clientes por sector; características del horario de cada sector; cantidad de usuarios con contadores; planos del sistema; y la configuración de los sectores. Es recomendable, después de recolectar la información, conversar con los trabajadores, operadores directos del sistema, para analizar posibles variaciones o anomalías que puedan existir entre los datos.

Asimismo, es necesario conocer información relacionada con la posibilidad de inversión económica de la empresa de agua. Para el proceso de transición a suministro continuo se deben conocer los recursos disponibles para las mejoras en la infraestructura (ampliación de la capacidad de la red) y los recursos necesarios para realizar el control activo de fugas durante el periodo de transición. La empresa debe ser consciente de la necesidad del control de fugas tras la transición a suministro continuo; es necesario su compromiso para lograr mantener este tipo de suministro.

Para la recolección de información debe recurrirse a las bases de datos de la empresa que presta el servicio; generalmente, se manejan las bases de datos de clientes y de la red.

### **5.3.1.1. Base de Datos de Clientes**

En cualquier empresa de agua potable existe un sistema de información de los clientes (SIC), en el cual se recolecta información relacionada con el consumo y la facturación mensual o trimestral, se clasifican los clientes o usuarios, y es posible determinar, a partir de la facturación, la dotación

media del área de estudio (Ziegler et al., 2012). Este sistema es fundamental para la elaboración del balance hídrico.

Asimismo, esta base de datos permite conocer las posibilidades económicas de la empresa de agua para asumir un proceso de transición a suministro continuo.

### **5.3.1.2. Base de Datos de la Red**

En la base de datos de la red se incluyen todos los elementos que forman parte de la red de agua potable, con sus características más importantes. Se obtiene información sobre los sectores (si la red está sectorizada), horario de suministro, diámetros, longitudes, características de los depósitos, estaciones de bombeo y toda infraestructura que esté incluida en el sistema de abastecimiento, además de las condiciones o características de la operación y mantenimiento. Es importante, también, conocer el tipo de conexiones domiciliarias existentes en la red.

La información relacionada con la red y los sectores debe ser plasmada en un modelo matemático que permita simular las tareas de mejora en el sistema. Un elemento importante en el diagnóstico del sistema con suministro intermitente, que depende del modelo matemático, es la capacidad de la red, lo cual puede cuantificarse calculando el caudal máximo teórico.

Como parte del diagnóstico, es necesario conocer las características de cada uno de los sectores de la red. En el *capítulo 9* se propone un indicador para la evaluación de la equidad de suministro en cada sector.

### **5.3.2. Información cualitativa**

La información cualitativa es también denominada información subjetiva; está compuesta por elementos de comparación o variables de tipo cualitativo o intangible (Aznar & Guijarro, 2012). Estas condiciones hacen que no se encuentren presentes en las bases de datos de las empresas de agua. Por otra parte, también es importante hacer objetiva la experiencia acumulada de los expertos de la empresa de agua e incorporarla en el proceso de toma de decisiones.

En sistemas de agua potable con limitaciones en información cuantitativa, la información cualitativa puede ser muy importante. La recolección de esta información se logra a través de la realización de encuestas a los expertos de la empresa de agua, utilizando, entre otras posibilidades, la metodología AHP (Saaty & Vargas, 2012).

En la presente tesis, la información cualitativa utilizada en los procesos de mejora del sistema con suministro intermitente es la relacionada con la opinión de los expertos sobre la facilidad o dificultad de la operación de los sectores en estos sistemas. Asimismo, se incorpora su experiencia en los procesos de optimización, a través de su opinión sobre la importancia de cada una de las variables, cuantitativas y/o cualitativas.

## **5.4. Balance hídrico**

Un estudio que pretenda mejorar la gestión del servicio debe partir de un balance hídrico, buscando y contabilizando cada componente o volumen de agua que se añade y se extrae de un sistema de suministro, dentro de un periodo definido. De esta forma, se identifican y discriminan los componentes de consumo y pérdidas; esta herramienta se convierte en uno de los primeros pasos para

evaluar el agua no facturada y para establecer las pérdidas y fugas en las redes de distribución de agua (Farley, 2010).

La exactitud y precisión en el cálculo de las pérdidas de agua depende de la calidad de la información utilizada para el cálculo, por lo que los datos de partida deben ser fiables (Ziegler et al., 2012).

Para realizar un seguimiento del sistema de agua potable y establecer el nivel de pérdidas es necesario elaborar un balance hídrico periódico, tomando como referencia generalmente un año.

En 1996, el Comité de Operación y Mantenimiento de la División de Distribución de la IWA (*International Water Association*) estableció un grupo de trabajo para examinar las metodologías existentes a nivel internacional que evalúan las pérdidas de agua de los sistemas de abastecimiento de agua (Lambert & Hirner, 2000); de esta forma, se estandarizó el uso de un formato para el cálculo del balance hídrico; aunque, en el presente estudio, solamente se utilizarán las pérdidas de agua, se describe cada uno de los elementos que lo componen.

El balance hídrico estándar y cada uno de sus componentes es detallado en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Balance hídrico propuesto por IWA

A	B	C	D	E
Volumen de entrada al sistema $Q_I$	Consumo autorizado $Q_A$	Consumo autorizado facturado $Q_{AF}$	Agua facturada exportada	Agua facturada
			Consumo facturado medido	
			Consumo facturado no medido	
		Consumo autorizado no facturado $Q_{AUNF}$	Consumo no facturado medido	Agua no facturada
	Consumo no facturado no medido			
	Pérdidas de agua $Q_P$	Pérdidas aparentes $Q_{PA}$	Consumo no autorizado	
			Inexactitudes de los contadores y errores en el manejo de datos	
		Pérdidas reales $Q_{PR}$	Fugas en las tuberías de aducción y distribución	
			Fugas y reboses en tanques de almacenamiento	
			Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del contador del cliente	

Fuente: Alegre et al. (2006)

Los pasos para el cálculo de las pérdidas de agua y el agua no facturada son los siguientes (Alegre, 2004):

- **Paso 1:** Definir el volumen de entrada del sistema e ingresar el valor en la columna A.

- **Paso 2:** Definir el agua facturada exportada, el consumo facturado medido y el consumo facturado no medido en la columna D; anotar el total como consumo autorizado facturado (columna C) y el agua facturada (columna E).
- **Paso 3:** Calcular el volumen de agua no facturada (columna E), restando el volumen de entrada al sistema (columna A) menos el agua facturada (columna E).
- **Paso 4:** Definir el consumo no facturado medido y el consumo no facturado no medido en la columna D; de esta forma, se calculará el consumo autorizado no facturado (columna C).
- **Paso 5:** Sumar los volúmenes de consumo autorizado facturado y el consumo autorizado no facturado en la columna C; el resultado se anotará como consumo autorizado (columna B).
- **Paso 6:** Calcular las pérdidas de agua (columna B) como la diferencia entre el volumen de entrada del sistema (columna A) y el consumo autorizado (columna B).
- **Paso 7:** Evaluar el valor de las inexactitudes de los contadores y errores en el manejo de datos (columna D); también el consumo no autorizado, por los mejores medios disponibles; sumar ambos valores como pérdidas aparentes (columna C).
- **Paso 8:** Calcular las pérdidas reales (columna C), restando a las pérdidas de agua (columna B) las pérdidas aparentes (columna C).
- **Paso 9:** Evaluar los componentes de las pérdidas reales (columna D), utilizando los medios disponibles; posteriormente, sumarlos y cotejar con el volumen de las pérdidas reales en la columna C.

Existe dificultad para obtener un balance hídrico con una precisión razonable, principalmente en sistemas en los cuales la cobertura de medición de los consumidores es menor al 100% (Alegre, 2004).

Conocer en detalle estos elementos permite establecer su importancia; a continuación se realiza la descripción de cada uno de ellos (Ziegler et al., 2012), (Alegre, 2004):

#### **5.4.1. Volumen de ingreso al sistema**

Es muy importante conocer el volumen de ingreso al sistema, debido a que se convierte en uno de los elementos principales del balance; será la cantidad de referencia para el cálculo. Estos volúmenes son medidos en las conducciones principales que parten de la fuente de suministro.

#### **5.4.2. Consumo autorizado**

El volumen de consumo autorizado corresponde a la cantidad de agua medida y/o no medida, que es consumida por los usuarios registrados, el operador y adicionalmente otros volúmenes autorizados. Incluye el consumo autorizado facturado, compuesto por el consumo medido facturado, consumo no medido facturado y el agua exportada; por otra parte, también está el consumo autorizado no facturado, compuesto por el consumo medido no facturado y consumo no medido no facturado. En

este componente, se incluyen las fugas y reboses de depósitos luego del punto de medición del cliente y el consumo de agua por parte de la empresa operadora del servicio.

### **5.4.3. Agua facturada**

Es el volumen de agua que se entrega y se factura al usuario; es importante debido a que se convierte en el componente del balance hídrico que genera ingresos económicos para la empresa de agua; el volumen corresponde al consumo autorizado facturado.

### **5.4.4. Agua no facturada**

El agua no facturada es el volumen que permanece no facturado y, por lo tanto, no genera ningún ingreso para la empresa de agua. Puede calcularse como la diferencia de volumen de ingreso al sistema y el consumo autorizado facturado, o como la adición del consumo autorizado no facturado y las pérdidas de agua.

### **5.4.5. Pérdidas de agua**

Se entiende como pérdida de agua a la diferencia de volumen entre el punto de suministro y el contador del usuario, causada por varias razones. Las pérdidas son clasificadas como aparentes y reales: las pérdidas aparentes se deben a las mediciones poco precisas, errores de manejo de datos y al consumo no autorizado; las pérdidas reales están constituidas por fugas producidas en las tuberías principales, en conexiones domiciliarias o acometidas y en los depósitos de almacenamiento, incluyendo el rebose que se puede presentar en algunas ocasiones. Generalmente, las pérdidas físicas que se producen después del contador del usuario son excluidas de la evaluación de las pérdidas reales; sin embargo, su evaluación puede ser muy importante para desarrollar una gestión de la demanda (Ziegler et al., 2012).

Todos los cálculos para la elaboración del Balance Hídrico son aproximados, hasta cierto punto, debido a la dificultad de evaluar todos los componentes con una precisión total. Es probable una mejora en la fiabilidad cuando el agua consumida por los clientes se mida a través de contadores precisos que tengan un mantenimiento regular y que no cuenten con depósitos de almacenamiento domiciliarios, debido a que los mismos pueden dar lugar a bajas velocidades de flujo a través de las conexiones de servicio, por lo que se tendrán caudales bajos que no serán registrados con precisión (Lambert & Hirner, 2000).

Debido a que este elemento es uno de los que representa mayor interés, a continuación se detallarán sus características y su importancia en un sistema de suministro de agua.

## **5.5. Volumen de ingreso al sistema**

Debe conocerse el volumen que ingresa al sistema o subsistema, el cual sirve tanto para la elaboración del balance hídrico como para establecer las posibilidades de lograr el suministro continuo.

También es importante conocer las fluctuaciones en el caudal de ingreso al punto de suministro directo de la red, generalmente depósitos; de esta forma, es posible calcular el volumen de regulación de estos elementos, con el fin de evaluar su capacidad y analizar si los mismos requieren ampliación o tiene la capacidad suficiente para el proceso de transición a suministro continuo.

El volumen de ingreso define la escasez física de agua del sistema, estableciendo, de esta forma, las posibilidades de transición a suministro continuo o no. Dos elementos que derivan de esta información son la demanda y el porcentaje de fugas en suministro intermitente; ambos son factores cuantitativos clave para definir el cambio del tipo de suministro. A continuación, se detalla su importancia.

### **5.5.1. Demanda per cápita**

Establecer la demanda per cápita del suministro intermitente, para tener posibilidades de convertirse a suministro continuo es fundamental. Varios autores indican que hay sistemas con suministro continuo de agua que trabajan con demandas de 50 l/hab/d (Gleick, 1996), (Twort et al., 2000), (Howard & Bartram, 2003), (Dahasahasra, 2007), (Fan et al., 2014).

Se considera que es factible plantear una transición a suministro continuo cuando la demanda es superior a 50 l/hab/d, siempre y cuando se tengan niveles mínimos de pérdidas de agua en la red que garanticen este nivel de demanda en suministro continuo.

Según Andey & Kelkar (2009), el consumo de agua en suministro continuo, tras la transición, no cambia apreciablemente si el consumo de agua es satisfecho bajo consumo intermitente. Sin embargo, si la demanda no es satisfecha en suministro intermitente, existirá un incremento notable del consumo cuando el sistema trabaje las veinticuatro horas (Andey & Kelkar, 2009).

El suministro continuo sólo es posible si se tiene agua suficiente para abastecer la demanda durante todo el día. Si los usuarios tienen racionamiento de agua, con demandas bajas, cuando el sistema tenga suministro por veinticuatro horas demandarán agua tanto como les sea posible (Sridhar, 2013). En este escenario, el sistema de agua puede sufrir estrés extremo al hacer frente a estas demandas altas. Por esta razón, es recomendable que los usuarios dejen de utilizar los tanques domiciliarios y bombas en las viviendas; para este fin debe asegurarse la medición para todos los usuarios de la red.

Sridhar (2013) sugiere la instalación de medidores de flujo inteligentes, que registren tanto el consumo diario como mensual; se limite el consumo diario a una cuota de uso por día y, si se supera un determinado umbral, el contador se cierra. Sin embargo, este tipo de soluciones son poco viables en sistemas con escasez económica.

### **5.5.2. Porcentaje de fugas en suministro intermitente**

El porcentaje de fugas en el sistema con suministro intermitente es resultado del balance hídrico. Debido a las bajas presiones y la restricción en el tiempo de suministro de estos sistemas, las fugas son menores (Morrison et al., 2007), (Fontanazza et al., 2013) con relación a los sistemas con suministro continuo. Esto permite que la adopción del suministro intermitente sea favorable en zonas de escasez física de agua (Charalambous, 2012a), (Maurya et al., 2008).

Charalambous (2012a), (2012b) establece que las fugas se incrementan notablemente tras la transición a suministro continuo. Asimismo, en el *capítulo 8* de la presente tesis, se analiza la influencia de las mejoras en la presión y el tiempo de suministro en el incremento de las pérdidas reales de agua.

Valores elevados en las fugas en el sistema actual con suministro intermitente generarían niveles extraordinarios de pérdidas reales en suministro continuo, tras la transición. Por lo tanto, se considera razonable no superar el 20% de fugas en suministro intermitente para tener posibilidades de

contar con suministro continuo. Si se tienen porcentajes superiores, es recomendable inicialmente reducir el nivel de fugas del sistema con suministro intermitente y luego proceder con la transición.

Asimismo, es recomendable evaluar los niveles de presión y de horas de suministro iniciales, pues, si se tienen presiones muy bajas y horarios de suministro muy cortos, las fugas serán mínimas en suministro intermitente; pero cuando el sistema trabaje con suministro continuo las pérdidas reales de agua pueden ser considerables.

## **5.6. Volumen consumido en la red**

En base al volumen mensual consumido por los usuarios que cuentan con contador, se calcula el volumen mensual de consumo promedio; este valor sirve de base para la estimación del consumo de los usuarios que no cuentan con contador.

Para conocer el volumen total que consume cada sector, se deben adicionar los volúmenes de las pérdidas de agua.

### **5.6.1. Reparto del volumen no facturado en cada sector**

Como se conoce, las pérdidas son resultado del balance hídrico de volúmenes facturados y volúmenes realmente consumidos. Dentro de las pérdidas, los volúmenes más importantes son las pérdidas reales o las fugas que se producen a través de fisuras o juntas en las tuberías y accesorios (Farley, 2001).

En el caso de los sistemas con suministro intermitente, la asignación de los volúmenes de pérdidas es complicada, pues, generalmente, no se conoce su localización exacta, aunque puede estimarse su cantidad.

Entre las formas de inclusión de los volúmenes de pérdidas de agua al modelo se tiene (Meneghin, 1999):

#### **5.6.1.1. Corrección de la demanda mediante el porcentaje de pérdidas**

Consiste en corregir la demanda media del nudo con un coeficiente que incluya el porcentaje de pérdidas determinado para toda la red; de esta forma se distribuyen las pérdidas generando curvas de modulación con mayores diferencias entre los caudales en horas pico y caudales en horas valle.

#### **5.6.1.2. Las fugas como consumos dependientes de la presión**

Las fugas en una red son dependientes de la presión cuando las presiones son mayores (horas de consumo valle) las fugas son grandes, mientras que, cuando las presiones en la red son mínimas, (horas de consumo punta) el nivel de fugas en la red es mínimo.

El principal inconveniente de esta forma de tratar las fugas se deriva de la necesidad de calcular un coeficiente que represente la caída de presión en cada una de las fugas. Esto se traduce en un coeficiente que debe calibrarse para cada una de las tuberías de la red, lo cual complica notablemente el ajuste del modelo.

### 5.6.1.3. Asignación de fugas como caudal medio constante

Por último, se considera añadir un volumen constante que represente las pérdidas, calculado a partir del balance hídrico del sistema de suministro; la repartición en los nudos dependerá de la importancia relativa de estos. Este reparto puede hacerse proporcionalmente al volumen diario demandado por los mismos, o bien en función de la longitud de tubería conectada con cada nudo o el número de elementos accesorios de la misma (Meneghin, 1999).

Este método implica asumir que el caudal de fugas se mantiene constante a lo largo del día, lo cual resulta ser una simplificación porque se sabe que las fugas dependen de la presión en la red. En cualquier caso, la variación diaria de los caudales de fugas es, con diferencia, mucho menos acusada que la variación del consumo facturado. Este concepto puede resultar más adecuado para ser aplicado en los sectores con suministro intermitente, debido a que las presiones en las horas de suministro tienden a ser constantes.

### 5.6.2. Caudal medio del periodo de suministro

Una de las desventajas del suministro discontinuo está relacionada con el consumo de grandes caudales por parte de los usuarios, debido a que deben recolectar en un lapso corto de tiempo toda la cantidad de agua a consumir en un día.

Según mediciones realizadas en sectores de los sistemas con suministro intermitente de Judayta (Jordania) (Battermann & Macke, 2001) y de Oruro (Bolivia), la presencia de los depósitos de almacenamiento domiciliarios hace que el caudal de consumo en las horas de suministro tienda a ser constante. Generalmente, se observan los valores máximos al inicio del periodo de entrega y los mínimos antes de que concluya el horario de suministro, por lo que puede asumirse un caudal o volumen medio del periodo de abastecimiento constante, dividiendo el volumen que se consume en un día en el sector entre la cantidad de horas de servicio. De esta forma, los sectores que tienen menos horas de entrega de agua tendrán un caudal medio del periodo de suministro más grande.

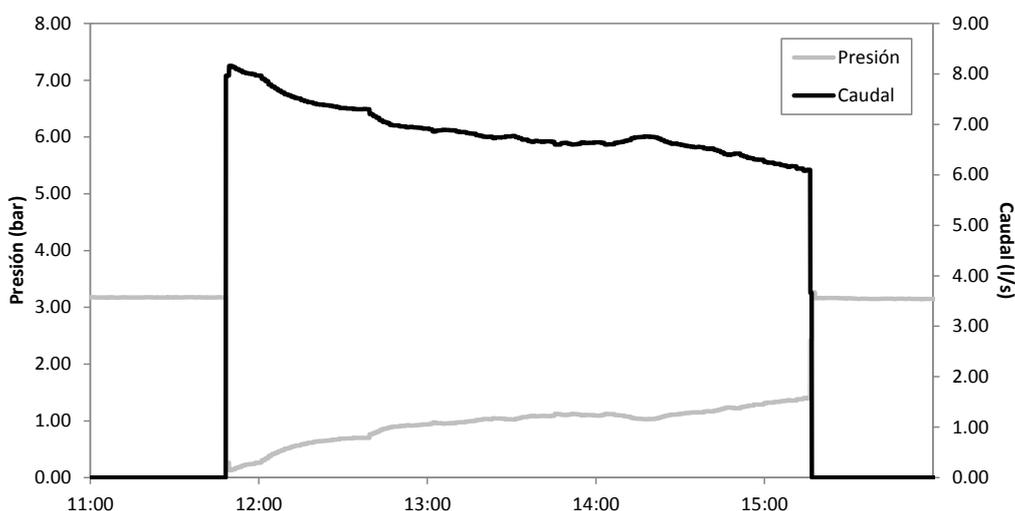


Fig. 5.1. Medición de presiones y caudales, sector E08-02, sistema de agua de Oruro, 04/02/2013

Fuente: SeLA – Oruro

En base a las mediciones del caudal de uno de los sectores de la ciudad de Oruro, se elaboró el siguiente gráfico que muestra la variación del consumo:

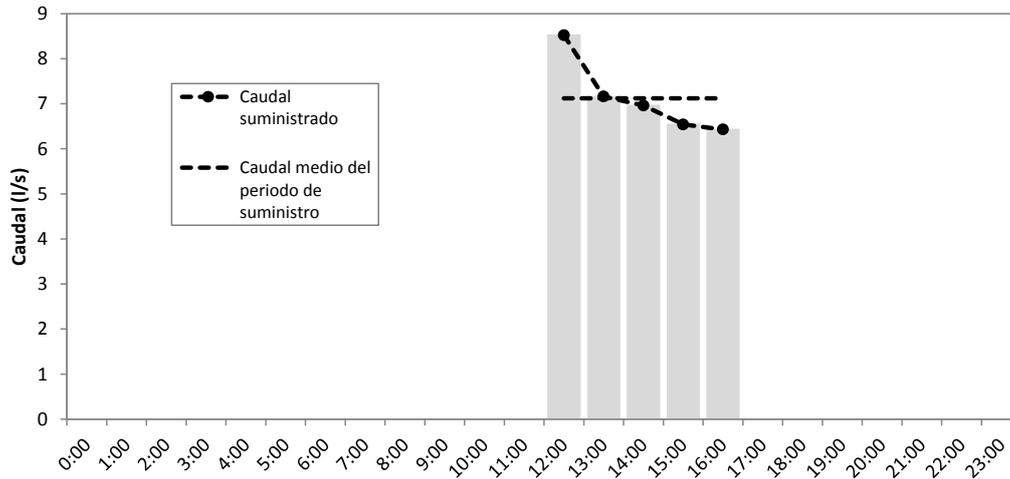


Fig. 5.2. Representación de la variación del caudal de suministro, ingreso al sector E08-02

Al usar el caudal medio del periodo de suministro, se definen bloques de suministro constante (Fig. 5.3). La relación que se utiliza para el cálculo del volumen por hora, es la siguiente:

$$\text{Volumen por hora} = \frac{\text{Volumen diario}}{\text{Horas de suministro}} \quad (5.1)$$

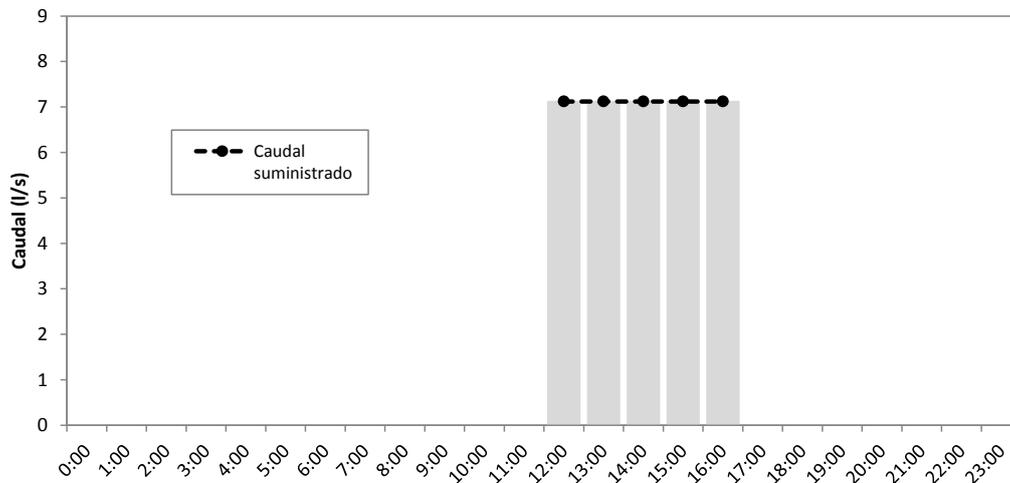


Fig. 5.3. Simplificación del caudal de suministro, ingreso al sector E08-02.

El valor calculado de esta forma representa al caudal medio del periodo de suministro. La variación de la demanda en los sistemas intermitentes fluctúa entre  $\pm 20\%$  a  $\pm 30\%$ ; por esta razón, para el cálculo hidráulico se puede utilizar hasta un incremento de 30% a la demanda base. Como se utiliza el criterio de demanda dependiente de la presión, se parte de una demanda inicial alta que tiende a disminuir en función de la presión.

### 5.6.3. Horario de suministro

A diferencia de un sistema con suministro continuo, un sistema con suministro intermitente cuenta con un horario de provisión de agua para cada uno de los sectores, definiendo en él las horas de inicio y la duración del periodo de entrega de agua.

Esta información permite establecer la presencia de sectores trabajando en simultáneo, definir las horas pico y configurar la curva de suministro para toda la red.

### 5.6.4. Curva de suministro

El caudal medio del periodo de suministro solamente es representativo de un sector; por lo tanto, si una red tiene muchos sectores, deben considerarse cada uno de ellos incluyendo su horario de suministro para establecer la curva de suministro de la red.

Cuando se tiene una red sectorizada con suministro intermitente, obtener la curva de suministro de la red es fundamental, mucho más si se plantea la posibilidad de cambiar a suministro continuo. En un sistema con medición en el punto inicial de suministro es posible establecer la curva de suministro; sin embargo, cuando no se cuenta con esta información, esta curva puede ser obtenida en base al consumo de cada uno de los sectores y su horario de suministro.

### 5.6.5. Evaluación de la curva de suministro

La curva de suministro puede tener dos configuraciones básicas, a partir de las cuales se pueden plantear las acciones correspondientes de mejora del sistema.

El primer tipo de curva de suministro se origina cuando se genera un caudal pico en suministro intermitente superior al caudal pico que se produce cuando el sistema trabaja de forma continua. Esta situación es común en sistemas en los cuales existe simultaneidad de horarios de suministro, lo cual produce caudales muy elevados; en consecuencia los niveles de presión son bajos y existen reclamos entre la población. Estas condiciones son síntomas de una mala gestión del sistema.

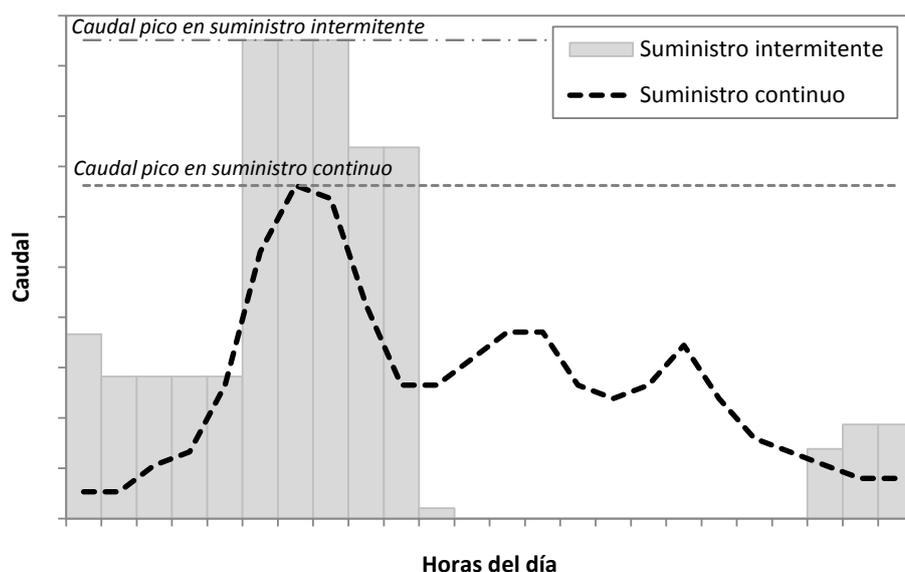


Fig. 5.4. Caudal pico de la curva de suministro intermitente superior al caudal de la curva de suministro continuo

El segundo tipo de curva de suministro se produce cuando el caudal pico en suministro intermitente es inferior al caudal pico en suministro continuo. En este tipo de sistemas, la simultaneidad en el horario de suministro de los sectores es mínima. Los caudales totales bajos permiten lograr mejores presiones de servicio.

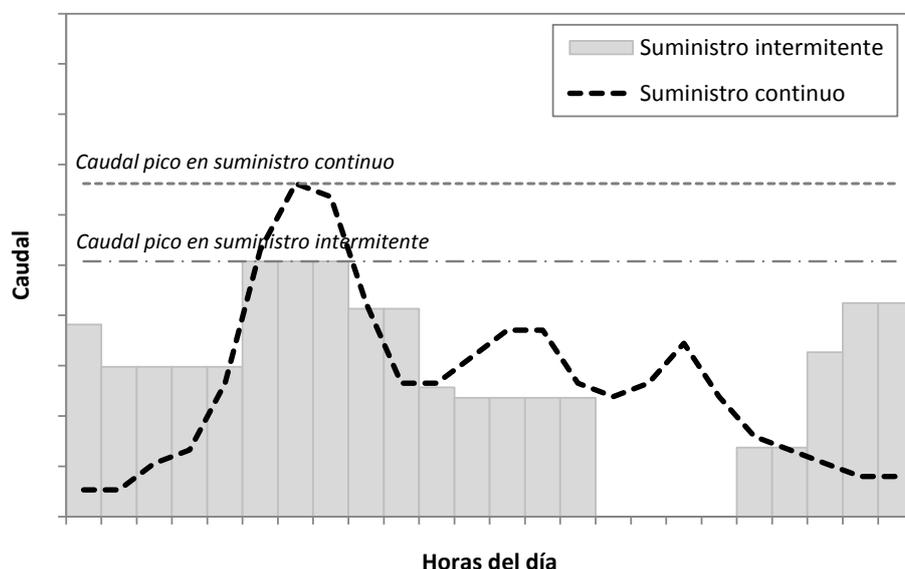


Fig. 5.5. Caudal pico de la curva de suministro intermitente inferior al caudal de la curva de suministro continuo

El mejor escenario en suministro intermitente es aquel en el cual los horarios son convenientes para la población y no generan excesiva simultaneidad en el consumo.

Es conveniente realizar el proceso de transición a suministro continuo desde una curva de suministro con el caudal pico bajo. En la presente tesis, se plantea la gestión de horarios de suministro, expuesta en el capítulo 7, como forma de reducción del caudal pico; de esta forma la mejora empieza cuando el sistema tiene suministro intermitente.

## 5.7. Volumen de regulación de depósitos

Conociendo la variación en el caudal de ingreso al sistema y la curva de suministro, es posible calcular el volumen de regulación de los depósitos que alimentan a la red. Se procede con el cálculo del volumen almacenado en cada hora, para lo cual se realiza un balance en cada uno de los periodos estudiados con los volúmenes de ingreso y de salida; este balance también permite calcular la altura del agua durante las veinticuatro horas, lo cual puede resultar útil para la calibración del modelo.

El cálculo del volumen de regulación de los depósitos permite verificar si éstos cuentan con la capacidad suficiente para lograr el suministro continuo en la red. Asimismo, este proceso puede ser útil para realizar un proceso de calibración del modelo e identificar algunos problemas en el horario de suministro.

## 5.8. Valores ponderados de presión y horas de suministro

Dentro de cualquier diagnóstico de un sistema con suministro intermitente, debe considerarse la cantidad de horas de suministro y la presión en la red. Como se tienen sectores con diferentes periodos y horarios de suministro, es necesario realizar la ponderación de estos valores.

Asimismo, para el proceso de transición, es necesario estimar la presión que se alcanzará en suministro continuo; para lograrlo, se deben conocer los niveles de presión y las horas de suministro actuales. Estos elementos se calculan en base a los valores medidos en cada sector y la cantidad de usuarios existentes en cada uno de ellos:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^n (vp_i \cdot nc_i)}{\sum_{i=1}^n nc_i}, \quad (5.2)$$

$$h_{\text{int}} = \frac{\sum_{i=1}^n (nh_i \cdot nc_i)}{\sum_{i=1}^n nc_i}, \quad (5.3)$$

donde:

$n$  = número total de sectores de la red,

$vp_i$  = valor de la presión de servicio del sector  $i$ ,

$nc_i$  = número de clientes o usuarios del sector  $i$ ,

$nh_i$  = número de horas de suministro del sector  $i$ .

Ambos valores son fundamentales en la evaluación del sistema con suministro intermitente, pues permiten conocer las condiciones iniciales globales del sistema, para evaluar posibles mejoras y efectos relacionados con las fugas ya en suministro continuo, como se analiza en el *capítulo 8*.

## 5.9. Categorización del sistema con suministro intermitente

Uno de los primeros pasos para establecer las mejoras en el sistema con suministro intermitente es la categorización del tipo de escasez del sistema: física, económica y/o debida a la mala gestión (Totsuka et al., 2004)

El diagnóstico del tipo de escasez del sistema con suministro intermitente depende de varios factores. A continuación, se sugieren algunos elementos de evaluación para facilitar esta clasificación, con el fin de lograr un suministro continuo.

### 5.9.1. Escasez física

Se considera que un sistema con suministro intermitente presenta escasez física, en base a las posibilidades de tener suministro continuo, cuando la demanda de la población es inferior a 50 l/hab/d. Asimismo, cuando el porcentaje de fugas de la red con suministro intermitente es superior a 20%.

No puede arriesgarse a un sistema que tiene niveles de fugas elevados a tener mayores fugas cuando trabaje con suministro continuo. Las fugas pueden perjudicar al logro del suministro por veinticuatro horas.

En este contexto, deben buscarse nuevas fuentes de suministro antes de proceder con la transición a suministro continuo. Sin embargo, la metodología propuesta en la presente tesis también

permite gestionar mejor los sistemas con escasez física de agua, en base a la sectorización y la gestión de horarios.

### **5.9.2. Escasez económica**

La escasez económica está condicionada a la disponibilidad de recursos económicos de la empresa de agua, cuya base fundamental son las tarifas.

En escenarios de escasez económica, las empresas se ven limitadas para realizar procesos de mejora del sistema o la transición a suministro continuo. Esta situación puede ser enfrentada a través de un proceso de mejora gradual, el cual es dividido en etapas en función de la disponibilidad de recursos de la empresa.

En el proceso de transición a suministro continuo, la escasez económica define si se realizan medidas de mejora graduales o medidas de mejora directas.

Asimismo, en sistemas con escasez económica, es necesario evaluar la capacidad de la red, calculando el caudal máximo teórico.

### **5.9.3. Escasez por mala gestión**

La mala gestión también está relacionada con la capacidad de la red, por lo que es importante calcular el caudal máximo teórico. Una presión ponderada baja también es indicador de mala gestión.

Otros indicadores de gestión deficiente son: un caudal pico del patrón de suministro intermitente superior al caudal pico en suministro continuo; en estos casos no se aprovecha la flexibilidad de los horarios de suministro, los cuales no están optimizados para brindar un mejor servicio; e índices de equidad del suministro bajos (*Capítulo 9*).

Las acciones a seguir en este escenario dependerán de los otros tipos de escasez, física o económica. En la presente tesis, se proponen herramientas necesarias para mejorar el sistema en un escenario de escasez física, y también para realizar el proceso de transición a suministro continuo en un contexto de escasez económica.



## **CAPÍTULO 6. Sectorización en sistemas con suministro intermitente**

---

### **6.1. Introducción**

Cuando una red con suministro intermitente no está sectorizada, el caudal pico generado en las horas con suministro es muy grande, a causa de la simultaneidad en el consumo de agua. Los caudales elevados reducen las condiciones de servicio y pueden generar zonas con presiones deficientes, pues, cuando una red trabaja con suministro intermitente, debe soportar una carga superior a su capacidad.

Por esta razón, la sectorización de la red en sistemas con suministro intermitente, es uno de los primeros pasos para lograr una gestión más eficiente del sistema y garantizar la equidad en el suministro. La presencia de sectores en la red, cada uno con un horario de suministro diferente, es capaz de reducir el caudal pico y en consecuencia mejorar las condiciones de presión de servicio. Una sectorización ideal permite llegar a un caudal pico que tiende al caudal medio diario consumido por la población, lo cual, sin duda, es beneficioso para establecer un mejor servicio durante las horas de suministro.

En el presente capítulo, se analiza la sectorización de las redes con suministro intermitente desde dos puntos de vista: el primero, considerando la evaluación de sectores en redes ya sectorizadas y, el segundo, configurando una metodología que permita la sectorización de redes bajo condiciones de funcionamiento intermitente.

Si la red con suministro intermitente cuenta ya con sectores, cada uno de ellos debe ser evaluado con relación a su capacidad y a la equidad en el suministro que pueden lograr bajo la configuración actual de la red.

Generalmente, la presencia de sectores en un sistema con suministro intermitente es una característica intrínseca del mismo, principalmente, si la red es extensa, debido a la necesidad de diferenciar por horas el suministro entre las zonas. La configuración y el tamaño de cada sector no siempre garantizan un suministro equitativo, pues, generalmente, éstos son diseñados bajo consideraciones de suministro continuo. En el presente estudio, se busca definir criterios que permitan evaluar y/o crear sectores que garanticen un nivel adecuado de equidad en el suministro de agua; para lo cual, se valora la capacidad del sector y se analizan formas de medición de la equidad; en este contexto se establece el tamaño adecuado de cada uno de los sectores y el tiempo de suministro.

Tras la ampliación de la capacidad de la red principal, el siguiente paso para la transición gradual hacia un sistema con suministro continuo es la evaluación de los sectores; las modificaciones en las tuberías aguas arriba modifican las presiones de ingreso a cada uno de los sectores, por lo que en estos nuevos escenarios debe evaluarse tanto la capacidad como la equidad del suministro; esto es necesario porque, por un tiempo, el sistema trabajará con sectores que seguirán con suministro intermitente; de esta forma se garantiza, por lo menos, un suministro equitativo en sectores que siguen con pocas horas de servicio, hasta llegar al suministro continuo de toda la red. Es importante señalar que el proceso de mejora de los sectores puede obviarse cuando la red tiene capacidad suficiente y existe la cantidad de agua necesaria para una transición directa a suministro continuo, pues los sectores no necesitan trabajar bajo suministro intermitente.

La propuesta de sectorización, en base a la equidad del suministro, también puede ser útil en sistemas con suministro intermitente que presentan escasez física del recurso. Debe tomarse en cuenta que, por un lado, se busca la sectorización de toda una red; y por otro lado, según el tipo de sector evaluado, puede ser necesaria su división. Ambas situaciones pueden ser resueltas con la metodología propuesta.

La presencia de depósitos domiciliarios genera competencia entre usuarios, cuyo objetivo es recolectar la mayor cantidad de agua posible en el menor tiempo técnicamente posible (Fontanazza et al., 2013); la configuración del sector con suministro intermitente debe garantizar condiciones de suministro lo más semejante posible para todos los usuarios, buscando reducir la inequidad en el suministro.

Las soluciones o propuestas para resolver los problemas de los sistemas con suministro intermitente no buscan promover el suministro intermitente; se buscan soluciones para un mejor servicio en sistemas en los cuales no es realista tener un suministro por veinticuatro horas (Vairavamoorthy & Elango, 2002). La sectorización es una herramienta muy útil tanto para sistemas que no tienen posibilidades de suministro continuo, como para sistemas que buscan el cambio del tipo de suministro a continuo.

## **6.2. Sectorización**

Un sector es un área discreta de una red de distribución de agua, aislada hidráulicamente, de forma temporal o permanente (Di Nardo et al., 2013a). Los sectores pueden ser creados por medio de la instalación de válvulas de aislamiento en los tramos que conectan con otros sectores contiguos; en algunos casos estos tramos pueden desconectarse permanentemente (Ziegler et al., 2012); el aislamiento se logra, también, a través del corte de tuberías, introduciendo nuevas tuberías que redistribuyen el caudal, etc. (Izquierdo et al., 2011).

La gestión técnica de las grandes redes de suministro de agua es una tarea muy compleja, por lo que la reducción de la red en sectores se convierte en una estrategia muy útil (Hajebi et al., 2014).

Sectorización también es sinónimo de creación de DMAs (Di Nardo et al., 2013b), aunque es característico de los DMAs incluir medidores de flujo en los tramos de ingreso. Es recomendable que cada sector sea alimentado por un número limitado de tuberías (Gomes et al., 2012), (Di Nardo et al., 2013a). Debe tomarse en cuenta que en redes con suministro intermitente pueden existir sectores sin medición, creados con el objetivo de suministrar agua en diferentes horarios (Ilaya-Ayza et al., 2015c); por lo tanto, no serían estrictamente DMAs.

La implementación y desarrollo de los DMAs son tareas muy empíricas; generalmente, se basan en la experiencia técnica de las empresas de agua o se realizan por simulaciones de prueba y error (Di Nardo et al., 2013a).

Es necesario medir periódicamente el caudal de ingreso y salida del DMA, con el fin de evaluar los niveles de fugas en la red. Según Farley (2001), los DMAs están clasificados de la siguiente forma:

- DMA de ingreso único.
- DMA de ingresos múltiples.
- DMA en cascada.

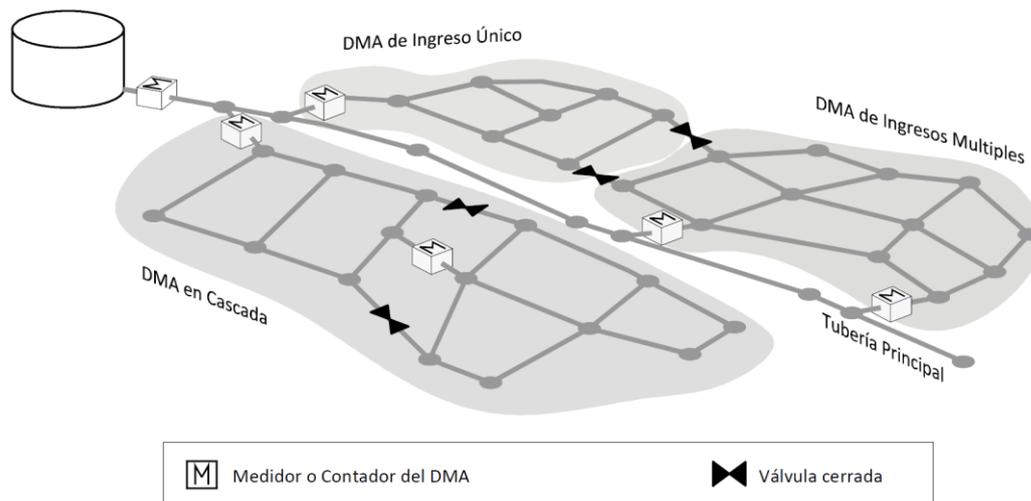


Fig. 6.1. Clasificación de los DMA

Fuente: Farley (2001)

El objetivo principal de la sectorización es la obtención de información escalada y manejable, que sirva para llevar a cabo mejoras en la gestión de cada sector (Izquierdo et al., 2011), y lograr un mejor control sobre la distribución de agua (Hajebi et al., 2014). La división de grandes redes en áreas pequeñas es un primer paso para la localización de áreas de fugas. En sistemas con deficiencias en el suministro, la monitorización de las fugas puede ser introducida gradualmente en base a los sectores (Farley, 2010).

La sectorización es muy útil para las siguientes tareas (Izquierdo et al., 2011):

- auditorías de las pérdidas de agua;
- caracterización de la curva de demanda, especialmente el flujo nocturno;
- detección de fugas a través del análisis de la evolución del caudal mínimo nocturno;
- revisión rápida de los resultados de campañas de búsqueda y reparación de fugas;

- detección del fraude, el subcontaje, o diversos errores de medición;
- reducción de los costos de mantenimiento;
- capacidad de provisión de diferentes niveles de presión, que ayudan al establecimiento del control de la presión (zonas de presión) (Hajebi et al., 2014);
- mejora en la planificación de trabajos de rehabilitación y mantenimiento (Herrera, 2011);
- diferenciación de horarios de suministro en redes con suministro intermitente (Ilaya-Ayza et al., 2015c).

La configuración de los sectores permite mejorar el control y la gestión del sistema de distribución, tales como: la calidad del agua, la intensidad espacial y temporal de la distribución de las fugas. Los DMAs permiten reducir el nivel de pérdidas de agua y mejoran la estanqueidad de la red (Izquierdo et al., 2011).

Asimismo, los DMAs pueden convertirse en sectores de gestión de la presión, instalando válvulas reductoras de presión en los puntos de entrada. Los sectores utilizados en un sistema de suministro intermitente pueden convertirse en DMAs para lograr, más adelante, un suministro continuo.

La división de una red de agua de gran tamaño puede ser una operación delicada; si no es realizada con cuidado puede causar problemas de suministro y de calidad. Para generar los sectores debe tenerse un conocimiento detallado y profundo del funcionamiento hidráulico de la red existente (Ziegler et al., 2012).

El aislamiento de los sectores puede disminuir el rendimiento hidráulico de la red, reduciendo su topología (bucles en la red) y la redundancia hidráulica (Di Nardo et al., 2013a), generando una mayor pérdida de carga de la red (Campbell et al., 2014a). Adicionalmente, Farley (2010) identificó otros inconvenientes:

- la división de la red implica costes (caracterización y levantamiento de la zona, diseño, instalación de medidores y cámaras, etc.); este coste es muy elevado principalmente en zonas con menos de 1000 conexiones;
- por las características de la red (topografía o presiones bajas en la red), algunas veces es difícil dividir la red;
- la sectorización puede causar problemas en la operación, pues existe conflicto entre la reducción de fugas y el logro de un suministro de buena calidad para los usuarios. En tiempo de escasez de agua se pueden abrir válvulas para satisfacer la demanda, lo que puede perjudicar a los datos recogidos en el DMA;
- la creación de un DMA puede conducir a la mala calidad del agua y a la queja de los usuarios, debido principalmente a la configuración de tramos sin salida donde el agua se conserva por mayor tiempo.

La complejidad en la creación de sectores que permitan reducir las fugas y garanticen un servicio con una calidad adecuada exige el uso de técnicas eficientes (Izquierdo et al., 2011). Existe una tendencia general al uso de técnicas de optimización que buscan lograr un nivel de servicio

adecuado, (Herrera, 2011), (Izquierdo et al., 2011), (Di Nardo et al., 2013a), (Campbell et al., 2014c), (Alvisi & Franchini, 2014), (Hajebi et al., 2014). Varios autores sugieren el uso de teoría de grafos como parte del proceso de sectorización (Tzatchkov et al., 2008), (Di Nardo et al., 2013b), (Campbell et al., 2014b), (Campbell et al., 2015); también se aplicaron técnicas de clustering combinadas con otras formas de reconocimiento de patrones como los mapas auto organizados (*Self organizing maps*) (Campbell et al., 2014a).

### 6.2.1. Diseño de DMAs

El diseño de los DMAs requiere un conocimiento profundo del sistema de suministro de agua, por lo que es indispensable contar con el plano de la red completa y actualizada, registro e información topográfica. Por otro lado, se debe disponer de patrones de consumo de agua y datos operativos sobre flujos y presiones. En base a esta información, se debe contar con un modelo hidráulico calibrado, que permita determinar los efectos de la sectorización sobre la presión, además de la identificación de tuberías redundantes, cuellos de botella o tramos que pueden sufrir estancamiento de agua (Ziegler et al., 2012).

La primera etapa de diseño de un DMA debe incluir la revisión de la infraestructura de la red de suministro; el diseño se inicia desde la red principal y se extiende hacia la red de distribución; el objetivo es separar tanto como sea posible los DMAs de la red principal. De esta forma, se mejora el control de la red principal sin afectar a las redes secundarias.

La partición de una red de distribución de agua en sectores implica las siguientes tareas (Alvisi & Franchini, 2014):

- asignación de todos los nodos de la red en diferentes sectores, asegurando en cada partición un tamaño adecuado y el acceso directo a una fuente de suministro;
- definición de los tramos que deben cerrarse para aislar al sector y cuáles deben mantenerse abiertos para ser equipados con medidores de flujo. Los sectores deben ser independientes entre sí, la fiabilidad de la red no debe reducirse drásticamente y los niveles mínimos de servicio para los usuarios deben estar garantizados.

Los límites del DMA se crean cerrando válvulas o colocando tapones que corten el paso de agua hacia el DMA contiguo o la tubería principal. Estos también están constituidos por límites naturales como ríos, o por artificiales como líneas de ferrocarril o vías principales. Se debe buscar minimizar el número de válvulas a cerrarse para reducir las fugas.

Es necesario que la variación de elevaciones en un DMA sea mínima, lo cual es importante cuando se gestiona la presión. Es recomendable tener el punto de ingreso al sector en la zona elevada del DMA (Ziegler et al., 2012).

Según la IWA (Morrison et al., 2007), un DMA debe estar compuesto por entre 500 y 3.000 viviendas. Generalmente, su tamaño variará dependiendo de factores locales y las características del sistema, tales como:

- el nivel económico requerido de fugas;

- factores geográficos/demográficos (por ejemplo zonas urbanas o rurales, industriales);
- preferencia de la empresa de agua (por ejemplo cuando se quieran ubicar las roturas con facilidad);
- condiciones hidráulicas (presiones, calidad del servicio).

En la práctica, los DMAs se dividen en tres categorías (Farley, 2001):

- Pequeños: menos de 1000 viviendas.
- Medianos: entre 1000 a 3000 viviendas.
- Grandes: de 3000 a 5000 viviendas.

También es factible y útil implementar DMAs en redes de distribución con suministro intermitente, aunque es más difícil determinar el nivel de fuga si los clientes almacenan agua en tanques privados. Se puede calcular un consumo privado por hora de servicio y se puede comparar con el flujo ingresante en el DMA, siempre que se disponga de datos confiables del consumo de los usuarios.

### **6.2.2. Sectorización en sistemas con suministro intermitente**

Al igual como ocurre con el diseño de redes, las técnicas de sectorización para sistemas con suministro continuo también son utilizadas para sistemas con suministro intermitente. Como es el caso de la ciudad de Matamoros (México), donde se propone su sectorización teniendo parte de la red suministro intermitente (Tzatchkov et al., 2006). En algunos casos, se continúa con métodos empíricos para delimitar el tamaño de los sectores y las horas de suministro.

Aunque el uso de sectores se convirtió en una técnica común para la detección de pérdidas en los sistemas con suministro continuo, en redes con abastecimiento intermitente es común la sectorización para la provisión de agua por horas no simultáneamente, aunque no son estrictamente DMAs debido a que, generalmente, no cuentan con contadores o medidores de caudal en los puntos de ingreso. Por esta razón, los sectores se convierten en un elemento intrínseco del suministro intermitente.

Algunos estudios indican la utilidad de los sectores o zonas en el proceso de transición a suministro continuo. McIntosh (2003) sugiere que el proceso de transición debe comenzar en determinadas zonas, para posteriormente expandirse hacia el resto de la red. Dahasahasra (2007) propone el uso de zonas de operación que a su vez son divididas en DMAs, para ir controlando el nivel de pérdidas de agua en el proceso de transición a suministro continuo; sugiere, además, que cada uno de los DMAs no debe contener a más de 1000 conexiones.

Por otra parte, Vairavamoorthy et al. (2008) plantean el diseño de la red en su conjunto o sector en particular en función de un modelo de demanda, que usa la teoría de colas (*queuing theory*) y el enrutamiento al depósito. El modelo pronostica la cantidad de agua que los usuarios finales demandan. Los componentes del modelo de demanda son: tipos de conexión (tomas de agua, grifos de

patio y depósitos domiciliarios); régimen de presión (que define con qué rapidez se sirven los usuarios y el número de usuarios que se pueden servir en un periodo de suministro determinado); y la duración de la oferta. El diseño considera como primer punto la determinación de la red de menor coste que cumpla con las presiones mínimas; posteriormente, el objetivo es reducir al mínimo la variabilidad de la presión.

Aunque se reconoce la importancia de los sectores en el suministro intermitente (McIntosh, 2003), (Dahasahasra, 2007), no existen referencias concretas relacionadas para el diseño de la división de la red en sectores.

### **6.3. Tiempo o periodo de suministro**

El tiempo de suministro o periodo de entrega de agua es una característica fundamental en los sistemas con suministro intermitente. Sin embargo, este elemento suele ser adoptado con poco criterio técnico, produciendo de esta forma muchas veces inequidad la provisión de agua.

La distribución de agua es inequitativa tanto en espacio como en tiempo. Los usuarios situados en posiciones ventajosas de la red obtienen agua de la red poco después del comienzo del periodo de suministro; por otro lado, los más desfavorecidos deben esperar mucho tiempo más (De Marchis et al., 2010).

Esta situación se agrava debido al lavado inicial de las tuberías de la red durante los primeros minutos de suministro; en este periodo existen niveles peligrosos de contaminación del agua (Kumpel & Nelson, 2013). Según Neelakantan et al. (2014), la baja calidad del agua persiste hasta por 20 minutos después de la re-presurización de la red. Se estima que la red logra presurizarse 20 a 30 minutos después de iniciar el suministro (Ingeduld et al., 2006), o más, dependiendo de la configuración de la red (De Marchis et al., 2010). Por lo tanto, el periodo de suministro, entregando agua con una calidad adecuada, se reduce notablemente.

El tiempo de suministro debe depender de las características hidráulicas del sector y de la red. Es recomendable que este tiempo no sea menor al tiempo de llenado del depósito domiciliario del punto más lejano o más desfavorable (De Marchis et al., 2010); cuando se tienen periodos de suministro muy cortos, existe la posibilidad de no llegar a estos puntos, ubicados generalmente en zonas pobres (Dahasahasra, 2007).

Fan et al. (2014) analizan periodos de suministro y dotaciones en sistemas de varias poblaciones rurales de China. Llegan a la conclusión de que el tiempo de suministro está relacionado con la cantidad de agua que se puede dotar, y con las posibilidades de mejora de la salud de la población. Tras analizar sistemas con suministro intermitente y continuo, establecen que con periodos de suministro mayores a 6 horas el consumo de agua no varía sustancialmente con el consumo en suministro continuo. Sin embargo, los periodos cortos pueden afectar a los hábitos usuales de la población e ir en detrimento de su calidad de vida; la cantidad de agua almacenada en periodos de suministro entre 1 a 1.5 horas cubre solamente las necesidades muy básicas (dotaciones entre 33.6 a 34.7 l/hab/d).

No es conveniente detener el suministro de agua por mucho tiempo, uno o más días (Soltanjilili et al., 2013). Unos pocos días de falta de suministro pueden ser suficientes para destruir el beneficio para la salud que constituye la provisión de agua potable; esta situación puede causar infecciones entre los niños (Hunter et al., 2009).

## 6.4. Teoría de grafos

Una red de suministro de agua potable, por sus características, puede ser modelada como un grafo. La metodología propuesta para la sectorización de redes con suministro intermitente se basa en la teoría de grafos; el fin es garantizar una configuración que permita asegurar la equidad en el suministro de agua.

Los grafos sirven como modelos matemáticos para analizar problemas concretos en la realidad (Balakrishnan & Ranganathan, 2012). Un grafo es una terna ordenada:

$$G = (V(G), E(G), I_G), \quad (6.1)$$

donde:

$V(G)$  = es un conjunto no vacío, cuyos elementos son denominados vértices (nudos o puntos) del grafo  $G$ .

$E(G)$  = es un conjunto cuyos elementos son denominados arcos (en grafos dirigidos) o aristas (en grafos no dirigidos) del grafo  $G$ .

$I_G$  = es una relación de incidencia que asocia cada elemento de  $E(G)$  con un par no ordenado (iguales o distintos) de  $V(G)$ .

Por ejemplo:

Si  $V(G) = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ ,  $E(G) = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$  e  $I_G$  está dado por  $I_G(e_1) = \{v_4, v_1\}$ ,  $I_G(e_2) = \{v_1, v_2\}$ ,  $I_G(e_3) = \{v_2, v_3\}$ ,  $I_G(e_4) = \{v_4, v_3\}$  y  $I_G(e_5) = \{v_2, v_4\}$ . Entonces  $(V(G), E(G), I_G)$  es un grafo.

Dependiendo del orden de los vértices en cada uno de los arcos o aristas, se tiene un grafo dirigido o no dirigido.

En un grafo dirigido, el orden de los vértices está definido, por lo tanto:

$$\{v_i, v_j\} \neq \{v_j, v_i\} \quad (6.2)$$

En un grafo no dirigido, el orden de los vértices no importa:

$$\{v_i, v_j\} \equiv \{v_j, v_i\} \quad (6.3)$$

$$\{v_i, v_j\} \in E(G) \Leftrightarrow \{v_j, v_i\} \in E(G). \quad (6.4)$$

### 6.4.1. Matriz de adyacencia

La matriz de adyacencia es una forma de representación matricial de un grafo. De esta forma, los grafos pueden ser introducidos de un modo más eficiente en distintos algoritmos (López Ortí, 2010).

$$\text{Sea } G = (V(G), E(G), I_G), \text{ con } |V(G)| = n. \quad (6.5)$$

La matriz de adyacencia  $A(G)$ , de tamaño  $n \times n$ , del grafo  $G$ , es definida por:

$$A(G) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad (6.6)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } \{v_i, v_j\} \in E(G) \\ 0 & \text{si } \{v_i, v_j\} \notin E(G) \end{cases}$$

En un grafo no dirigido, la matriz de adyacencia siempre es simétrica. En un grafo dirigido, la matriz de adyacencia no tiene por qué ser simétrica.

### 6.4.2. Camino más corto entre dos vértices

Uno de los problemas comunes en la teoría de grafos es la determinación del camino más corto entre dos puntos o vértices conocidos. Si se tiene un grafo ponderado  $G$ , es posible encontrar el camino más corto, que es el camino que tiene el menor peso entre los dos puntos o vértices especificados de  $G$  (Balakrishnan & Ranganathan, 2012).

Para el desarrollo de la presente metodología, es necesario establecer la diferencia entre los conjuntos organizados de vértices y aristas o arcos: una cadena es toda sucesión finita alterna de vértices y aristas (arcos); una cadena cerrada es toda cadena en la que los vértices inicial y final coinciden; un camino es toda cadena en la que no se repiten ni vértices ni aristas (arcos); un ciclo es toda cadena en la que no se repite ningún vértice ni arista (a excepción del vértice inicial y final), y se define como longitud de la cadena al número de aristas que la conforman.

### 6.4.3. Grafo ponderado

Un grafo  $G$  es ponderado, si cada arista  $(v_i, v_j)$  del grafo  $G$  tiene un valor asociado, un número no negativo  $w(v_i, v_j)$  denominado peso. Si  $P$  es un subgrafo de  $G$ , la suma de los pesos de las aristas de  $P$  es conocida como el peso de  $P$ . En un camino, la suma de pesos es denominada como peso del camino.

Un grafo ponderado, tiene asociada una matriz de pesos  $W$ , de orden  $n \times n$ , donde  $n = |V(G)|$ .

Cada uno de los elementos de la matriz  $W$  está definido por:

$$W_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{si } i = j \\ w(i, j) & \text{si } i \neq j \wedge \{v_i, v_j\} \in E(G) \\ \infty & \text{si } i \neq j \wedge \{v_i, v_j\} \notin E(G) \end{cases}. \quad (6.7)$$

### 6.4.4. Algoritmo de Dijkstra

Uno de los algoritmos más utilizados para la resolución del problema del camino más corto entre dos vértices de un grafo es el algoritmo de Dijkstra (1959).

Sea  $G$  es un grafo ponderado, con todos los pesos positivos, siendo  $s$  y  $t$  dos vértices específicos de  $G$ . Se quiere encontrar el camino desde  $s$  hasta  $t$  que implique el menor peso. Utilizando

la matriz de pesos  $W$  del grafo  $G$ , el algoritmo de Dijkstra asigna pesos a los vértices de  $G$ . En cada paso del algoritmo, algunos vértices tienen pesos permanentes y otros tienen pesos temporales.

Inicialmente, el vértice  $s$  tiene asignado un peso permanente 0, los otros vértices tienen pesos temporales  $\infty$ . En cada iteración un nuevo vértice es asignado con peso permanente en base a las siguientes reglas (Balakrishnan & Ranganathan, 2012):

**Regla 1:** Si  $v_j$  es un vértice que no tiene aún asignado un peso permanente, calculado para cada vértice  $v_i$ , que ya tiene asignado un peso permanente,

$$\alpha_{ij} = \min \{ \text{peso anterior de } v_j, (\text{peso anterior de } v_i) + w_{ij} \}$$

$$w_j = \min \alpha_{ij},$$

entonces  $w_j$  es el nuevo peso temporal de  $v_j$ , que no debe exceder el peso temporal anterior.

**Regla 2:** Determinar el valor más pequeño entre los  $w_j$  calculados. Si este corresponde a  $v_k$ ,  $w_k$  se convierte en el peso permanente de  $v_k$ . En caso de que existan aún aristas en cola, debe asignarse a otro vértice el peso permanente.

Por ejemplo, se busca el camino más corto entre  $A$  y  $F$  del grafo de la figura 6.2:

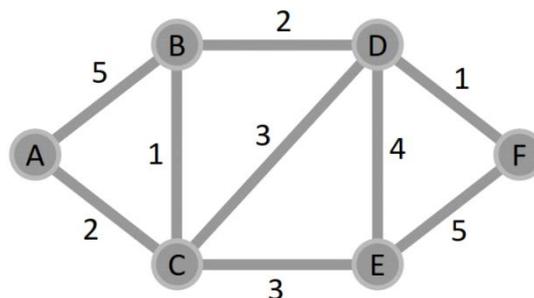


Fig. 6.2. Grafo ponderado para encontrar el camino más corto entre  $A$  y  $F$

Tabla 6.1. Pasos del algoritmo para encontrar el camino más corto entre  $A$  y  $F$

Paso	A	B	C	D	E	F
Iteración 0	0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
Iteración 1	0	5 A	2 A	$\infty$	$\infty$	$\infty$
Iteración 2	0	3 C	2 A	5 C	5 C	$\infty$
Iteración 3	0	3 C	2 A	5 C	5 C	$\infty$
Iteración 4	0	3 C	2 A	5 C	5 C	6 D
Iteración 5	0	3 C	2 A	5 C	5 C	6 D

Tras las iteraciones, el camino más corto entre los vértices  $A$  y  $F$  es  $A C D F$ , con un peso de 6.

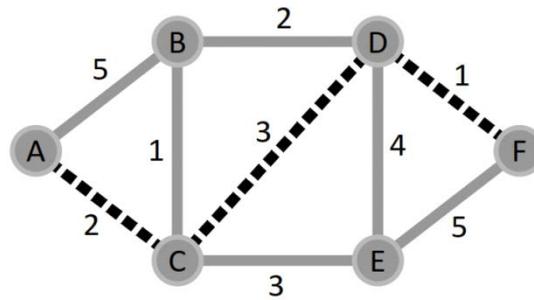


Fig. 6.3. Camino más corto entre A y F

### 6.4.5. Vecindad (neighborhood)

Otro concepto importante que será utilizado en el proceso de sectorización de la red es la vecindad de un vértice  $v$  en un grafo  $G$ , la cual está denotada por  $N(v)$ ; es el conjunto de vértices adyacentes a  $v$  (Harris et al., 2008):

$$N(v) = \{x \in V(G) \mid \{v, x\} \in E(G)\}. \quad (6.8)$$

## 6.5. Análisis Clúster

El análisis clúster o de conglomerados es una técnica importante en la exploración de datos; permite organizar los datos en agrupamientos individuales o como grupos jerárquicos. En principio, se desconoce la asignación correcta de los datos a los grupos, por lo que el análisis clúster forma parte de las técnicas de aprendizaje no supervisado (Jain, 1988), (Rokach & Maimon, 2005), (Rivera, 2014).

El objetivo del análisis clúster es encontrar una organización válida y conveniente de los datos, no establecer reglas para la separación de datos futuros en categorías. El problema principal en la identificación de clústeres entre los datos es la determinación de la proximidad y su medición (Jain, 1988).

Formalmente, la estructura del agrupamiento es representada como un conjunto de subconjuntos  $C_i$  (Rokach & Maimon, 2005),

$$C = C_1, \dots, C_q, \quad (6.9)$$

$$D = \bigcup_{i=1}^q C_i, \quad (6.10)$$

$$C_i \cap C_j = \emptyset \text{ para } i \neq j,$$

donde:

$C$  = subconjunto de datos,

$q$  = número total de subconjuntos.

Consecuentemente, cualquier elemento de  $D$  pertenece a un subconjunto.

Existen varios métodos para determinar los clústeres; en la siguiente tabla se detallan los métodos más usuales (Han et al., 2012). Algunos algoritmos integran ideas de muchos métodos, por lo que es difícil su clasificación en una sola categoría.

Tabla 6.2. Características generales de los métodos de análisis clúster

Método	Características generales
Métodos de partición	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Encuentra clústeres mutuamente excluyentes de forma esférica.</li> <li>- Basado en la distancia.</li> <li>- Puede usar la media, moda, etc., para representar el centro del clúster.</li> <li>- Es efectivo para pequeñas a medianas cantidades de datos.</li> </ul>
Métodos jerárquicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El agrupamiento es jerárquico, tiene niveles múltiples.</li> <li>- No pueden corregir fusiones o divisiones erróneas.</li> <li>- Puede incorporar otras técnicas como <i>microclustering</i> o considerar objetos <i>linkages</i>.</li> </ul>
Métodos basados en la densidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede encontrar clústeres de forma arbitraria.</li> <li>- Los clústeres son regiones densas de objetos en el espacio que son separadas por regiones de baja densidad.</li> <li>- Densidad de clúster: cada punto debe tener un número mínimo de puntos entre su <i>neighborhood</i>.</li> <li>- Puede filtrar <i>outliers</i>.</li> </ul>
Métodos basados en la grilla o cuadrícula	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Usa una estructura de datos de grilla de multiresolución.</li> <li>- Procesamiento rápido (típicamente independiente del número de objetos, todavía depende del tamaño de la grilla).</li> </ul>

Fuente: Han et al.(2012)

En el análisis no jerárquico se asigna de antemano el número de conglomerados que se quiere tener; el objetivo es conseguir una clasificación por grupos en la cual la dispersión sea la menor posible. Esta condición se denomina “criterio de varianza”, con la cual se logra configurar un clúster donde la suma de varianzas es la mínima. El algoritmo más conocido es *k-means*.

### 6.5.1. Medidas de distancia

Para determinar el agrupamiento de elementos similares es necesario algún tipo de medida que determine si éstos son similares o diferentes. Existen dos formas básicas de calcular esta relación: a través de medidas de distancia o mediante medidas de similitud. Muchos métodos de agrupamiento usan mediciones de distancia para determinar el grado de similitud (Rokach & Maimon, 2005).

Esta distancia es denominada distancia métrica si cumple con:

Desigualdad triangular:

$$d(x_i, x_k) \leq d(x_i, x_j) + d(x_j, x_k) \quad \forall x_i, x_j, x_k \in S, \quad (6.11)$$

$$d(x_i, x_j) = 0 \Rightarrow x_i = x_j \quad \forall x_i, x_j \in S. \quad (6.12)$$

Tomando dos individuos con un número  $p$  de variables:

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}) \text{ y } x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp}) \quad (6.13)$$

la distancia entre ambos individuos puede ser calculada usando la distancia de Minkowski (Han et al., 2012):

$$d(x_i, x_j) = \left( |x_{i1} - x_{j1}|^r + |x_{i2} - x_{j2}|^r + \dots + |x_{ip} - x_{jp}|^r \right)^{1/r}. \quad (6.14)$$

La distancia euclídea, que es la más común, considera el uso de  $r = 2$ :

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{m=1}^p (x_{im} - x_{jm})^2}. \quad (6.15)$$

Si  $r = 1$ , entonces se tiene la distancia Manhattan:

$$d(x_i, x_j) = \sum_{m=1}^p |x_{im} - x_{jm}|. \quad (6.16)$$

Si es necesario asignar a cada una de las variables un peso, esto puede realizarse a través de la siguiente configuración:

$$d(x_i, x_j) = \left( w_1 \cdot |x_{i1} - x_{j1}|^r + w_2 \cdot |x_{i2} - x_{j2}|^r + \dots + w_p \cdot |x_{ip} - x_{jp}|^r \right)^{1/r}, \quad (6.17)$$

$$\sum_{m=1}^p w_m = 1, \quad (6.18)$$

donde:

$w_m$  = peso de la variable  $m$ ,

$p$  = número total de variables.

## 6.5.2. Centroide

Conceptualmente, el centroide de un clúster es su punto central (Han et al., 2012). El centroide puede ser representado de muchas formas, aunque la más usual es la media:

$$\mu_c = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} x_i, \quad (6.19)$$

donde:

$\mu_c$  = media del clúster  $c$ ,

$N_c$  = número de individuos pertenecientes al clúster  $c$ .

## 6.6. Equidad del suministro

La diferencia entre los enfoques de diseño de los sistemas con suministro continuo y los sistemas con suministro intermitente radica en la incorporación de la equidad como criterio de diseño (Vairavamoorthy et al., 2001), (Gottipati & Nanduri, 2014), buscando lograr una distribución más justa de la cantidad limitada de agua en las pocas horas de suministro.

Uno de los componentes más importantes de los sistemas con suministro intermitente, que impone las condiciones necesarias para lograr un suministro equitativo, es la red de distribución. Debe tomarse en cuenta también las posibilidades de almacenamiento de los usuarios, pues cuanto mayor capacidad de almacenamiento tengan los usuarios existirá mayor inequidad (Gottipati & Nanduri, 2014), causada por el derroche de agua que se puede producir en las zonas con mayor presión.

Varios investigadores sugieren la medición de la equidad a través de diferentes criterios, tales como: altura piezométrica mínima excedente, altura piezométrica total excedente, índice de resiliencia (Chandapillai et al., 2012), (Gottipati & Nanduri, 2014). En un sistema con suministro intermitente que trabaja por bombeo, ubicado en Bangalore (India), se busca lograr equidad en el suministro a través del uso de controladores DI-PID en la operación de los equipos de bombeo (Manohar & Kumar, 2014).

Otra forma de controlar el problema de la equidad del suministro es a través de la restricción del exceso en la variación de presiones entre los nudos; se recomienda que la diferencia se encuentre en un rango entre 3 a 5 mca (Central Public Health and Environmental Engineering Organisation, 2005).

Gottipati et al. (2014) sugieren el uso del coeficiente de uniformidad (*CU*) para medir la equidad del suministro.

El coeficiente de uniformidad está definido como:

$$CU = 1 - \left( \frac{ADEV}{ASR} \right), \quad (6.20)$$

donde:

*ASR* = promedio de la relación de suministro (*Average supply ratio*),

*ADEV* = promedio de la desviación de la relación de suministro (*Average Deviation*).

El coeficiente de uniformidad debe ser medido bajo el criterio PDD, pues se compara el caudal o volumen suministrado y el volumen demandado. Cuando la demanda es satisfecha en todos los nudos, el coeficiente de uniformidad tiene un valor igual a uno. Sin embargo, debe tomarse en cuenta que, en condiciones de suministro intermitente, no es posible lograr el total de la demanda (Gottipati & Nanduri, 2014).

Si la simulación y el diseño se realizan en DDA, el criterio más conveniente para evaluar la equidad de suministro es a través de la diferencia de presiones. Es importante considerar que en un análisis en DDA las presiones son calculadas para cubrir el total de la demanda de los nudos, estableciendo valores extremos de presión; por lo tanto, para el planteamiento de sectores que inicialmente tendrán suministro intermitente y posteriormente continuo puede usarse DDA.

## 6.7. Evaluación de sectores en suministro intermitente

Cuando ya existen los sectores en la red con suministro intermitente, estos deben ser evaluados bajo dos perspectivas: establecer el tipo de mejoras que se deben considerar manteniendo el suministro intermitente, o para definir su grado de equidad y sus posibilidades para convertirse en sectores que tengan suministro continuo en un proceso de transición gradual.

En el proceso de evaluación de los sectores se analiza si éstos tienen la suficiente capacidad y si son capaces de lograr un suministro equitativo. Según el tipo de deficiencia del sector, se establecen las medidas de mejora. En el siguiente diagrama de flujo se establece el proceso de evaluación:

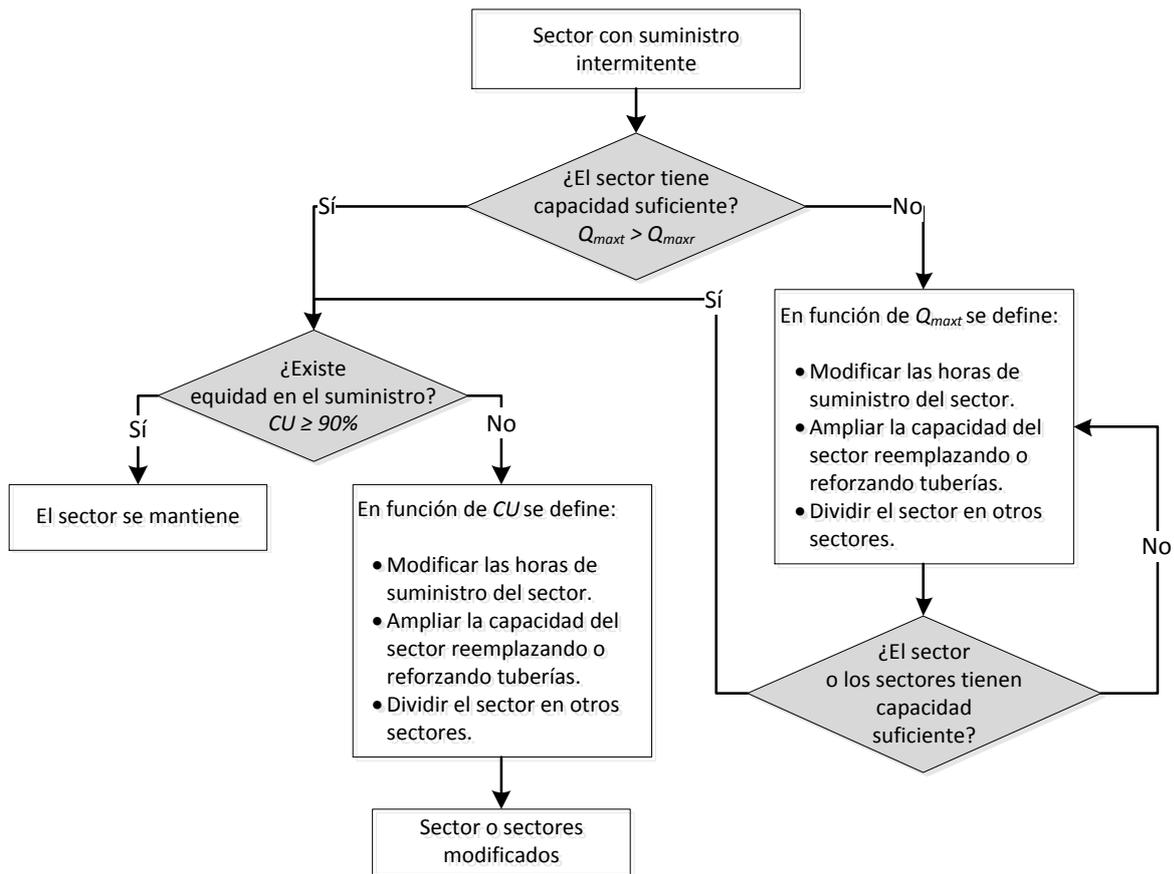


Fig. 6.4. Diagrama de flujo para evaluar los sectores en sistemas con suministro intermitente

En los siguientes acápite, se desarrollan las modificaciones que deben realizarse en la infraestructura o gestión del sector con el fin de mejorar su capacidad o la equidad en el suministro.

En este capítulo, se analizan por separado la capacidad del sector y la uniformidad que permite medir la equidad en el suministro. En el capítulo 9, se propone un indicador para medir la equidad de suministro que evalúa ambos criterios. Es necesario considerar que la capacidad del sector por sí sola no garantiza la equidad en el suministro, ni un valor elevado de uniformidad en el suministro garantiza las condiciones necesarias para un buen servicio.

### 6.7.1. Evaluación de la capacidad del sector

La evaluación de los sectores comienza con la determinación de su capacidad; se calcula el caudal máximo teórico para el sector con las condiciones de contorno de: presión mínima en los nudos de consumo y la altura piezométrica del nudo de ingreso de agua al sector. Este valor es base para definir las acciones a seguir para mejorar el estado del servicio en el sector.

Como se trata de sectores que suministran agua por horas, el caudal máximo teórico debe ser comparado con el caudal medio del periodo de suministro ( $Q_{int}$ ); esta comparación permite establecer la falta o no de capacidad del sector bajo las condiciones de servicio actuales:

$$Q_{int} = \left( \frac{24}{t} \right) \cdot Q_m, \quad (6.21)$$

donde:

$t$  = tiempo de suministro por día, en horas;

$Q_m$  = caudal medio diario.

Cuando el caudal máximo teórico es superior al caudal medio del periodo de suministro, se puede afirmar que el sector tiene la suficiente capacidad para cubrir la demanda de los usuarios en unas condiciones de suministro intermitente con presión superiores al valor mínimo considerado. Este requisito es suficiente para pasar al siguiente nivel, la evaluación de la equidad del suministro.

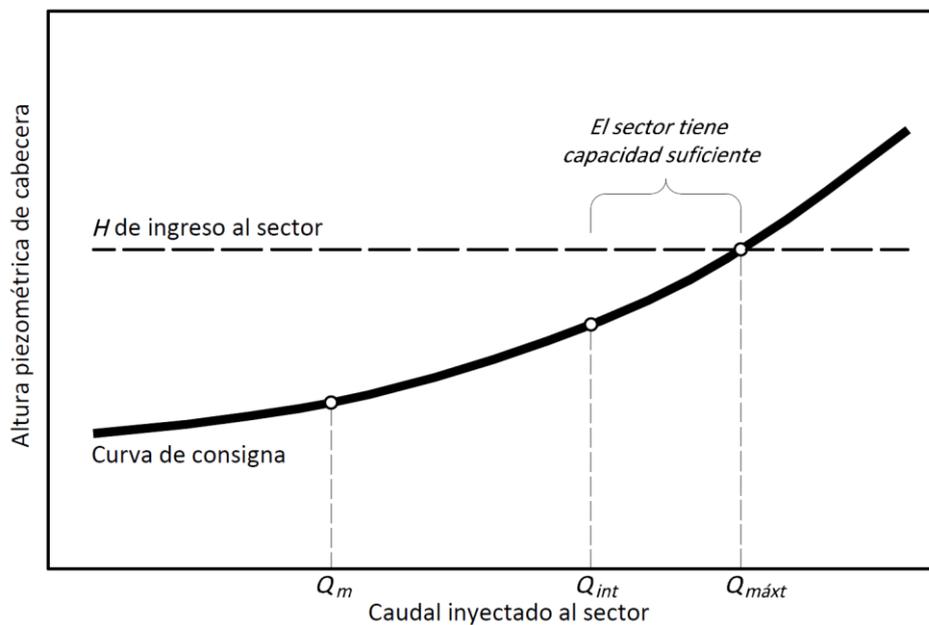


Fig. 6.5. Sector con capacidad suficiente

Si el caudal máximo teórico es inferior al caudal medio del periodo de suministro, se tiene un sector que no es capaz de cumplir con los requisitos mínimos de presión para la demanda general de los usuarios en las horas de abastecimiento. En este escenario se presentarán quejas por falta de presión y caudal en algunos puntos del sector.

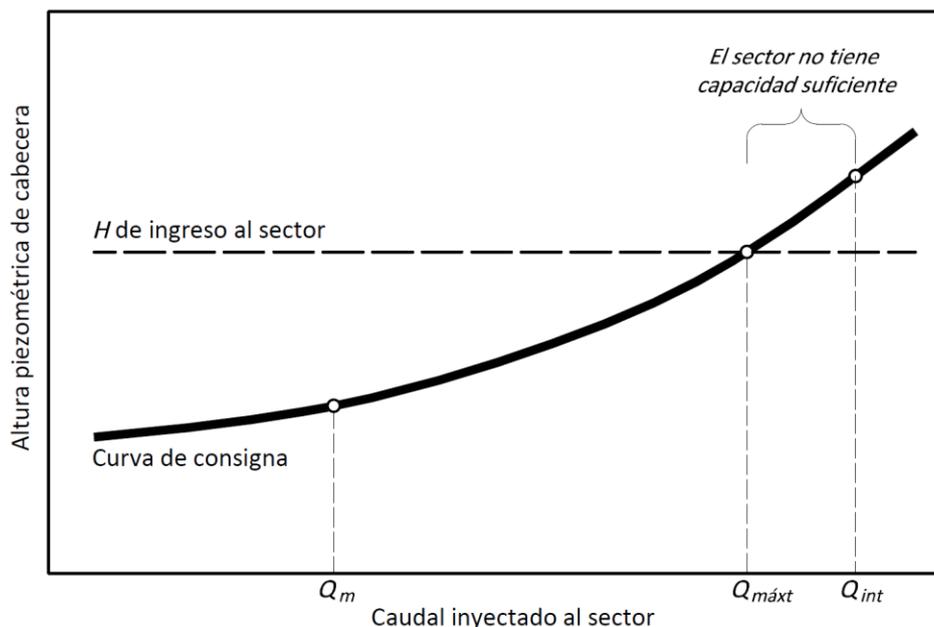


Fig. 6.6. Sector con capacidad insuficiente

Existen dos formas de acción para mejorar la capacidad del sector: las acciones externas, que toman en cuenta modificaciones en la red principal que incidan en la mejora de la presión de ingreso al sector, lo cual permite incrementar su capacidad; las acciones internas, que se refieren a modificaciones en la infraestructura o gestión de los sectores, independientemente de las mejoras en la presión de la red que puedan darse. En este capítulo no se analizan las acciones externas al sector; este análisis se realiza en el capítulo 8.

Como acciones internas para mejorar esta situación, se proponen tres tareas básicas:

- a) Modificación del tiempo de suministro.
- b) Ampliación de la capacidad del sector.
- c) División del sector.

En base a la relación del caudal medio del periodo de suministro y el caudal máximo teórico, se proponen rangos con acciones que buscan reducir esta diferencia.

Tabla 6.3. Acciones a seguir en función de la capacidad del sector

$Q_{int}/Q_{máxt}$	Acciones
$\leq 1.0$	El sector tiene capacidad suficiente para las condiciones de suministro actuales: el sector se mantiene.
1.0 – 1.2	Para reducir el caudal suministrado y ajustarse a la capacidad del sector, se debe modificar el tiempo de suministro del sector. En sectores que tienen menos de 4 h de suministro, el periodo de suministro puede incrementarse 1 h sin considerar la relación $Q_{int}/Q_{máxt}$ . Este tipo de mejoras debe considerar una evaluación posterior de la equidad del suministro.
$> 1.2$	Existen dos opciones; debe seleccionarse la más económica: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Dividir el sector; el nuevo sector debe tener otro horario de suministro. Puede requerir adicionalmente procesos de ampliación del sector.</li> <li>– Para mantener la configuración del sector, se buscará la ampliación de la capacidad del sector.</li> </ul>

### 6.7.1.1. Modificación del tiempo de suministro

La forma más sencilla de ajustar el caudal medio del periodo de suministro al caudal máximo teórico en suministro intermitente es a través de la modificación del tiempo de suministro. La ampliación del periodo de suministro reducirá el caudal medio del periodo de suministro, en el entendido de que se suministrará el mismo volumen diario.

Sin embargo, esta práctica no puede llevarse a cabo de forma extensa, pues ampliar las horas de suministro en todos los sectores puede llevar a incrementar el caudal pico del sistema, reduciendo de forma global las condiciones de servicio; por lo tanto, la modificación del tiempo de suministro debe ser aplicada de forma prudente, analizando la implicancia que pueda tener en la hidráulica de los otros sectores y del sistema.

De esta forma, la modificación de horas de suministro puede darse cuando exista poco margen para ajustarse al caudal máximo teórico.

La relación que permite modificar el tiempo de suministro en base a la capacidad del sector es:

$$t_{\min} = \frac{24 \cdot Q_m}{Q_{\max}} \quad \text{o} \quad t_{\min} = \frac{N \cdot Q_{\text{int}}}{Q_{\max}}, \quad (6.22)$$

donde:

$t_{\min}$  = tiempo de suministro mínimo para el sector, en horas;

$N$  = tiempo de suministro actual del sector, en horas;

$Q_m$  = caudal medio diario, en l/s;

$Q_{\text{int}}$  = caudal medio del periodo de suministro, en l/s;

$Q_m$  = caudal medio diario, en l/s;

$Q_{\max}$  = caudal máximo teórico, en l/s.

Evaluando diferentes incrementos del periodo de suministro y su relación con el cociente entre el caudal medio de suministro intermitente y el caudal máximo teórico, se adopta como valor límite  $Q_{\text{int}}/Q_{\max} = 1.2$ ; de esta forma se limita un crecimiento excesivo de los periodos de suministro que perjudiquen al sistema. En el caso de los sectores que tengan menos de cuatro horas de suministro, se considera que estos pueden ampliarse adicionalmente una hora, por lo que en estos casos no debe tomarse en cuenta la relación  $Q_{\text{int}}/Q_{\max}$ .

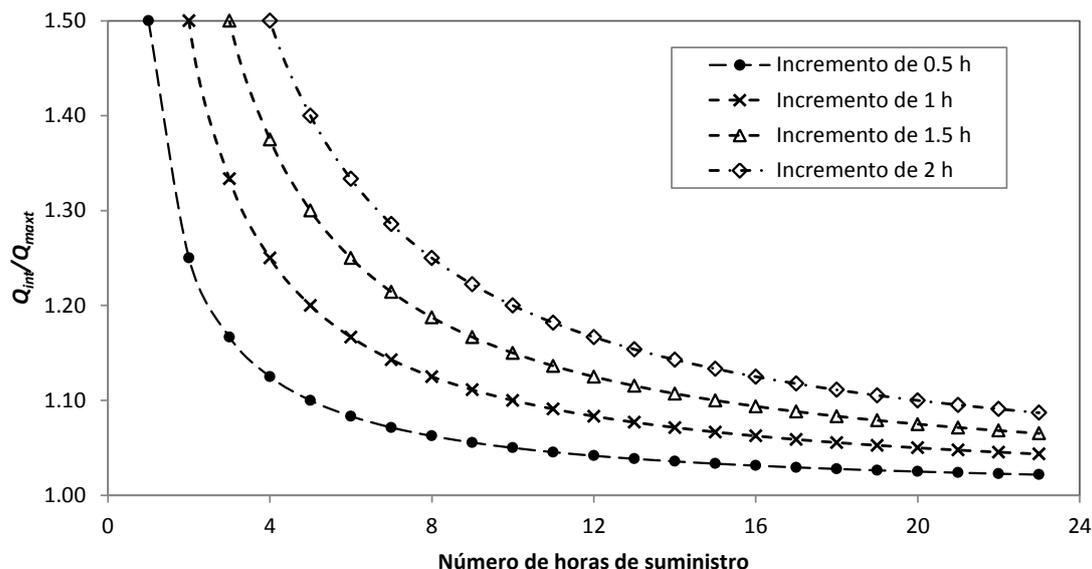


Fig. 6.7. Relación del número de horas incrementales y la relación de caudales  $Q_{inf}/Q_{máx}$

El tiempo de suministro, calculado de esta forma, permite una mejor planificación de la gestión del sistema con suministro intermitente; de esta forma, los periodos de suministro son calculados en base a criterios hidráulicos.

### 6.7.1.2. Ampliación de la capacidad del sector

Al igual que en la ampliación de la red, una opción para cubrir el caudal medio de suministro intermitente del sector, es por medio de la renovación o refuerzo de algunos tramos del sector.

La modificación del sector debe ser un proceso que permita incrementar el caudal máximo teórico al menor coste, por lo que se propone el uso del índice de ampliación  $q$  propuesto en el capítulo 8 para el proceso de ampliación de la capacidad de la red. De esta forma, se garantiza que se modificará aquel tramo que garantice un mayor incremento de la capacidad del sector al menor coste.

### 6.7.1.3. División del sector

La división del sector es la tercera alternativa de acción interna. Cuando el caudal máximo teórico es superado ampliamente, es mejor dividir la red, de esta forma se configuran nuevos subsectores que generan nuevas curvas de consigna y, en consecuencia, nuevos caudales máximos teóricos, los cuales deben ser superiores a los valores de caudal demandado por cada subsector resultado de la división.

Los nuevos subsectores deben tener la capacidad suficiente; debe considerarse también, que el horario de suministro tiene que ser diferente; no debe existir superposición de horas de suministro entre los subsectores, pues, en caso de existir horarios simultáneos de varios sectores, el problema seguiría y la división en subsectores no tendría sentido.

## 6.7.2. Evaluación de la Uniformidad en el suministro

Cuando el problema de la capacidad del sector es resuelto, debe analizarse la equidad del suministro. Para este fin, se usa el coeficiente de uniformidad resultado de la relación entre el caudal suministrado y el caudal demandado en cada uno de los nudos, este coeficiente es parte fundamental del índice de equidad propuesto en el *capítulo 9*.

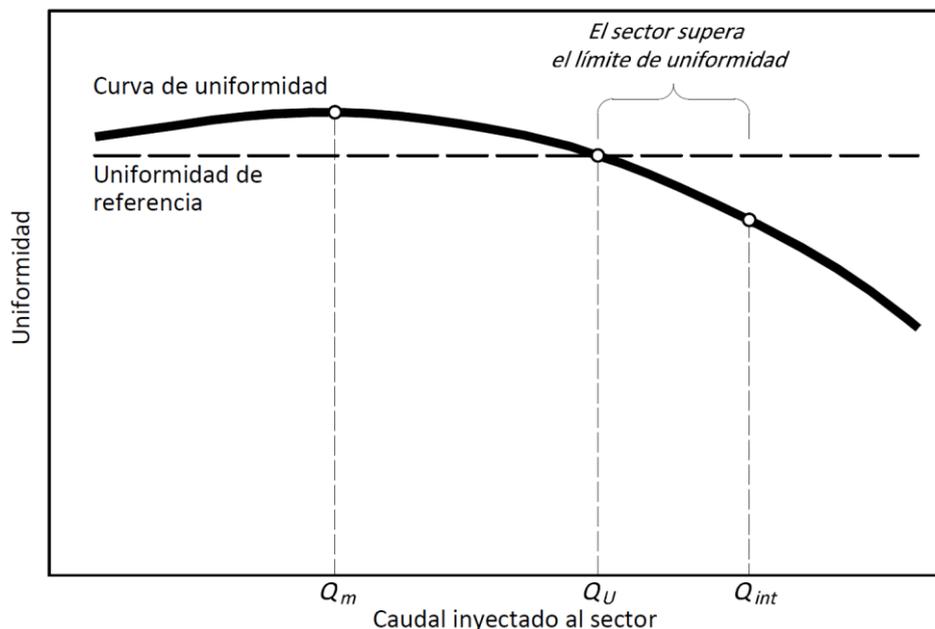


Fig. 6.8. Variación de la uniformidad en función del caudal inyectado al sector

La influencia externa, ejercida por las modificaciones en la presión de ingreso al sector, no es tan determinante en la determinación del coeficiente de uniformidad del sector. El elemento que genera variaciones en la uniformidad es el caudal suministrado al sector.

Cuando el caudal suministrado es pequeño, el coeficiente de uniformidad del suministro es alto, debido a la menor pérdida de energía que se produce en el sector, lo cual genera una menor diferencia entre los nudos que tienen mayor presión y los de menor presión. A medida que el caudal demandado crece, los nudos favorables, aquellos que tienen mayor presión, pueden ser suministrados con una mayor cantidad de agua; incluso, en estos nudos puede generarse derroche de agua si no existe medición. La mayor demanda genera gran reducción de la energía disponible en los nudos desfavorables; incluso, existe el riesgo que éstos puedan quedar desabastecidos; en este escenario, el coeficiente de uniformidad tiende a reducirse.

Al igual que el caudal máximo teórico es un referente de la capacidad de la red o el sector, existe un caudal máximo inyectado al sector que garantiza un coeficiente de uniformidad de referencia para un suministro equitativo ( $Q_U$ ). Este caudal es base para el planteamiento de las mejoras en la uniformidad o equidad del suministro.

Los niveles de uniformidad superiores al 90% garantizan un suministro equitativo en el sector; con este valor, es posible determinar el caudal máximo que asegure ese nivel de uniformidad; si el caudal medio del periodo de suministro del sector es superior debe corregirse a través de:

- Modificación del tiempo de suministro.
- Ampliación de la capacidad del sector.
- División del sector.

Las acciones a seguir en función de la uniformidad del suministro, cuando se garantiza la capacidad del sector, son:

Tabla 6.4. Acciones a seguir en función del Coeficiente de Uniformidad del sector

Coeficiente de Uniformidad	Acciones
$\geq 90\%$	El nivel de uniformidad garantiza la equidad del suministro: el sector se mantiene.
85% - 90%	Para reducir el caudal suministrado y ajustarse al caudal que garantiza el nivel de equidad deseado, se modifica el tiempo de suministro del sector.
	Existen dos opciones; debe seleccionarse la más económica:
$\leq 85\%$	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Para mantener la configuración del sector, se busca la ampliación de la capacidad del sector.</li> <li>— Dividir el sector: el nuevo sector debe tener otro horario de suministro. Puede requerir adicionalmente procesos de ampliación del sector.</li> </ul>

### 6.7.2.1. Modificación del tiempo de suministro

Si el caudal medio del periodo de suministro es levemente superior al caudal máximo que asegure un nivel de uniformidad deseado, el incremento del tiempo de suministro puede reducir el caudal y, en consecuencia, incrementar la uniformidad del suministro. Es recomendable esta modificación en la gestión del servicio, ya que esta no implica costes adicionales; aunque, al igual que en la ampliación de la capacidad del sector, el tiempo incrementado debe ser pequeño; asimismo, la ampliación del periodo de suministro, en lo posible, no debe superponerse a los horarios de los otros sectores, evitando altos niveles de simultaneidad entre los sectores.

La relación que permite ajustar el tiempo para un nivel de uniformidad adecuado es la siguiente:

$$t_{\min U} = \frac{24 \cdot Q_m}{Q_U} \text{ o } t_{\min U} = \frac{N \cdot Q_{int}}{Q_U}, \quad (6.23)$$

donde:

$t_{\min U}$  = tiempo de suministro mínimo para el sector que asegura el nivel de uniformidad deseado, en horas;

$N$  = tiempo de suministro actual del sector, en horas;

$Q_m$  = caudal medio diario, en l/s;

$Q_{int}$  = caudal medio del periodo de suministro, en l/s;

$Q_m$  = caudal medio diario, en l/s;

$Q_U$  = caudal máximo que asegura el nivel de uniformidad deseado (l/s).

También cabe la posibilidad de que el caudal medio del periodo de suministro resulte menor que el caudal máximo que asegure el nivel de uniformidad deseado; en este caso, correspondería una modificación del tiempo de suministro: su reducción; sin embargo, el tiempo no debería ser menor al tiempo de llenado del depósito del punto más lejano o más desfavorable (De Marchis et al., 2010).

### **6.7.2.2. Ampliación de la capacidad del sector**

Aunque la ampliación de la capacidad del sector es una opción previa ya analizada, si aún no se cumple con los niveles deseados de uniformidad, la ampliación del sector es una alternativa de acción que permitirá mejorar la equidad del servicio, pues la mejora de la presión de servicio en los nudos desfavorables permitirá reducir la diferencia entre los caudales de suministro del sector.

Es conveniente ampliar la capacidad del sector antes que optar por su división, debido a que la primera opción no modifica las horas de suministro entre los usuarios; sin embargo, la división del sector requerirá modificar el horario de suministro del nuevo subsector.

### **6.7.2.3. División del sector**

Otra alternativa para mejorar la equidad del suministro en un sector, cuando la uniformidad es bastante baja, es la división del sector; de esta forma se podrán separar los nudos con características de suministro diferentes, causantes de la reducción de la equidad.

La configuración de un nuevo sector requerirá la asignación de un nuevo periodo de suministro, el cual no debe perjudicar al funcionamiento hidráulico global del sistema; se debe evitar la posibilidad de la simultaneidad de muchos sectores, lo cual puede causar caudales pico grandes.

Cuando el caudal medio del periodo de suministro del sector es inferior a los caudales que limitan la capacidad y el suministro con una equidad razonable, el sector no será modificado. Bajo este escenario se tiene un sector que tiene un tamaño adecuado con la cantidad de usuarios y el número de horas que permite un suministro razonablemente equitativo. Aunque, existe la posibilidad de modificar el periodo de suministro, pues existirá un margen adicional en estas condiciones que permitirá reducir el tiempo de suministro.

En el caso de reducir las horas de suministro, debe analizarse la cantidad de usuarios que no cuentan con posibilidades de almacenamiento de agua, personas con pocos recursos económicos que consumen agua solo en las horas de suministro y tienen poca capacidad de almacenamiento de agua.

## **6.8. Proceso de sectorización de redes con suministro intermitente**

Si una red sin sectores con suministro intermitente tiene condiciones de servicio deficientes, el primer paso para mejorar el servicio, en condiciones de intermitencia, es la sectorización. Existen sistemas de suministro de agua alrededor del mundo que no tienen posibilidades de lograr el suministro continuo, por lo tanto el suministro intermitente es su realidad a la que deben plantearse soluciones; la sectorización de la red debe garantizar por lo menos equidad en el suministro de la poca cantidad de agua disponible.

Para el proceso de sectorización o división de sectores, se requiere verificar la condición de tener el caudal máximo teórico de la red ( $Q_{máx}$ ), caudal mayor al caudal medio diario demandado por la población ( $Q_m$ ), calculado en condiciones de suministro continuo. Si no se cumple esta condición, no debe procederse con la sectorización, por lo que es necesario primero ampliar la capacidad de la red

hasta tener una capacidad superior al caudal medio diario. Para la ampliación de la capacidad de la red, puede recurrirse a la reducción de la presión mínima requerida en los nudos, o pueden modificarse tramos de la red ampliando su capacidad hasta conseguir el caudal medio; una vez alcanzado este objetivo es cuando se debe proceder a la sectorización o división.

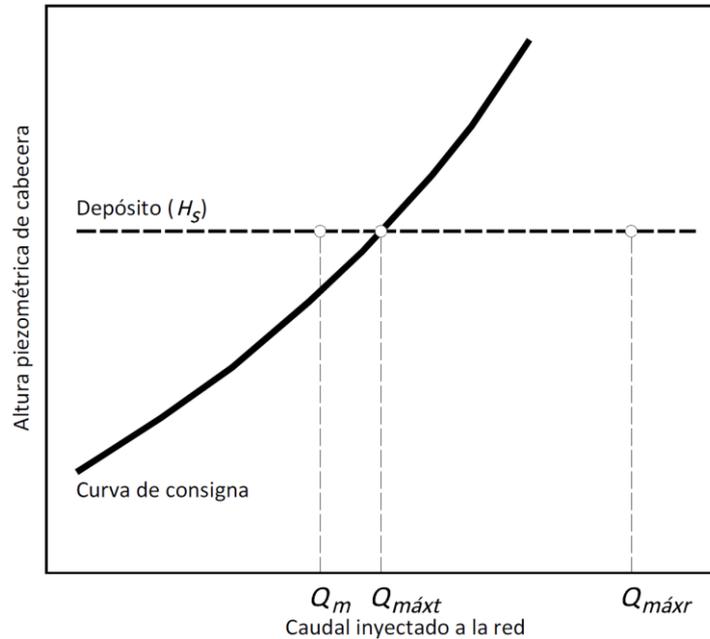


Fig. 6.9. Para un proceso de sectorización, el caudal medio diario debe ser menor al caudal máximo teórico

La sectorización en un sistema con suministro intermitente es diferente a la sectorización en un sistema con suministro continuo. Debe considerarse que, además de contar con la presión suficiente, el suministro debe ser equitativo. Una buena sectorización para un sistema con suministro intermitente debe ser capaz de definir la cantidad de horas de suministro y el tamaño ideal del sector garantizando los dos objetivos mencionados.

El procedimiento propuesto en el siguiente diagrama de flujo permite realizar la sectorización ideal para una red con suministro intermitente, y es útil, también, para la división de sectores en el proceso de mejora del sistema.

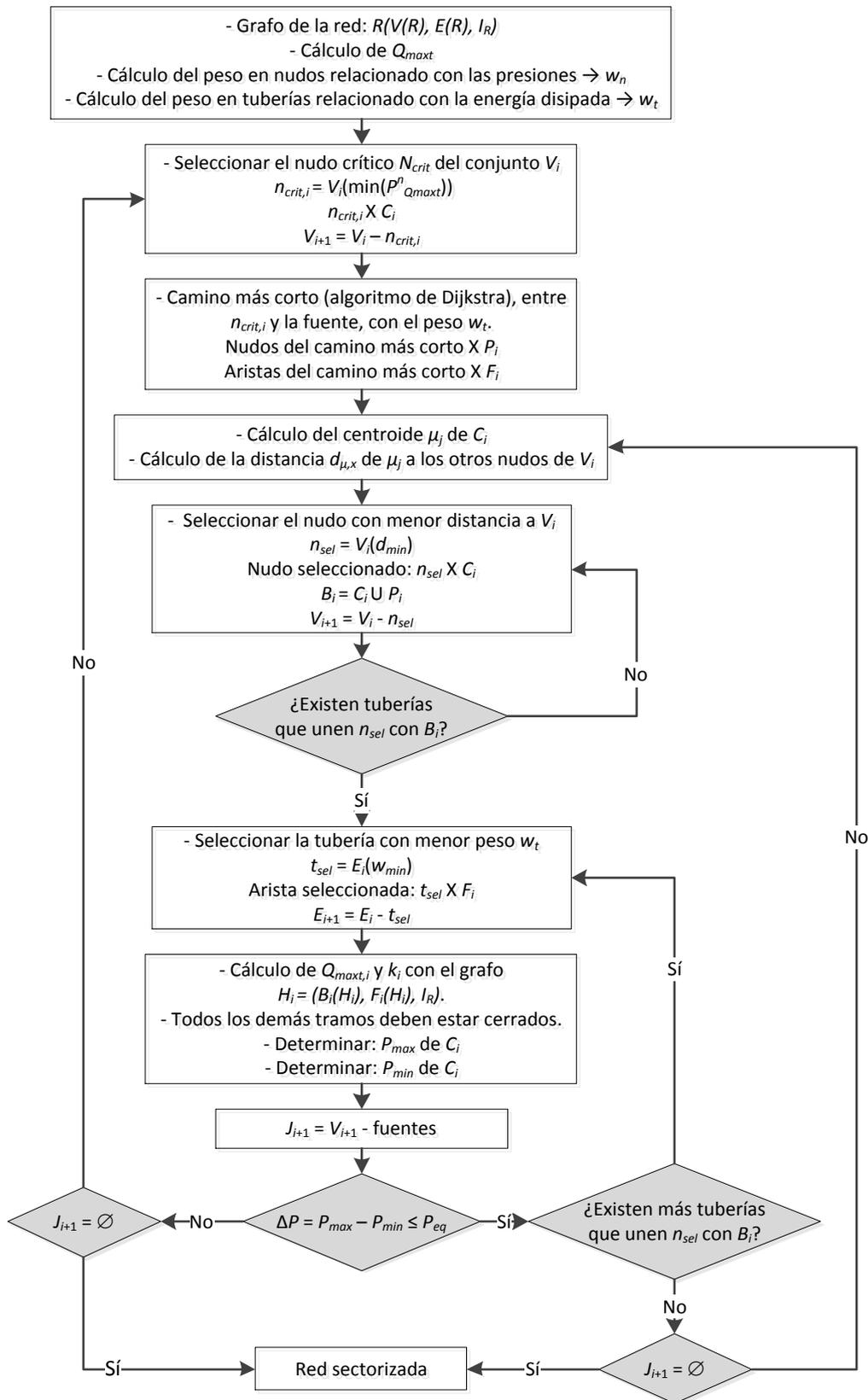


Fig. 6.10. Diagrama de flujo para la sectorización de redes con suministro intermitente o la división de sectores

Para la sectorización de una red, o la división de un sector, en suministro intermitente, se parte de una primera configuración en la cual se tiene a la red o sector completo tras la primera simulación

hidráulica; a partir del peso que representan las presiones en los nudos y la disipación de la energía en las tuberías, es posible trabajar con la red como un grafo no dirigido ponderado.

Las presiones en los nudos permiten identificar al nudo crítico de la red; con este origen y con destino la fuente de suministro, se calcula el camino más corto entre ambos puntos, tomando en cuenta la disipación de la energía. Este paso es fundamental para la identificación de cada sector, pues cada uno tendrá un camino más corto inicial.

El nudo crítico se constituye en el centroide inicial del clúster o sector; se debe seleccionar el siguiente nudo, el cual será condicionado a tener la menor distancia y estar conectado al clúster mediante una arista (tubería). Con este nuevo nudo se calcula el caudal máximo teórico y las presiones correspondientes; la selección de cada nudo reconfigura el clúster por lo que es necesario recalcularse el centroide nuevamente. El proceso de conglomerado de nudos concluye cuando la diferencia de presiones supera un valor límite, el cual garantiza la equidad del suministro; si existen más nudos sin asignación, se debe comenzar con otro sector. Este procedimiento debe repetirse, generando varios clústeres, hasta que todos los nudos estén asignados a un sector.

Existe un carácter dinámico en la consecución de los clústeres, pues cada uno de ellos es verificado calculando la diferencia de presiones, un valor que cambia según una nueva topología del sector cuando se incorpora un nuevo nudo o un nuevo tramo. De esta forma, se logra configurar cada uno de los sectores, definiendo la cantidad de horas de suministro en función de su tamaño, capacidad y la equidad deseada.

En los siguientes acápites, se desarrolla de forma extensa cada uno de los pasos del procedimiento.

### 6.8.1. Red o sector inicial

La red o sector inicial, está configurada por un grafo no dirigido:

$$R = (V(R), E(R), I_R), \quad (6.24)$$

donde:

$V(R)$  = es el conjunto de nudos de la red o grafo  $R$ .

$E(R)$  = es un conjunto disjunto de  $V(R)$  que contiene a las tuberías de la red o grafo  $R$ .

$I_R$  = es una relación de incidencia que asocia con cada elemento de  $E(R)$  con un par no ordenado (distintos) de  $V(R)$ .

Bajo esta configuración, se calcula el caudal máximo teórico inicial, porque este escenario define un estado de carga en el cual las tuberías estarán sometidas a su exigencia máxima para cumplir con los requisitos de presión mínima en los nudos. Este escenario sirve de base para la determinación de los pesos fijos en los nudos, relacionados con la presión, y en las tuberías, relacionados con la disipación de la energía en cada tramo.

Se calculan las presiones en todos los nudos de la red, valores que servirán de referencia para definir los nudos críticos para cada proceso de agrupamiento.

$$w_n = P_{Qmax}^n, \quad (6.25)$$

donde:

$w_n$  = peso del nudo  $n$ , relacionado con la presión,

$P_{Q_{max}^n}$  = presión de servicio en el nudo  $n$ , cuando la red trabaja con el caudal máximo teórico.

En las tuberías, los caudales y las pérdidas de carga correspondientes, son calculados con el estado de carga del caudal máximo teórico.

La potencia (energía por unidad de tiempo) disipada (Todini, 2000), en cada uno de los tramos de la red, es denotada por:

$$P_t = \gamma \cdot |Q_t| \cdot h_t, \quad (6.26)$$

donde:

$P_t$  = potencia disipada en el tramo  $t$ ,

$\gamma$  = peso específico del agua,

$Q_t$  = caudal que circula por el tramo  $t$ ,

$h_t$  = pérdida de carga producida en el tramo  $t$ .

Como se busca dar un peso a las tuberías que permita identificar a los tramos que pierden menos energía, es necesario que ese peso se calcule como:

$$w_t = \frac{1}{\gamma \cdot |Q_t| \cdot h_t}, \quad (6.27)$$

donde:

$w_t$  = peso relacionado con la energía asociada al tramo  $t$ .

### 6.8.2. Identificación del nudo crítico

Para comenzar con la sectorización, debe encontrarse el nudo crítico de la red o sector; aquel nudo que presenta la menor presión de suministro, en base al caudal máximo teórico ya definido en el anterior acápite. Esta consideración se debe también, a la posibilidad de la existencia de más de un nudo crítico, pues el incremento de caudal en los nudos puede generar que un nudo, que en principio no era considerado como crítico, pueda llegar a serlo debido al incremento de las pérdidas de carga para llegar a él, con caudales grandes. En la siguiente figura se ilustra mejor lo descrito.

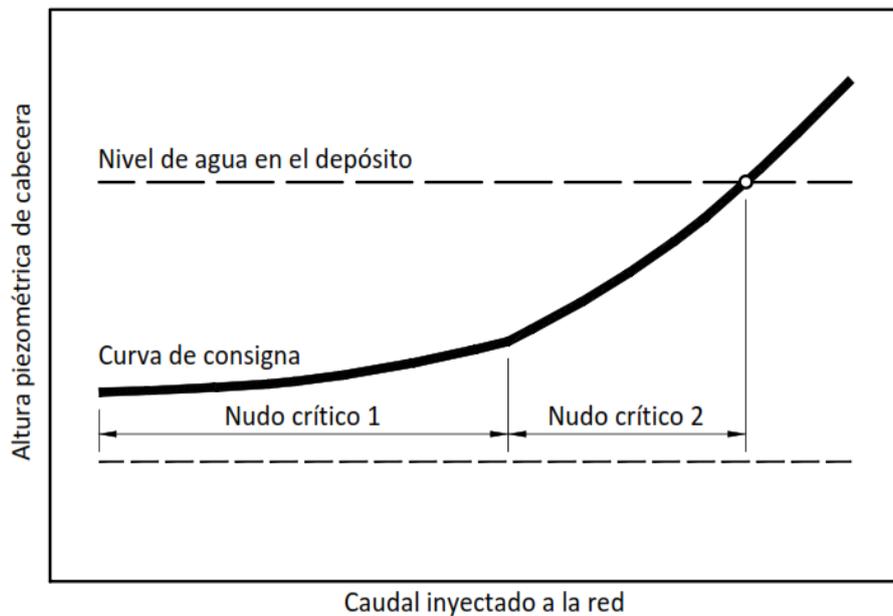


Fig. 6.11. El nudo crítico puede cambiar dependiendo del estado de carga.

Entonces, el nudo crítico está definido como:

$$n_{crit,i} = V_i \left( \min(P_{Qmax}^n) \right) \quad (6.28)$$

donde:

$$n_{crit,i} = \text{nudo crítico del clúster o sector } i.$$

El nudo crítico ahora pertenece al subconjunto de nudos del clúster o sector.

$$n_{crit,i} \in C_i, \quad (6.29)$$

donde:

$$C_i = \text{clúster que define el sector } i.$$

Para evitar que el nudo pueda ser seleccionado más adelante, debe ser retirado del conjunto inicial de selección.

$$V_{i+1} = V_i - n_{crit,i}. \quad (6.30)$$

Primero se aseguran las condiciones de servicio en el nudo más desfavorable; por lo tanto este nudo será el primero del nuevo clúster o sector.

### 6.8.3. Identificación del camino más corto

Definido el nudo crítico, debe encontrarse el camino más corto entre éste y la fuente de suministro; en caso de existir más de una fuente debe encontrarse el camino más corto a cada una de ellas. Para este fin, se considera a la red como un grafo ponderado no dirigido, cuyos pesos en las aristas están definidos en base a la energía que se disipa en el tramo; el camino más corto será aquel que presente la menor disipación de energía.

Aplicando el peso  $w_i$  a cada uno de las aristas (tramos o tuberías) del grafo, es posible determinar la matriz de pesos y, posteriormente, utilizar el algoritmo de Dijkstra que definirá el camino más corto entre el nudo crítico y la fuente de suministro. Generalmente, este camino estará conformado por las tuberías de mayor diámetro.

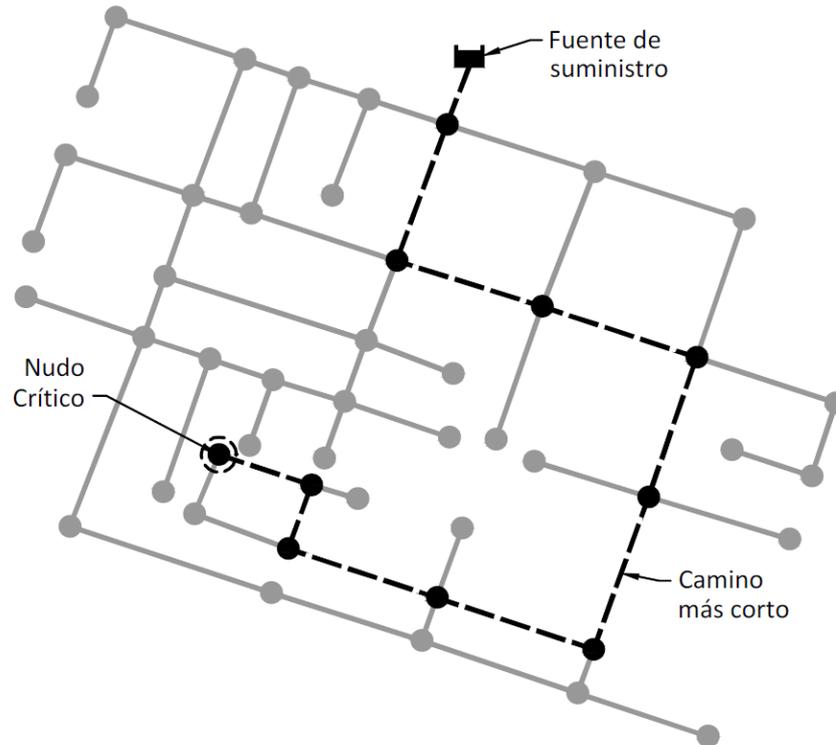


Fig. 6.12. Camino más corto entre el nudo crítico y la fuente de suministro

De esta forma, se logra configurar el camino principal que será utilizado en el cálculo hidráulico como ingreso al sector. Por lo que se define un segundo subconjunto de nudos, que agrupa a aquellos que son parte del camino más corto; asimismo, se conforma el subconjunto de aristas del camino más corto.

$$P_i = \{n_{crit,i}, \dots, n_s\}, \quad (6.31)$$

$$F_i = \{f_x, \dots, f_z\}, \quad (6.32)$$

donde:

$P_i$  = conjunto de nudos  $n$  del camino más corto entre el nudo crítico y el nudo de suministro  $n_s$ , del sector  $i$ ;

$F_i$  = conjunto de aristas o tuberías  $f$  del camino más corto entre el nudo crítico y el nudo de suministro del sector  $i$ .

#### 6.8.4. Identificación del nudo de mayor similitud

Para identificar al nudo con la mayor similitud, debe calcularse la distancia desde el nudo crítico o desde el centroide del subconjunto de nudos anterior, hacia todos los demás nudos, incluyendo en la búsqueda aquellos que se encuentran en el camino más corto.

Para un proceso de agrupamiento adecuado, que permita configurar un sector que garantice la equidad en el suministro, se adoptan las siguientes variables:

- Coordenada  $x$  del nudo
- Coordenada  $y$  del nudo
- Elevación o cota del nudo
- Presión de servicio cuando toda la red trabaja con el caudal máximo teórico
- Grado del nudo.

Las coordenadas  $x$  e  $y$ , permiten encontrar la distancia horizontal hacia los demás nudos en la red. Los nudos más cercanos a la media del clúster son los que más posibilidades tienen de ser agrupados.

Tanto la elevación del nudo, como la presión de servicio, están orientadas a mejorar la equidad en el suministro de la red o sector. Se busca que los nudos de un sector tengan unas cotas y presiones similares.

La configuración de un sector o clúster puede dejar aislados a nudos conectados al sector por una sola tubería, dejándoles sin la posibilidad de ser tomados en cuenta por otros sectores. Esta situación exige usar el grado del nudo en la red como variable para el cálculo de la distancia, por lo que aquellos nudos que tengan menor grado de conexión deben ser priorizados.

Estas variables deben ser normalizadas por la suma, para poder aplicar los pesos respectivos. En el primer paso de la formación del sector, el nudo crítico coincide con el centroide, por lo que se puede usar:

$$d(x_{crit,i}, x_j) = w_{g,j} \cdot \sqrt{\sum_{m=1}^p w_m \cdot (x_{crit,i} - x_{jm})^2}, \quad (6.33)$$

$$w_{g,j} = 1 - \frac{g_j}{M}, \quad (6.34)$$

donde:

$w_{g,j}$  = peso relacionado con el grado de conexión del nudo  $j$ ;

$g_j$  = grado de conexión del nudo  $j$ ;

$M$  = constante que dependerá del nivel de importancia que se quiera dar al grado de conexión  $g$ , puede variar de 10 a 100;

$x_{crit,i}$  = valor normalizado de la variable  $m$  del nudo crítico inicial, del clúster o sector  $i$ ;

$x_{jm}$  = valor normalizado de la variable  $m$  del nudo  $j$ ;

$w_m$  = peso de la variable  $m$ ,  $m = 1$  para coordenada  $x$ ,  $m = 2$  para coordenada  $y$ ,  $m = 3$  para la cota y  $m = 4$  para presión de servicio;

$p$  = número total de variables, 4.

Debe tomarse en cuenta que para la normalización de las coordenadas  $x$  e  $y$ , estas deben estar referidas a un valor común, con el fin de no modificar la escala en uno de los ejes del plano de referencia. Este valor común puede ser la suma de las coordenadas en  $y$ , siempre que este valor sea el más grande. Si se trabaja con coordenadas *UTM* (Universal Transversa Mercator), en latitudes alejadas de la línea del ecuador, la suma de coordenadas en  $y$  resulta ser el valor más grande.

Con relación a la constante  $M$ , la adopción de valores pequeños permite dar gran importancia al grado de conexión de los nudos en la red; estos valores son recomendables en redes mixtas en las cuales hay ramales en situaciones desfavorables (nudos lejanos o nudos con cota o presión diferente). Cuando las redes son malladas y con características uniformes, el valor de  $M$  puede ser grande, o también se puede adoptar  $w_{g,j} = 1$ . Priorizar nudos de menor grado de conexión puede incrementar la diferencia de presiones entre el nudo de menor presión y el de mayor presión en el clúster; en consecuencia, se configurarían sectores más pequeños.

El nudo más cercano no será necesariamente el que tenga la menor distancia, o mayor similitud, pues, como se trata de un grafo con las aristas definidas, la condición adicional es que también exista una arista entre el nudo crítico o el conjunto de nudos previamente seleccionados, incluyendo los nudos del camino más corto.

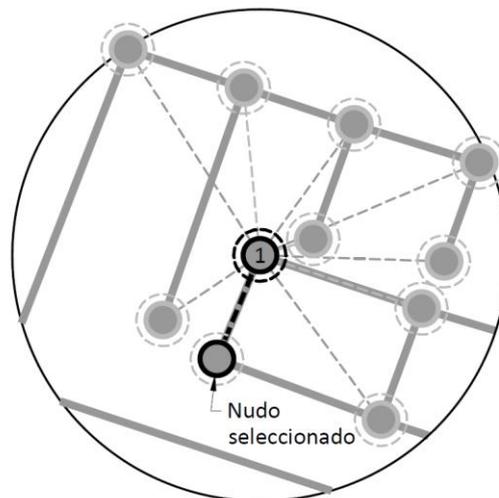


Fig. 6.13. Nudo crítico inicial y selección del nudo más cercano

Todas las aristas seleccionadas y nudos seleccionados deben ser incluidos en los subconjuntos de vértices y aristas que conforma el grafo que se utilizará para la verificación hidráulica.

$$n_{sel} \in C_i, \quad (6.35)$$

$$t_{sel} \in F_i, \quad (6.36)$$

donde:

$$n_{sel} = \text{nudo seleccionado},$$

$$t_{sel} = \text{tubería seleccionada}.$$

De forma conceptual, debe unirse el subconjunto de nudos del camino crítico con el subconjunto del clúster que define el primer sector para realizar el cálculo hidráulico:

$$B_i = P_i \cup C_i, \quad (6.37)$$

donde:

$B_i$  = conjunto de nudos que será utilizado en el cálculo hidráulico del clúster o sector  $i$ .

Para evitar que un nudo o una tubería vuelvan a ser seleccionados más adelante, como parte de otro sector, éstos deben ser eliminados de los conjuntos utilizados para selección.

$$V_{i+1} = V_i - n_{sel}, \quad (6.38)$$

$$E_{i+1} = E_i - n_{sel}. \quad (6.39)$$

Tras la selección de nudos adicionales al nudo crítico, debe procederse de forma diferente para seleccionar el nudo más cercano. Es necesario determinar el centroide de los nudos seleccionados, en base al cual se calcularán las nuevas distancias.

$$\mu_{cm} = \frac{1}{N_c} \sum_{q=1}^{N_c} x_{qm}, \quad (6.40)$$

donde:

$\mu_{cm}$  = media del clúster  $c$ , para la variable  $m$

$N_c$  = número de nudos pertenecientes al clúster  $c$

Las nuevas distancias serán calculadas para la identificación del siguiente nudo más cercano; esta distancia se mide desde el centroide del clúster en formación:

$$d(\mu_c, x_j) = w_{g,j} \cdot \sqrt{\sum_{m=1}^p w_m \cdot (\mu_{cm} - x_{jm})^2}. \quad (6.41)$$

Se mantiene la condición de la existencia de por lo menos una arista del nudo seleccionado con el conjunto de origen.

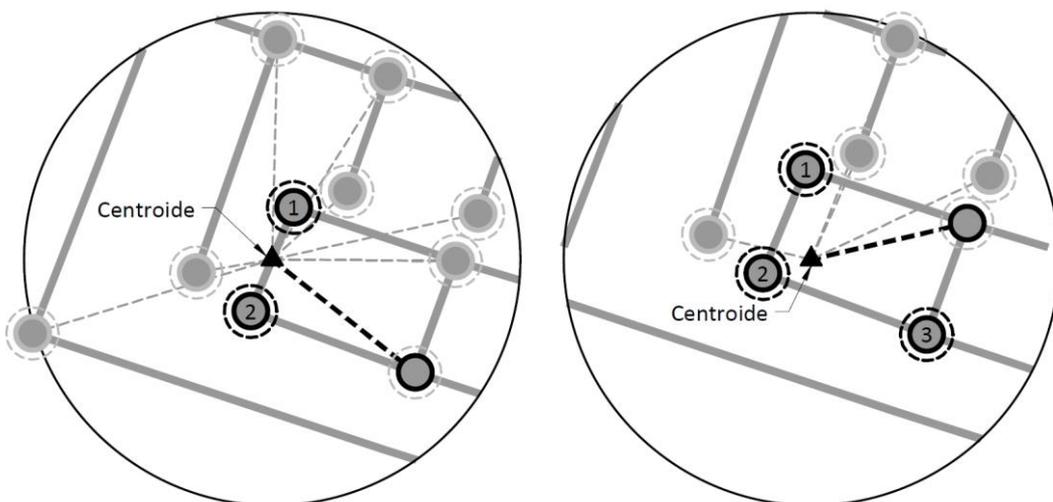


Fig. 6.14. Selección del nudo más cercano en base al centroide

La selección de un nuevo nudo debe ser verificada mediante el cálculo hidráulico del caudal máximo teórico y del factor pico  $k$ ; de esta forma, se podrá determinar el tiempo de suministro óptimo para el sector en base a las condiciones hidráulicas de servicio.

#### 6.8.4.1. Determinación del peso de las variables

Para la definición de los pesos de las variables en el cálculo de las distancias, debe tomarse en cuenta la opinión de los expertos de las empresas de agua. Esta opinión debe ser reflejada en matrices de comparación pareadas (AHP), a partir de las cuales es posible determinar los vectores propios y el peso correspondiente.

#### 6.8.5. Apertura de tuberías tras la selección del nudo

La selección de nudos implica la apertura de tuberías que conectan al nudo con el sector en formación. Esta situación puede tener mucha influencia en el cálculo de la capacidad del sector y, en consecuencia, en el tiempo de suministro y en la equidad que se busca en el suministro.

Si el nuevo nudo seleccionado tiene un número grande de tuberías que le permiten conectarse al nuevo sector, la capacidad del sector tenderá a incrementarse, pues la pérdida de carga se reduce debido al mayor número de tramos por los cuales el agua tiene la posibilidad de circular.

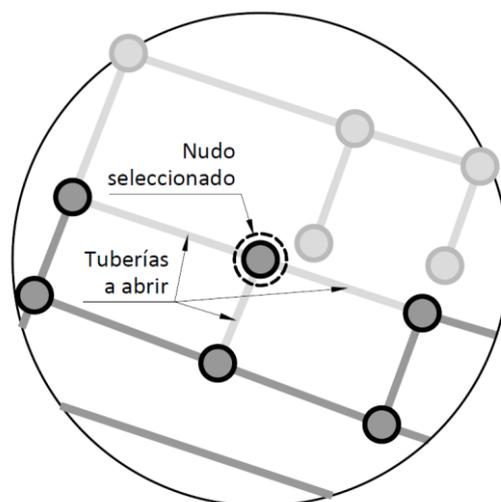


Fig. 6.15. Nudo seleccionado con mayor número de tuberías de vínculo

Cuando el nudo seleccionado tiene pocas tuberías que lo vinculan al nuevo sector (ver figura 6.16), las posibilidades de reducir la pérdida de carga por la presencia de mayor número de vías de circulación se reducen. En estos casos, el incremento o decremento de la capacidad de la red y el logro de la equidad deseada dependerá de la cota y la presión del nudo seleccionado. Si el nudo tiene una cota menor, se produce mayor presión con relación al sector, en consecuencia este nudo puede convertirse en el nudo de presión máxima que reduzca la equidad y defina el fin de la configuración del sector. En caso de que el nudo tenga una cota mayor al promedio, la necesidad de cumplir con la presión mínima puede convertirlo en un nuevo nudo crítico que tenderá a reducir la capacidad del sector.

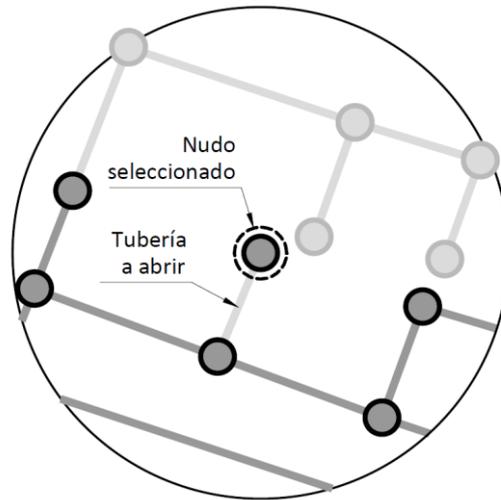


Fig. 6.16. Nudo seleccionado con menor número de tuberías de vínculo

Debe realizarse la verificación hidráulica de cada adición de nudos y las respectivas tuberías, para lo cual debe configurarse la subred que sirve para el cálculo. Esta subred está configurada por el grafo:

$$H_i = (B_i(H_i), F_i(H_i), I_R), \quad (6.42)$$

$H_i$  = Grafo utilizado para la verificación hidráulica de cada paso del procedimiento.

El cálculo hidráulico permite conocer el caudal máximo teórico del sector en formación y las presiones, máxima y mínima del conjunto de nudos seleccionados.

### 6.8.6. Tiempo de suministro del sector

Cada paso o iteración en el proceso de formación del nuevo sector permite calcular el caudal máximo teórico. Usando el consumo o demanda media de los nudos seleccionados es posible conocer el factor pico para cada uno de los estados de carga.

El factor pico está relacionado con la cantidad de horas de suministro, que se calcula bajo las siguientes condiciones:

$$Q_{máxt}^j = k_j \cdot \sum_{i=1}^{ns} Q_i, \quad (6.43)$$

donde:

$Q_{máxt}^j$  = caudal máximo teórico del conjunto de nudos agrupados, para el estado de carga  $j$ ;

$Q_i$  = caudal o demanda media en los nudos  $i$  agrupados;

$ns$  = número total de nudos evaluados del nuevo sector o conjunto de nudos  $i$  agrupados;

$k_j$  = factor pico en el estado de carga  $j$ .

Para calcular el tiempo de suministro, se asume que el volumen consumido en suministro continuo es igual al volumen consumido en suministro intermitente. Asimismo, se considera que el caudal medio se debe distribuir a lo largo de las 24 horas del día y que la capacidad de la red ( $Q_{máxt}$ ) permite suministrar un mayor caudal en un menor tiempo de suministro, con lo cual se tiene:

$$V_s = \sum_{i=1}^{ns} Q_i \cdot 24, \quad (6.44)$$

$$V_s = Q_{máxt}^j \cdot t_s, \quad (6.45)$$

donde:

$V_s$  = Volumen de suministro total;

$t_s$  = tiempo de suministro a los nudos agrupados  $i$ , en horas.

Reemplazando (6.44) y (6.45) en la ecuación 6.43, se tiene

$$t_s = \frac{24}{k_j}. \quad (6.46)$$

Generalmente, a mayor cantidad de nudos agrupados, el factor punta tenderá a disminuir, por lo que se tenderá a necesitar 24 horas de suministro (para reducir el caudal). Si el número de nudos es menor, el factor pico aumentará, con lo cual el tiempo de suministro podrá ser pequeño. Tener menos horas de suministro en este caso es útil para la no superposición de horarios de suministro entre sectores; si solo un sector exige gran cantidad de horas de suministro, la red no tendrá capacidad para el suministro simultáneo a los otros sectores.

La configuración hidráulica del sector y el número de nudos limitarán el caudal máximo teórico y, en consecuencia también al factor pico, por lo que existe una relación intrínseca entre el tamaño del sector y el tiempo de suministro. De esta forma, se logra la configuración de un sector con suministro intermitente cuyo tamaño está limitado por la garantía de un servicio apropiado en presión.

### 6.8.7. Criterio de equidad en la configuración del sector

En un sector, cuando la diferencia de presiones de suministro entre el valor máximo y el mínimo es grande, se tiene un suministro inequitativo; la diferencia entre nudos favorables y nudos desfavorables puede ser grande, limitando el suministro entre los desfavorables.

Por esta razón, debe existir un criterio que permita delimitar el clúster o sector, relacionado con la presión de suministro del conjunto de nudos.

En el presente trabajo se considera la diferencia de presiones para establecer el tamaño adecuado de un sector; se pueden usar los valores recomendados por la CPHEEO (2005) constituidos en un rango de 3 a 5 mca.

$$\Delta P = P_{máx} - P_{mín}, \quad (6.47)$$

$$P_{máx} = \max_P(C_i), \quad (6.48)$$

$$P_{mín} = \min_P(C_i), \quad (6.49)$$

$$\Delta P \leq P_{eq}, \quad (6.50)$$

donde:

$P_{m\acute{a}x}$  = presión máxima del conjunto, clúster o sector  $C_i$ ;

$P_{m\acute{i}n}$  = presión mínima del conjunto, clúster o sector  $C_i$ ;

$P_{eq}$  = diferencia de presión que garantiza la equidad en el suministro.

Cuando se logra superar este valor, se busca el siguiente nudo crítico de la red, sin tomar en cuenta a los ya agrupados. A partir de este nuevo nudo crítico se configurará un nuevo sector sin superar el valor recomendado de diferencia de presiones. De esta forma, se irán configurando todos los sectores de la red.

El procedimiento se detiene si se logra seleccionar a todos los nudos de presión disponibles en la red, asignando a cada uno de ellos a un sector.

Es importante considerar que los horarios de suministro de los sectores no deben superponerse, pues no se lograría la equidad en el suministro buscada, y la capacidad de la red se vería sobrepasada, con la consecuente reducción de presiones. Por lo tanto, tras la sectorización es recomendable gestionar los horarios de suministro, para lo cual puede usarse la metodología propuesta en el *capítulo 7*.



## **CAPÍTULO 7. Gestión de horarios en sistemas con suministro intermitente**

---

### **7.1. Introducción**

Generalmente, en las poblaciones pequeñas que cuentan con suministro intermitente, la entrega de agua se realiza durante algunas horas para toda la red, sin ninguna diferenciación de sectores. Sin embargo, en las grandes ciudades con suministro intermitente, es común el uso de sectores con diferentes periodos de suministro. Esta última situación es la que se aborda en el presente capítulo.

Para mejorar las condiciones de servicio de los usuarios de un sistema con suministro intermitente, no basta con tener una red sectorizada; deben analizarse también otros aspectos como la configuración del horario de suministro de cada uno de los sectores.

Existe abundante literatura sobre planificación, diseño, operación y mantenimiento de los sistemas con suministro continuo. Sin embargo, la operación y gestión de los sistemas con suministro intermitente está basada principalmente en la experiencia del personal de la empresa de agua y en análisis simples de oferta y demanda. El suministro intermitente suele ser adoptado por necesidad más que por diseño (Vairavamoorthy et al., 2008). Estos inconvenientes pueden llevar a establecer horarios de suministro con poco criterio técnico, los cuales son capaces de generar condiciones que perjudiquen al suministro del conjunto de la población.

Uno de los problemas de los sistemas con suministro intermitente sectorizados, con una mala gestión de los horarios, es el caudal pico que se produce en algunas horas del día. Este valor suele ser mucho más grande que en un sistema con suministro continuo. Bajo estas condiciones, se reduce la presión y el caudal en los puntos extremos o elevados, generando inequidad en el suministro y causando la queja de los usuarios.

El problema de selección óptima de horarios de suministro es sencillo cuando se tienen pocos sectores; sin embargo, cuando se tienen muchos sectores y se consideran varios criterios técnicos para la asignación de horarios, se genera un espacio de búsqueda más grande, con lo cual esta tarea puede volverse compleja.

En el presente capítulo, se propone una herramienta para la gestión técnica de los sistemas con suministro intermitente, una metodología que permite gestionar los horarios de suministro de cada sector de la red, con el fin de mejorar las condiciones del servicio de la población. Se busca reducir el

caudal pico producido por la simultaneidad en el suministro de los sectores, asignando horarios de suministro en base a criterios técnicos cuantitativos y cualitativos (Ilaya-Ayza et al., 2014).

Se plantea el uso de criterios como: la presión de servicio, la cantidad de agua disponible, la incidencia del incremento o decremento de la presión, la cantidad de usuarios, las horas de suministro, y las facilidades de operación de los sectores, entre otros. Asimismo, se incorpora en el proceso de optimización la experiencia técnica de los expertos de la empresa de suministro de agua, a través de su opinión, utilizando la técnica de decisión multicriterio AHP (Saaty, 1977), (Saaty & Vargas, 2012). En este capítulo se hibrida programación lineal entera y análisis multicriterio, con el fin de encontrar los horarios de suministro óptimos para cada uno de los sectores.

La gestión de horarios de suministro pretende ser una solución de gestión técnica a corto plazo, que busca mejorar las condiciones del servicio y en consecuencia mejorar la calidad de vida de la población. Puede ser la mejor alternativa de solución para sistemas con suministro intermitente que no tienen posibilidades de tener suministro continuo. Asimismo, se convierte en una herramienta útil para la transición gradual de un sistema intermitente a uno continuo.

También es necesario considerar que los sistemas con suministro intermitente se desenvuelven en escenarios con escasez física, económica y de mala gestión (Totsuka et al., 2004). En un sistema con escasez económica se dispone de pocos recursos económicos, por lo que las propuestas para que tengan un mejor desempeño no deben pasar necesariamente por la construcción de nueva infraestructura, sino por alternativas que requieran una mínima cantidad de recursos humanos y económicos, objetivo que se logra a través de la gestión de horarios.

Uno de los problemas de trabajar en un contexto de escasez económica y de mala gestión es la falta de un modelo matemático de la red, lo cual impide su inclusión en la modelización del problema de optimización. Esta deficiencia puede ser compensada con la inclusión de información cualitativa de la red, extraída a partir de la experiencia de los gestores del sistema de suministro de agua. Sin embargo, se deben incluir en la modelización mediciones de presión en los puntos de ingreso a cada uno de los sectores. Asimismo, será necesario contar con el modelo matemático de la red para futuros procesos en el caso de buscar el suministro continuo.

## 7.2. Optimización

La optimización es una herramienta importante en la ciencia de las decisiones y en el análisis de los sistemas físicos (Nocedal & Wright, 2006); busca encontrar la mejor solución, relacionada con coste, calidad, fiabilidad u otros criterios que permitan medir su utilidad.

En un sentido matemático, la optimización es la minimización o maximización de una función, con frecuencia sujeta a restricciones entre sus variables (Nocedal & Wright, 2006):

$$\underset{x \in D \subset \mathbb{R}^n}{\text{optimizar } f(x)} \quad \text{sujeto a} \quad \begin{array}{l} c_i(x) = 0, \quad i \in A \\ c_i(x) \geq 0, \quad i \in B \end{array} \quad (7.1)$$

donde:

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^t$ , vector de cierto dominio  $D$  de  $\mathbb{R}^n$  definido por  $n$  variables;

$f$  = función objetivo, una función de  $x$  que se quiere maximizar o minimizar;

$c_i$  = funciones de restricción: son funciones de  $x$  que definen ciertas ecuaciones e inecuaciones que el vector  $x$  debe satisfacer;

$A$  y  $B$  = conjuntos de índices para las restricciones de igualdad o desigualdad, respectivamente.

Cuando se tiene un problema de maximización, se puede realizar el cambio a minimizar  $-f(x)$ , por lo que es frecuente definir los problemas de optimización como problemas de minimización.

Las restricciones definen una región factible sobre la que se desea obtener la o las soluciones del problema de optimización. Los extremos (máximos y mínimos) sobre la región factible de la función objetivo pueden ser diversos, o en otras palabras, puede haber varios valores óptimos. Al mejor de todos ellos, alcanzable posiblemente en más de un punto  $x$ , se lo denomina óptimo global. Sin embargo, existen óptimo locales que con frecuencia atraen a los mecanismos de cálculo impidiéndoles la obtención del óptimo global (Andreu, 1993), que es, en principio, el objetivo.

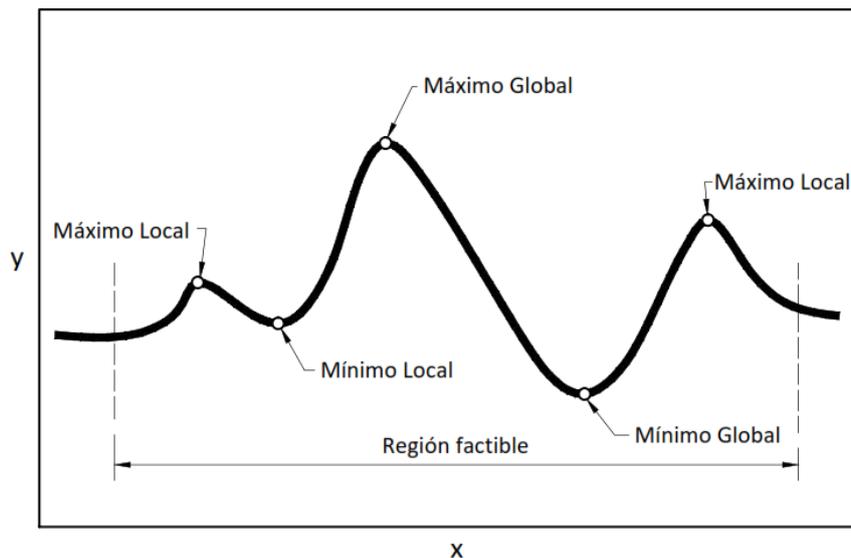


Fig. 7.1. Máximos locales y máximo global en una función objetivo dentro la región factible

El proceso de identificación de objetivos, variables y restricciones para un problema dado, es denominado modelización. La construcción de un modelo apropiado es el primer paso en el proceso de optimización. Si el modelo es muy simplista, éste no aportará información útil para el problema práctico, y si es muy complejo puede ser muy difícil de resolver (Nocedal & Wright, 2006).

El espacio de todas las soluciones factibles (conjunto de soluciones entre las cuales reside la solución deseada) es conocido también como espacio de búsqueda (o espacio de estados). Cada uno de los puntos del espacio de búsqueda representa una posible solución; por lo tanto, se los puede cuantificar en base a su bondad con relación al problema a resolver (Sivanandam & Deepa, 2007).

### 7.2.1. Algoritmos de optimización

Como se indica en los párrafos anteriores, la función objetivo depende de numerosas variables y a su vez deben simularse modelos complejos, por lo que es necesario recurrir al uso de algoritmos de optimización que permiten buscar los valores óptimos.

De forma general, un algoritmo está compuesto por un conjunto de pasos para resolver un problema determinado (Sivanandam & Deepa, 2007). Un algoritmo de optimización es el conjunto de procedimientos y cálculos, organizados con el fin de buscar valores óptimos. Generalmente, aquellos algoritmos que evalúan la función objetivo en un mayor número de veces son lentos; sin embargo

tienen la posibilidad de ser utilizados en una mayor variedad de problemas. Algunos algoritmos solo tienen posibilidades de encontrar óptimos locales, capacidad que puede ser aprovechada al introducirla en otros algoritmos en los cuales se utilizan más puntos de partida para encontrar al óptimo global (Andreu, 1993).

Los algoritmos de optimización son iterativos. Comienzan con una estimación inicial de la variable  $x$  y generan una secuencia de estimaciones mejoradas (iteraciones) hasta que encuentran una solución. La mayoría de las estrategias de estos algoritmos hacen uso de los valores de la función objetivo  $f$ , las funciones de restricción  $c_i$ , y posiblemente la primera y la segunda derivadas de estas funciones. Algunos algoritmos acumulan información recopilada en iteraciones anteriores, mientras que otros utilizan solamente información local obtenida en el punto actual (Nocedal & Wright, 2006). Un algoritmo de optimización debe cumplir con los requisitos de:

- **Robustez.** Debe comportarse bien en una amplia variedad de problemas en su clase, para todos los valores razonables de punto de partida.
- **Eficiencia.** Debe ser capaz de no requerir excesivos tiempo computacional y almacenamiento.
- **Exactitud.** Debe ser capaces de identificar una solución con precisión, sin ser demasiado sensibles a errores en los datos o errores de redondeo aritméticos que se producen cuando el algoritmo se ejecuta en un ordenador.

El objetivo general de los algoritmos de optimización es encontrar al valor óptimo global con la mayor precisión, en el menor tiempo posible. Por lo tanto, el número de evaluaciones de la función objetivo para hallar al valor óptimo suele ser un indicador común.

No existe un algoritmo de optimización universal, por lo que existe una cantidad importante de algoritmos, alguno de ellos elaborados para resolver un tipo de problemas específicos. La elección del algoritmo es muy importante, pues determina la rapidez en la búsqueda de soluciones y la precisión en el resultado (Nocedal & Wright, 2006).

## 7.2.2. Programación lineal

Generalmente, las situaciones que se modelan son, en realidad, no lineales; sin embargo, la programación lineal es atractiva debido a su sencillez conceptual, al avanzado estado del software actual, que garantiza la convergencia al óptimo global, y al hecho de que la presencia de incertidumbre en un modelo hace que un modelo lineal sea más apropiado que un modelo no lineal demasiado complejo (Nocedal & Wright, 2006).

La programación lineal resuelve un problema de minimización (o maximización) de una función lineal sujeta a igualdades o desigualdades lineales, es decir, la optimización de una función lineal en un poliedro o simplex. Probablemente, es la clase más práctica e importante de los problemas de optimización prácticos, pues tiene amplias aplicaciones (Güler, 2010).

Las expresiones lineales que definen el problema de optimización, dados ciertos datos del problema representados por los coeficientes  $c_i$  en la función objetivo, y  $a_{ij}$  y  $b_j$  en las restricciones, son las siguientes:

$$\text{maximizar } f(x) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i, \quad (7.2)$$

sujeto a:

$$a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n = b_1$$

$$a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \dots + a_{2n} \cdot x_n = b_2$$

⋮

$$a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \dots + a_{mn} \cdot x_n = b_m$$

$$x_1 \geq 0 \quad \dots \quad x_n \geq 0$$

La solución óptima para los problemas de programación lineal se encuentra en los vértices de la región factible, por lo que puede parecer a primera vista un problema sencillo de resolver; sin embargo, el número de vértices crece en función del número de variables y restricciones que engloba el problema de optimización y la cantidad total de posibles soluciones es definida por la ecuación:

$$\binom{n}{m} = \frac{n!}{(n-m)!(m)!}, \quad (7.3)$$

donde:

$n$  = número de variables,

$m$  = número de restricciones.

Cuando los valores son muy elevados, debe recurrirse a algoritmos que permitan solucionar este tipo de problemas.

### 7.2.2.1. El método Simplex

El método simplex es un método de iteración finita, utilizado de forma general para resolver problemas de programación lineal (Dantzig et al., 1955). El procedimiento comienza en un punto extremo de la región factible, moviéndose en cada iteración hasta encontrar el valor del óptimo global (Borne et al., 2013).

### 7.2.3. Programación lineal con variables enteras

En el presente estudio se busca mejorar el suministro de agua potable, optimizando la asignación de los horarios de suministro de agua en un sistema intermitente, para lo cual se usará programación lineal con variables enteras binarias.

Los problemas de programación entera son un tipo de problemas de optimización discreta. La característica que define un problema de optimización discreta es que la incógnita  $x$  se extrae de un conjunto finito de elementos, el cual, generalmente, es muy grande (Nocedal & Wright, 2006).

#### 7.2.3.1. Algoritmo Branch & Cut

El algoritmo Branch & Cut es utilizado para resolver problemas de programación lineal con variables enteras; es el método utilizado por OPENSOLVER (Mason & Dunning, 2010), programa

que se emplea en el presente capítulo. El algoritmo permite reducir el número de combinaciones que se deben examinar de forma sistemática; los pasos son los siguientes:

- **Paso 1:** encontrar la solución del problema mediante el método simplex; generalmente no son números enteros.
- **Paso 2:** con esta primera solución óptima se selecciona alguna de las variables con valor diferente a cero, con la cual se crean nuevas ramas, dando lugar a nuevos problemas de programación lineal que deben resolverse.
- **Paso 3:** cuando se resuelven los problemas y no se tienen valores enteros, la rama que dé un mayor valor de la función objetivo será utilizada para generar nuevos problemas de programación lineal.
- **Paso 4:** el paso 3 se repite hasta encontrar como valor óptimo un número entero.

Este algoritmo también puede ser utilizado para resolver problemas con variables binarias.

### 7.3. Matriz circulante

Cada uno de los sectores del sistema con suministro intermitente tiene un periodo de suministro definido; por lo tanto, se tienen periodos con diferentes duraciones. Esta situación dificulta la configuración del modelo matemático que define la función objetivo para el proceso de optimización.

A diferencia de los problemas tradicionales de asignaciones óptimas, donde se definen valores puntuales, en la asignación óptima de horarios de suministro en sistemas intermitentes deben establecerse bloques de valores que representan el periodo de suministro de agua. Esta situación requiere un paso intermedio que permita agrupar estas horas de suministro, para lo cual se propone el uso de matrices circulantes (Lara, 2001), (Canright et al., 2015).

Una matriz circulante  $C$  está totalmente definida por un vector  $c$ , que aparece como la primera fila de  $C$ . Las restantes filas de  $C$  son permutaciones cíclicas del vector  $c$  con desfase igual al índice de la fila y luego enrollado (Lara, 2001).

Dados  $n \in \mathbb{Z}_+$  y  $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ . La matriz  $C$ ,  $n \times n$ , es circulante de la forma:

$$C = \text{circ}(c_1, c_2, \dots, c_n) = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & \cdots & c_n \\ c_n & c_1 & c_2 & \cdots & c_{n-1} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ c_3 & \cdots & c_n & c_1 & c_2 \\ c_2 & \cdots & c_{n-1} & c_n & c_1 \end{pmatrix}. \quad (7.4)$$

$C$  es una matriz circulante de orden  $n$ .

Tanto la suma de matrices circulantes como la multiplicación con un escalar, da como resultado una matriz circulante, una propiedad que es útil para la conformación de los periodos de suministro de agua como se verá más adelante.

## 7.4. Descripción general de la metodología

En esta sección se detalla el enfoque planteado para la asignación óptima de horarios de suministro de cada uno de los sectores de la red, con el objetivo de maximizar eficazmente la calidad del servicio. Inicialmente se definen los criterios cualitativos y cuantitativos que serán utilizados en el proceso de asignación, posteriormente se construyen los bloques de suministro y, por último, se define el problema de optimización. De esta forma, se generan escenarios que mejoran el servicio de agua potable en suministro intermitente.

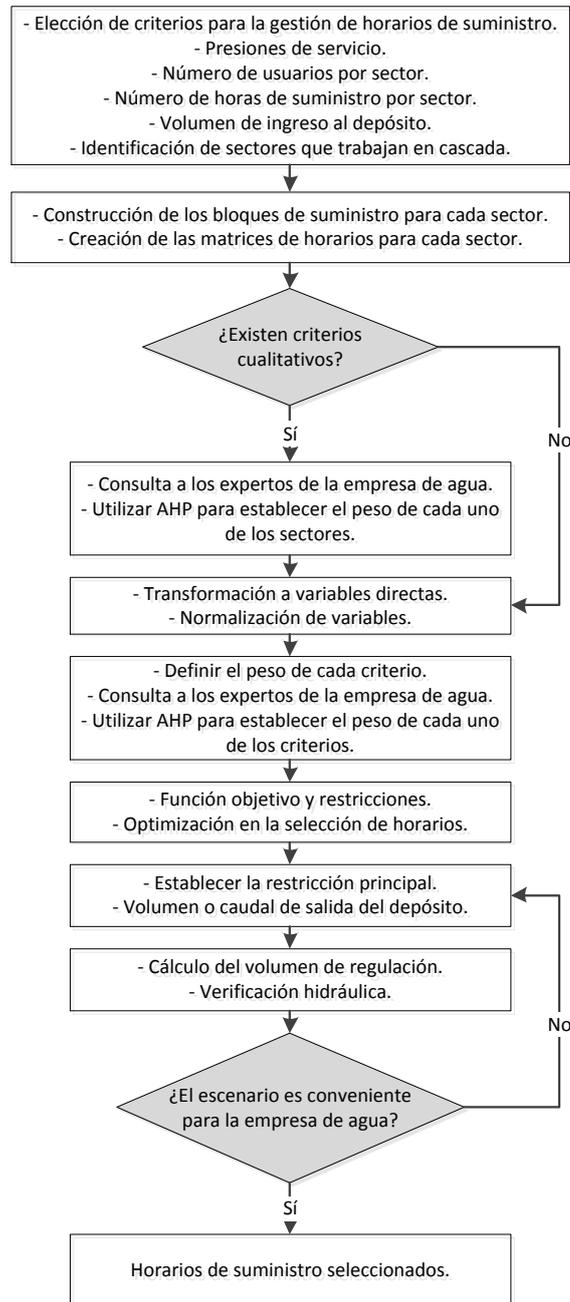


Fig. 7.2. Diagrama de flujo para la asignación óptima de horarios de suministro

En la figura 7.2 se presenta el diagrama de flujo que resume el procedimiento de asignación óptima de horarios de suministro que planteamos. El desarrollo del modelo planteado para el proceso de optimización parte de las siguientes consideraciones:

- Es necesario que la red con suministro intermitente se encuentre sectorizada.
- La curva de suministro de cada sector es laminada, debido a la presencia de depósitos domiciliarios en cada una de las viviendas, tendiendo a una línea horizontal durante todo el periodo de suministro, configurando un bloque de suministro.
- El volumen total de suministro para cada uno de los sectores se mantiene constante después del cambio de horario.
- Para la verificación hidráulica, se considera que el caudal máximo del periodo se produce en la hora de mayor consumo.

Asimismo, el procedimiento utiliza al depósito de almacenamiento como punto de equilibrio.

## 7.5. Bloques de suministro

Tanto en el *capítulo 2*, como en el *capítulo 5*, se analiza el comportamiento del patrón de suministro intermitente, en base a las mediciones realizadas en Jordania (Battermann & Macke, 2001) y en Bolivia. La laminación de los caudales de suministro, a causa de los depósitos domiciliarios es evidente; la tendencia a un suministro de caudal constante permite asumir la configuración de bloques de suministro para cada uno de los sectores.

Por lo tanto, es posible simplificar el problema de asignación óptima de horarios mediante el cálculo del volumen promedio por período de suministro ( $V_s$ ). El conjunto de estos valores, delimitado por el número de horas de suministro ( $h$ ), define el volumen total suministrado en el periodo o bloque de suministro para el sector.

$$V_{s_j} = \frac{Vd_j}{h_j}, \quad (7.5)$$

donde:

$V_{s_j}$  = volumen promedio por periodo de suministro del sector  $j$ ,

$Vd_j$  = Volumen diario suministrado al sector  $j$ ,

$h_j$  = el número de periodos (por lo general horas) de suministro para el sector  $j$

Los bloques de suministro son asignados a los sectores y posteriormente son organizados adecuadamente en un nuevo horario óptimo, el cual reúne los requisitos técnicos previamente definidos.

## 7.6. Criterios para el cambio de horario de suministro

Para el proceso de asignación óptima de los horarios de suministro, no solamente se pueden usar criterios cuantitativos, sino también es posible utilizar criterios cualitativos.

Los criterios cuantitativos son típicamente normalizados sobre la base de los valores medidos en cada uno de los sectores de la red. Son elementos cuantitativos característicos en un sector de una

red con suministro intermitente, variables como: presión de servicio, número total de usuarios, número de horas de suministro, longitud total de tuberías de un sector, diámetros y otros elementos medibles.

Los criterios cualitativos son abordados a través de encuestas realizadas a expertos, responsables de la operación del sistema con suministro intermitente. Entre estos criterios, en un sistema con suministro intermitente, se pueden enfocar a: facilidad de operación para aislamiento de los sectores, problemas con quejas de los vecinos, y otros. Para el procesamiento de este tipo de información, en la presente tesis se usa la metodología AHP.

Los tres criterios cuantitativos utilizados para la asignación óptima de horarios son los siguientes:

- Presión de servicio,
- Horas de suministro y
- Número o cantidad de usuarios.

Asimismo, se utilizará un criterio cualitativo:

- Facilidad en la operación del sector

En caso de considerar criterios adicionales a los presentados en el presente trabajo, debe modificarse la función objetivo, incluyendo el peso de cada uno de estos elementos; sin embargo, la estructura global de la metodología no cambia.

Para el proceso de asignación de nuevos horarios, es conveniente que el periodo de suministro de los sectores modificados se mueva preferiblemente a las horas en las cuales ingresa agua al depósito; de esta forma es posible reducir el volumen de regulación y el tiempo de permanencia del agua en el tanque.

Es importante dar prioridad al horario de suministro actual para el proceso de asignación, asumiendo que éste es conveniente para los usuarios de cada sector. En redes en las cuales se tiene un sistema recién sectorizado, donde se quieren definir los mejores horarios de suministro, es conveniente partir de un horario de suministro que otorgue mayores beneficios a todos los usuarios, por ejemplo, las primeras horas de la mañana.

### **7.6.1. Cuantificación de variables**

Definidos ya los criterios para el proceso de optimización, se procede a cuantificar o establecer el peso de cada una de las variables en cada uno de los sectores.

Los criterios cuantitativos pueden ser ponderados en base a los valores medidos de cada una de las variables, siempre y cuando se conviertan en variables directas, si se considera que son indirectas. Con relación al cálculo de pesos para criterios cualitativos, existe dificultad en su procesamiento, pues éstos no son medibles fácilmente; por lo tanto, se utiliza la técnica de análisis multicriterio AHP; de esta forma se configurarán matrices de comparación pareada del conjunto de sectores evaluados en base al criterio elegido.

### 7.6.1.1. Cantidad de usuarios del sector

Este criterio es importante, debido a que permite reducir el número de usuarios afectados por el cambio del horario de suministro. Si la cantidad de usuarios es pequeña, el sector es idóneo y tiene mayores posibilidades de modificación de horario, porque la cantidad de personas afectadas será menor.

Como la variable explicativa es cuantitativa e inversa, se trabaja con la información recolectada; sin embargo, estos valores deben transformarse en variables explicativas directas, para lo cual se utiliza el método de transformación por la inversa:

$$l'_i = \frac{1}{nc_i}, \quad (7.6)$$

$nc_i$  = número de clientes o usuarios del sector  $i$

Posteriormente, la variable es normalizada por la suma:

$$l_i = \frac{l'_i}{\sum_{i=1}^n l'_i}, \quad (7.7)$$

$n$  = número total de sectores de la red.

Como resultado, se tiene el vector  $L$ , que reúne a los valores normalizados de cada uno de los sectores:

$$L = (l_1, l_2, \dots, l_n). \quad (7.8)$$

### 7.6.1.2. Presión de servicio

Este criterio establece la posibilidad de cambio de horario del sector en base a la presión de servicio. Se considera que aquellos sectores con menores presiones de suministro son los primeros en cambiar de horario de suministro, buscando un horario en el cual mejoren sus condiciones de presión. Se asume que los usuarios ubicados en sectores con baja presión, tendrían mayores posibilidades de aceptar un cambio de horario que mejore el servicio.

La variable es cuantitativa, se utilizan las presiones medidas al ingreso de cada sector, y también está condicionada como variable explicativa inversa que debe ser convertida en directa. Para lo cual, se considera la falta de satisfacción de una presión máxima  $K$ , pues expresa mejor la falta de calidad del servicio en términos de presión:

$$p'_i = K - vp_i ; \quad K = \max(vp_1, vp_2, \dots, vp_n), \quad (7.9)$$

$vp_i$  = Valor de la presión de servicio del sector  $i$ .

Normalizando por la suma:

$$p_i = \frac{p'_i}{\sum_{i=1}^n p'_i}. \quad (7.10)$$

Los valores calculados normalizados de cada uno de los sectores se reúnen en el vector  $P$ :

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n). \quad (7.11)$$

### 7.6.1.3. Horas de suministro

Los sectores con menos horas de suministro podrán moverse de forma más flexible que los de mayor cantidad de horas; debe considerarse que aquellos que tienen mayor cantidad de horas de suministro son aquellos de mayor tamaño, con mayor número de usuarios; generalmente, están interconectados a otros o reciben poco volumen de agua a lo largo del día.

La variable explicativa relacionada con las horas de suministro también es cuantitativa e inversa, por lo que se sigue el mismo procedimiento que para las dos anteriores:

$$r'_i = \frac{1}{nh_i}, \quad (7.12)$$

$nh_i$  = Número de horas de suministro del sector  $i$ .

Se normaliza la variable por la suma:

$$r_i = \frac{r'_i}{\sum_{i=1}^n r'_i}. \quad (7.13)$$

El vector  $R$  reúne a todos los valores normalizados relacionados con las horas de suministro:

$$R = (r_1, r_2, \dots, r_n). \quad (7.14)$$

### 7.6.1.4. Facilidad en la operación del sector

La facilidad en la operación de un sector es una variable cualitativa directa; esta clasificación hace que la misma no pueda ser extraída directamente de mediciones; esta limitación se debe a que la facilidad en la operación depende de diversos factores, tales como la disponibilidad de válvulas de sectorización, si estas se encuentran funcionando correctamente y si están visibles, la dificultad en el trabajo para los operadores (trabajo manual), las quejas de la población y otros. De esta forma, esta variable cualitativa es consultada a expertos de la empresa que conocen y tienen experiencia con respecto a las facilidades de operación del sector.

Para la cuantificación de esta variable se utiliza el método AHP, calculando los vectores propios de las matrices de comparación pareadas, resultado de las consultas a por lo menos tres expertos. La media geométrica de los vectores propios de las matrices de cada experto (Delgado-Galván et al., 2014) es posteriormente normalizada por la suma, generando el vector  $O$ .

$$O = (o_1, o_2, \dots, o_n). \quad (7.15)$$

El peso de cada una de las variables debe ser afectado, a su vez, por el peso de cada uno de los criterios. Es decir, se calcula también la ponderación de cada criterio utilizando AHP; para este fin se deben realizar también consultas a los expertos de la empresa de suministro de agua.

### 7.6.1.5. Volumen de ingreso al depósito

Como se indicó anteriormente, este criterio permitirá la modificación del horario de suministro de cada sector, enmarcándolo preferentemente en las horas en las cuales ingresa agua al depósito; de esta forma, se logra reducir el volumen de regulación en el depósito de almacenamiento.

Esta variable es directa, por lo que no es necesario ninguna conversión; solamente es necesaria su normalización por la suma; únicamente en este caso, el peso es representado directamente por este valor:

$$t_i = \frac{t'_i}{\sum_{i=1}^m t'_i}. \quad (7.16)$$

Entonces el vector que representa el peso del volumen de ingreso al tanque es:

$$T = (t_1, t_2, \dots, t_m). \quad (7.17)$$

Al ser un criterio muy importante para la modificación de los horarios de suministro, este criterio no es ponderado con los otros criterios.

### 7.6.1.6. Ponderación de criterios

A partir de los cuatro criterios utilizados, que no son comparables fácilmente, se consulta a los expertos sobre el peso de los mismos, en virtud de su experiencia.

En este acápite se establece la ponderación de los criterios, en base a los cuales se calcularán los pesos para cada sector. El procedimiento hasta aquí define que cada uno de los criterios utilizados tienen el mismo peso a la hora de tomar decisiones; sin embargo, esto no es así. Deben calcularse los pesos de cada uno de los criterios, que no son fácilmente comparables, a partir de consultas a los expertos para lo cual también se utiliza AHP.

Los criterios que se ponderan son:

- Presión de servicio
- Horas de suministro
- Número de clientes
- Facilidad de las operaciones de aislación del sector

No se incluye el criterio relacionado con el volumen de ingreso al depósito debido a que no es un criterio que involucre a los sectores específicamente; solamente establece los horarios que tienen mayores posibilidades de acoger el suministro del sector.

Tras la consulta a los expertos, se calcula la media geométrica de los vectores propios de las matrices de comparación pareadas de cada uno de los criterios y, de esta forma, se tienen pesos globales representativos de los criterios:

$$W = (wc', wp', wh', wo'), \quad (7.18)$$

donde:

$wc'$  = peso del criterio número de usuarios,

$wp'$  = peso del criterio presión de servicio,

$wh'$  = peso del criterio horas de suministro,

$wo'$  = peso del criterio facilidad en la operación.

### 7.6.1.7. Cálculo de factores por cada criterio

Multiplicando el peso de los criterios por cada uno de los elementos que conforman los vectores se tiene el peso detallado para cada variable:

Factores que dependen del número de usuarios del sector:

$$Wc = wc' \cdot L = (wc' \cdot l_1, wc' \cdot l_2, \dots, wc' \cdot l_n), \quad (7.19)$$

$$Wc = (wc_1, wc_2, \dots, wc_n). \quad (7.20)$$

Factores que dependen de la presión de servicio en el sector:

$$Wp = wp' \cdot P = (wp' \cdot p_1, wp' \cdot p_2, \dots, wp' \cdot p_n), \quad (7.21)$$

$$Wp = (wp_1, wp_2, \dots, wp_n). \quad (7.22)$$

Factores que dependen del número de horas de suministro del sector:

$$Wh = wh' \cdot R = (wh' \cdot r_1, wh' \cdot r_2, \dots, wh' \cdot r_n), \quad (7.23)$$

$$Wh = (wh_1, wh_2, \dots, wh_n). \quad (7.24)$$

Factores que dependen de la facilidad en la operación del sector:

$$Wo = wo' \cdot O = (wo' \cdot o_1, wo' \cdot o_2, \dots, wo' \cdot o_n), \quad (7.25)$$

$$Wo = (wo_1, wo_2, \dots, wo_n). \quad (7.26)$$

## 7.7. Optimización del horario de suministro

Una vez definidos los pesos de cada una de las variables (sectores), que corresponden a los datos del problema, se procede a resolver el problema de optimización, que consiste en la asignación de nuevos horarios para cada sector. Para este proceso, se propone el uso de variables binarias introducidas en la función objetivo en combinación con los pesos para cada uno de los criterios por sector ya analizados.

Estas variables binarias, que son las variables de decisión del problema, se recogen en una matriz  $V$  de tamaño  $m \times n$ . El valor de 1 en la matriz indica el inicio del periodo de suministro del sector.

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \dots & v_{mn} \end{pmatrix}, \quad (7.27)$$

$v_{kq}$  es binario,  $\forall k = 1, 2, \dots, m \wedge q = 1, 2, \dots, n$

$$v_{kq} = \begin{cases} 1 & \text{inicio del período de suministro} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases},$$

donde:

$m$  = número total de horas o periodos del día,

$n$  = número total de sectores de la red.

Por razones técnicas y económicas, generalmente, para cada sector se tiene un sólo periodo de suministro de agua por día. Esto hace que exista únicamente una entrada distinta a cero en cada columna de  $V$ . Esta condición es incluida entre las restricciones del problema detallado más adelante.

El proceso de reasignación de horarios de suministro debe considerar el movimiento en bloque de todo el tiempo de suministro para un sector  $j$ , independientemente de su extensión; para este fin se propone el uso de la matriz de horarios  $U^{(j)}$  (Ilaya-Ayza et al., 2016b).

La matriz  $U^{(j)}$ , es una matriz circulante binaria de tamaño  $m \times m$ , definida por el vector  $u^{(j)}$ .

$$u^{(j)} = (1, \dots, 1, 0, \dots, 0), \quad (7.28)$$

$$U^{(j)} = \begin{pmatrix} u_1 & u_2 & u_3 & \cdots & u_m \\ u_m & u_1 & u_2 & \cdots & u_{m-1} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ u_3 & \cdots & u_m & u_1 & u_2 \\ u_2 & \cdots & u_{m-1} & u_m & u_1 \end{pmatrix}, \quad (7.29)$$

Donde la cantidad de unos está definida por  $h_j$ , que es el número de periodos (por lo general horas) de suministro para el sector  $j$ .

Por ejemplo para  $m = 12$  y  $h = 4$ :

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7.30)$$

Se tienen tantas matrices  $U$  como sectores tenga la red de suministro; las matrices difieren en la duración del periodo de suministro, es decir, en el número de unos de cada una de sus filas.

Estas matrices permiten generar los vectores de horarios de suministro ( $X_n$ ). Para cada sector ( $j$ ), se usa la matriz de horarios correspondiente ( $U^{(j)}$ ).

$$\begin{aligned} X_1 &= \left( \sum_{i=1}^m v_{i1} \cdot u_{i1}^{(1)}, \sum_{i=1}^m v_{i1} \cdot u_{i2}^{(1)}, \dots, \sum_{i=1}^m v_{i1} \cdot u_{im}^{(1)} \right) = (x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}) \\ X_2 &= \left( \sum_{i=1}^m v_{i2} \cdot u_{i1}^{(2)}, \sum_{i=1}^m v_{i2} \cdot u_{i2}^{(2)}, \dots, \sum_{i=1}^m v_{i2} \cdot u_{im}^{(2)} \right) = (x_{12}, x_{22}, \dots, x_{m2}) \\ &\vdots \\ X_n &= \left( \sum_{i=1}^m v_{in} \cdot u_{i1}^{(n)}, \sum_{i=1}^m v_{in} \cdot u_{i2}^{(n)}, \dots, \sum_{i=1}^m v_{in} \cdot u_{im}^{(n)} \right) = (x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{mn}) \end{aligned} \quad (7.31)$$

Multiplicando el volumen por hora ( $Vs_j$ ) por el vector de horarios de suministro  $X_n$  correspondiente, se calcula el volumen suministrado a cada sector en el periodo correspondiente, representado por el vector  $B_j$ .

$$\begin{aligned} B_1 &= Vs_1 \cdot (x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}) = (b_{11}, b_{21}, \dots, b_{m1}) \\ B_2 &= Vs_2 \cdot (x_{12}, x_{22}, \dots, x_{m2}) = (b_{12}, b_{22}, \dots, b_{m2}) \\ &\vdots \\ B_n &= Vs_n \cdot (x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{mn}) = (b_{1n}, b_{2n}, \dots, b_{mn}) \end{aligned} \quad (7.32)$$

Es importante dar prioridad al horario de suministro actual. Es decir, el horario actual es el mejor, por lo tanto se mantiene igual, a menos que se encuentre un nuevo horario óptimo con relación a los objetivos buscados. Para cumplir esta condiciones, se requiere de una matriz binaria  $S$   $m \times n$ , donde se incorporan los horarios de suministro actuales para cada uno de los sectores.

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & \dots & s_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & \dots & s_{mn} \end{pmatrix}, \quad (7.33)$$

$s_{ij}$  es binario,  $\forall i = 1, 2, \dots, m \wedge j = 1, 2, \dots, n$

$$s_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{hora con suministro de agua} \\ 0 & \text{hora sin suministro de agua} \end{cases}$$

El horario de suministro actual de cada uno de los sectores es definido en los vectores  $S_k$ ,  $k = 1, \dots, n$ .

$$\begin{aligned} \text{Vector que representa el horario del sector 1: } S_1 &= (s_{11}, s_{21}, \dots, s_{m1}) \\ \text{Vector que representa el horario del sector 2: } S_2 &= (s_{12}, s_{22}, \dots, s_{m2}) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (7.34)$$

Vector que representa el horario del sector  $n$ :  $S_n = (s_{1n}, s_{2n}, \dots, s_{mn})$ .

### 7.7.1. Problema de optimización

El objetivo principal del problema de optimización es maximizar la calidad de servicio en términos de: 1) mejorar las presiones de suministro, 2) reducir el número de usuarios afectados por el cambio de horarios, 3) modificar los horarios de los sectores con menor número de horas de suministro y 4) facilitar las tareas de operación de la red para la empresa de agua.

Estos objetivos específicos ingresan en la parte principal de la función objetivo, a través de la maximización de la suma de todas las entradas del producto de los vectores  $X_j$  por los pesos asociados a los sectores y cada una de las variables consideradas.

Asimismo, deben ser alcanzados otros objetivos adicionales. En primer lugar, con el fin de minimizar el número de cambios con respecto a la configuración de horarios actual, se incluye un término que busca adherirse lo más que se pueda a este horario.

Es necesario también incluir en la función objetivo la información del volumen de agua que ingresa al depósito en cada hora; por lo tanto, se priorizan las horas en las cuales ingresa mayor cantidad de agua.

Por último, existe también la posibilidad de la presencia de sectores que operan en cascada (Lambert & Hirner, 2000). Para lo cual, se incluye un término  $s_{ix} \cdot x_{iy}$  que condiciona el horario de aquellos sectores que se encuentran en cascada, pues este término adopta un valor de cero cuando el horario del sector en cascada no coincide con el horario del sector aguas arriba.

Estos elementos permiten configurar el problema de optimización. La función objetivo completa se obtiene añadiendo todos los términos correspondientes a estos objetivos. El problema de optimización es enunciado como:

Maximizar:

$$\sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^n wp_j \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^n wu_j \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^n wh_j \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^n wo_j \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^n s_{ij} \cdot x_{ij} + t_i \cdot \sum_{j=1}^n x_{ij} + s_{ix} \cdot x_{iy} \right), \quad (7.35)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m v_{i1} = 1; \quad \sum_{i=1}^m v_{i2} = 1; \quad \dots; \quad \sum_{i=1}^m v_{in} = 1, \quad (7.36)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{1j} \leq SS; \quad \sum_{j=1}^n x_{2j} \leq SS; \quad \dots; \quad \sum_{j=1}^n x_{mj} \leq SS, \quad (7.37)$$

$$\sum_{i=1}^n b_{i1} \leq VS; \quad \sum_{i=1}^n b_{i2} \leq VS; \quad \dots; \quad \sum_{i=1}^n b_{mi} \leq VS, \quad (7.38)$$

donde:

$t_i$  = factor o peso que depende del volumen de ingreso al depósito,

$s_{ix}$  = hora de suministro de un sector en cascada,

$x_{iy}$  = volumen definido en un periodo para un sector en cascada,

$V_i$  = Volumen de ingreso al depósito en cada periodo.

La primera restricción limita la cantidad de inicios del periodo de suministro por día para cada uno de los sectores a 1; de esta forma cada sector solamente tiene un periodo de suministro.

Se puede limitar el número de sectores que pueden trabajar en simultáneo ( $SS$ ), con el fin de reducir el caudal pico o para mejorar las tareas de operación.

La restricción más importante en el proceso de optimización es la relacionada con el volumen de salida del depósito ( $VS$ ). Este valor permite reorganizar el horario de cada sector y encontrar escenarios con mejores condiciones de servicio.

Modificando las restricciones, se definen escenarios, con una curva de suministro modificada, en base a la cual es posible calcular el nuevo volumen de regulación del depósito.

## 7.8. Verificación hidráulica

Tras el proceso de selección de horarios, en caso de contar con el modelo matemático de la red, las soluciones deben ser validadas utilizando un simulador hidráulico. Para las simulaciones hidráulicas de la red puede utilizarse EPANET 2 (Rossman, 2000) modificado para una simulación en PDD por Pathirana (2010) o WATERCAD, que también cuenta con un componente para realizar el cálculo PDD (Bentley Systems, 2009).

La modelización y simulación de la red utilizando DDA es difícil debido a la presencia de los períodos sin suministro (Ingeduld et al., 2006) y la presencia de depósitos domiciliarios. En consecuencia, para la verificación hidráulica de la hora de mayor consumo de los períodos con suministro, con la red presurizada, se utiliza el modelo PDD.

El cálculo hidráulico establece cómo mejoran las presiones con el cambio de horario de los sectores, aunque, no solamente mejoran las presiones, sino que también mejoran los volúmenes suministrados debido a que la demanda depende de la presión. Las presiones excesivas, resultado de la mejora, pueden ser gestionadas posteriormente a través de válvulas reductoras de presión.

En cada uno de los escenarios, la altura de agua en el depósito se modifica, lo cual puede afectar al cálculo de las presiones en función de las dimensiones y configuración del tanque.

## 7.9. Elección del escenario óptimo

La presente metodología permite generar varios escenarios, usando principalmente la restricción del volumen de salida del depósito. La elección de la configuración de horarios definitiva, dentro del conjunto de escenarios óptimos aquel que sea más favorable, o la elección del nivel de mejora del sistema son tareas que corresponden a la empresa de agua que gestiona la red con suministro intermitente.

Cuando se tienen valores pequeños de la restricción del volumen de salida, para limitar el caudal pico, gran cantidad de sectores tienden a modificar su horario de suministro, lo cual puede incidir en costes de operación elevados y molestias de la población; sin embargo, también puede

existir una nueva política en el suministro de toda la zona con un escenario en el cual se modifiquen los horarios de la mayoría de los sectores, buscando el beneficio de toda la población.

Indudablemente, la elección e implementación del cambio de horarios de suministro, debe ir acompañada de un proceso de socialización, mostrando las mejoras en el servicio, con el fin de evitar futuros problemas sociales.

# **CAPÍTULO 8. Análisis de la ampliación de la capacidad de la red y el incremento de fugas tras la transición a suministro continuo**

---

## **8.1. Introducción**

Los sistemas de abastecimiento de agua se enfrentan a muchos desafíos durante los últimos decenios debido al rápido crecimiento de la población, así como el impacto potencial del cambio climático. Muchos sistemas tienen que ser ampliados para proporcionar las demandas suficientes y adecuadas para el crecimiento de la población y/o la industria. Por lo tanto, la forma de evaluar y/o aumentar la capacidad del sistema es de hecho muy importante, y se constituye en un ámbito de investigación en el área de suministro de agua potable.

Durante el tiempo de vida de una red, ésta soporta diferentes estados de carga, causados principalmente por: el incremento de la rugosidad en las paredes de la tubería, la rotura de componentes, la expansión del área de servicio y el aumento de conexiones domiciliarias que incrementan la demanda de diseño. Estas exigencias requieren rehabilitar o ampliar la red para mejorar su eficiencia.

El crecimiento poblacional a nivel mundial apunta al incremento de la demanda de agua. Por lo tanto, es imprescindible que expertos y responsables políticos sepan responder con un dimensionamiento adecuado de los sistemas de agua potable (Alhassan et al., 2015). Como resultado del crecimiento demográfico, se construyen nuevas viviendas e infraestructura pública, produciendo la expansión vertical u horizontal de las ciudades. El crecimiento vertical exige la rehabilitación y refuerzo de la red de suministro de agua, mientras que el crecimiento horizontal requiere la expansión o ampliación del sistema (Neelakantan et al., 2014).

Uno de los elementos clave, que incide de forma crucial en la calidad del servicio de agua potable, es la red de distribución. Kumar & Managi (2010), tras evaluar el desempeño de 20 empresas de suministro de agua en India, establecen que la falta de agua no solamente se debe a la falta física del recurso, sino también a la falta de eficiencia de las redes de distribución. Esta ineficiencia se traduce en efectos negativos en la salud de la población y bienestar social.

Asimismo, debe considerarse que el coste del riesgo para la salud de los usuarios, en términos de ingresos, medicamentos y otras formas de inconvenientes, es mucho mayor al coste de sustituir tuberías deficientes (Sargaonkar et al., 2013) que perjudican o no permiten el suministro continuo.

Una de las razones para que las empresas de agua opten por el suministro intermitente es la falta de capacidad de la red, como ya se analizó en el *capítulo 3*. Por lo tanto, la respuesta racional a esta deficiencia es el incremento de capacidad de la red, lo cual se constituye en la primera medida de la propuesta a largo plazo para convertir un sistema con suministro intermitente a suministro continuo.

Generalmente, la capacidad insuficiente de las redes con suministro intermitente es imperceptible, debido a que se logran cubrir los caudales demandados a través de la sectorización, la presencia de depósitos domiciliarios y la diferenciación en los horarios de suministro.

Cuando un proceso de expansión o ampliación de la red no es planificado correctamente, se puede generar un efecto contraproducente de reducción de la capacidad de la red. Si se acentúa esta reducción de la capacidad de la red, resulta dificultoso salir de este estado; este escenario impone inicialmente la reducción de la calidad del servicio y, posteriormente, si se continúa con la gestión inadecuada, puede llegarse a un suministro intermitente.

El proceso de ampliación de la capacidad de la red propuesto en la presente tesis parte del conocimiento del caudal máximo teórico y su modificación, a través de actuaciones en la infraestructura que permitan reducir la pendiente de la curva de consigna. Es necesario que la red deba contar con la capacidad suficiente para transportar y distribuir el agua con la calidad (considerando también a la presión como criterio de calidad) y en la cantidad apropiada.

La infraestructura debe ser mantenida en condiciones de operación necesarias para garantizar los niveles de servicio deseados, por lo que no es posible la sustitución o rehabilitación de forma global. La infraestructura debe ser rehabilitada gradualmente, con intervenciones más o menos localizadas en sus componentes, para que no pongan en riesgo el servicio y se garantice una mayor vida de la infraestructura (Alegre & Covas, 2010).

La escasez económica y la mala gestión (Totsuka et al., 2004), son dos de las causas principales del origen de los sistemas con suministro intermitente; en estos escenarios se pueden plantear soluciones de mejora graduales, dividiendo el coste total de toda la infraestructura necesaria para la ampliación de la capacidad de la red en etapas, limitadas por el presupuesto disponible de la empresa de agua, pues un coste elevado inicial puede ser una causa limitativa para proceder con las mejoras. Debe buscarse un crecimiento de la red que sea económico y fiable.

Cuando una red necesita ampliación, es práctica común el uso de técnicas de optimización con el objetivo de encontrar la solución de menor coste con las presiones satisfechas. Sin embargo, estos procesos suelen definir el conjunto global de tuberías a modificar sin priorizar las acciones cuando un proyecto se divide en etapas.

En este capítulo, se propone el uso del caudal máximo teórico, el cual permite reducir el espacio de búsqueda a una cantidad igual al número de tramos evaluados multiplicada por el número de diámetros candidatos y, también, el número de etapas. Esta ventaja permite plantear la sustitución estratégica de tuberías, en un marco de escasez económica, por medio de un algoritmo voraz que consigue elegir la opción óptima en cada una de las etapas, tratando de llegar a una solución general óptima. De esta forma, se define un calendario o cronograma de las etapas para la modificación de la red, lo cual da lugar a un proceso de transición a suministro continuo más eficiente.

Otra ventaja de la metodología propuesta es la posibilidad de la detección de cuellos de botella en la red, pues se conoce la influencia de cada uno de los tramos en la capacidad total de la red. Esta

metodología, se constituye en una aplicación importante y novedosa de la curva de consigna, herramienta utilizada actualmente para la gestión de los sistemas de agua potable.

El inconveniente más importante de la ampliación de capacidad de la red para el proceso de transición a suministro continuo es el incremento de las fugas. Este es producido por el incremento de las horas de suministro y por las mejoras en la presión de servicio. Este caudal adicional debe ser transportado por la red de suministro; por lo tanto, la misma debe tener la capacidad suficiente para llevar el caudal demandado por la población más el caudal que se pierde debido a las fugas, en condiciones que garanticen una presión suficiente en los puntos de consumo. Si este problema no es abordado apropiadamente, se puede llegar a un sobredimensionamiento innecesario de la red y la pérdida de agua que limitarían las posibilidades de tener suministro continuo. En los siguientes acápite, se proponen también formas de enfrentar a estos inconvenientes.

## 8.2. Rehabilitación

Se entiende por rehabilitación, a aquella intervención destinada a proporcionar un desempeño compatible con las exigencias o condiciones actuales (Abreu & Lucas, 2002). Concretamente, para sistemas de distribución de agua potable, la IWA define la rehabilitación como cualquier intervención física que prolongue la vida de un sistema existente o mejore su desempeño estructural, hidráulico o de calidad de agua (Alegre et al., 2006).

Las causas principales que ponen en riesgo un servicio en condiciones adecuadas son: el desgaste normal de la infraestructura y los equipos, la corrosión de tuberías, los estados de carga imprevistos, las deficiencias en la construcción e instalación (Walski & Male, 2002), las deficiencias en la operación y mantenimiento del sistema, además de factores externos (Alegre & Covas, 2010).

Las solicitudes del consumo o de presión pueden evolucionar en forma distinta a la prevista en la fase de proyecto; esta situación puede requerir intervenciones de rehabilitación para mejorar el desempeño del sistema, ajustando la capacidad de los componentes existentes. Un ejemplo claro de la modificación de los estados de carga es el suministro intermitente en sistemas que fueron diseñados para trabajar con suministro continuo; en éstos la capacidad de la red se va reduciendo imperceptiblemente, por lo que se requieren acciones de rehabilitación en caso de buscar restituir el suministro continuo.

Tabla 8.1. Relación entre el tipo de componente y las principales motivaciones para la rehabilitación del sistema

Motivaciones de la necesidad de rehabilitación	Envejecimiento natural de los componentes	Alteración de los objetivos de servicio	Deficiencias de concepción y proyecto	Deficiencias de construcción	Deficiencias de materiales y de equipamiento	Deficiencia de operación	Deficiencias de mantenimiento	Causas externas
<b>Construcción civil</b>								
Edificios y reservorios	•••	••	•	••	•	•	••	•
Conductos	•••	•	••	••	•	•	•	••
<b>Equipamiento</b>								
Bombas	•••	••	•	•	•	•	••	•

Válvulas	●●●	●	●	●	●	●	●●●	●
Equipamiento eléctrico	●●●	●	●	●	●	●	●●	●
Equipamiento de control	●●●	●	●●	●	●	●	●●	●

Referencias: ● causa poco frecuente; ●● causa frecuente; ●●● causa muy frecuente

Fuente: Alegre & Covas (2010)

La rehabilitación está asociada a las necesidades de corregir anomalías o la reducción del desempeño previsto, que pueden ser de naturaleza estructural (degradación del material y la existencia de fisuras), hidráulica (falta de capacidad hidráulica, sustitución de componentes con otros de mayor capacidad), de calidad del agua (problemas de color o turbidez del agua) o de operación y mantenimiento (establecer zonas de medición, rehabilitación o instalación de válvulas) (Alegre & Covas, 2010).

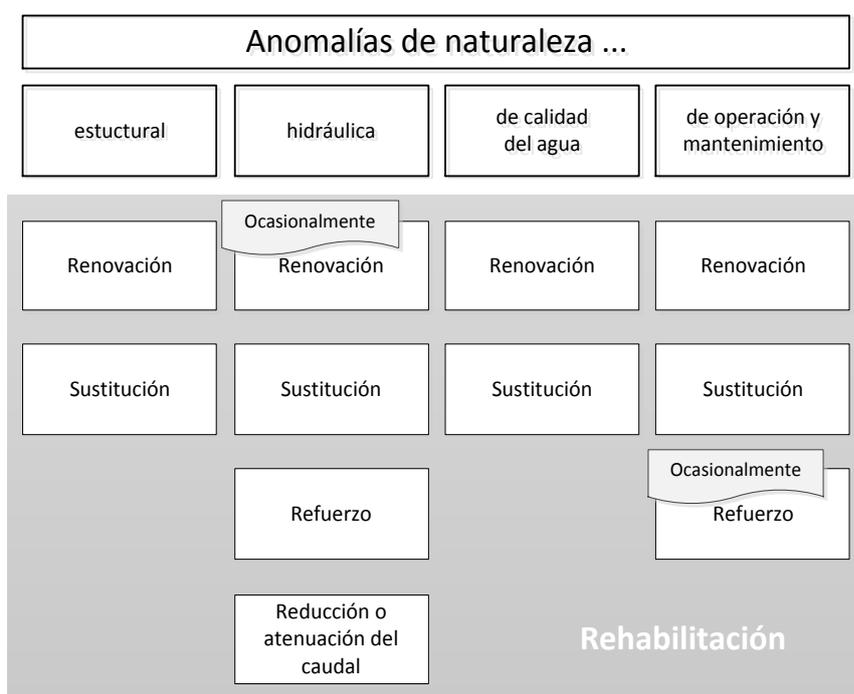


Fig. 8.1. Acciones de rehabilitación en función de la naturaleza de las anomalías

Fuente: Alegre & Covas (2010)

Estas acciones de rehabilitación son:

- La renovación, que es una intervención de rehabilitación sobre un componente del sistema existente, para lograr su aprovechamiento funcional y que no aumenta la capacidad de uso original.
- Aunque la reparación puede o no ingresar en las acciones de rehabilitación, constituye una intervención puntual correctora, que rectifica una anomalía localizada. La reparación corresponde a un caso específico de renovación.
- La sustitución o reemplazo es una acción que permite rehabilitar un componente del sistema; implica la desactivación funcional del mismo y la construcción o instalación de

un nuevo componente; este último puede tener capacidades semejantes o distintas a las existentes.

- Las acciones de refuerzo: son intervenciones de rehabilitación hidráulica sobre un componente del sistema existente; implican la construcción de un componente adicional que complementa la capacidad del componente existente o constituye una alternativa a este.

La ampliación de la capacidad de la red está relacionada con la rehabilitación hidráulica, por lo que se recurre a la sustitución o refuerzo de los componentes del sistema, en este caso tuberías.

Debido a que los sistemas con suministro intermitente, aparte de tener problemas hidráulicos, tienen problemas estructurales y de calidad del agua, se considera que la sustitución de tuberías será más efectiva que las acciones de refuerzo en el proceso de transición a suministro continuo.

### **8.3. Ampliación de la capacidad de la red en sistemas con suministro intermitente**

El suministro intermitente es causado por la extensión de la red de distribución más allá de su capacidad hidráulica (McIntosh, 2003). Por lo tanto, es necesario analizar la necesidad de ampliación de la capacidad de la red.

Según Sridhar (2013), en India los municipios con recursos suficientes suelen reemplazar todas las tuberías envejecidas, como parte del proceso de transición a suministro continuo y ampliación de la capacidad de la red. Esta situación puede convertirse en una seria limitante en sistemas con escasez económica. Sin embargo, es necesario implementar un plan de rehabilitación y renovación de la red tras el proceso de transición a suministro continuo (Franceys & Jalakam, 2010), con el fin de reducir las pérdidas reales producidas por el incremento de las horas de suministro y la presión.

Gomes et al. (2012) plantean una metodología de sectorización que permite reforzar los tramos de ingreso a los sectores con el fin de ampliar su capacidad. Aunque esta técnica no fue diseñada para sistemas con suministro intermitente, resulta orientativa para los procesos de ampliación.

Neelakantan et al. (2014) proponen el mejoramiento y la expansión de la red de distribución en un sistema con suministro intermitente, por medio de la optimización basada en la evolución diferencial, que permite encontrar el diámetro óptimo para los tramos de la red. Sugieren que los problemas que se deben resolver en el proceso de ampliación de la capacidad de la red son:

- El diseño de una nueva red
- La modificación o ampliación de la red existente
- La operación de la red existente

Generalmente, la ampliación de la capacidad de la red se realiza a través de procesos de optimización, que establecen un conjunto de tramos global que se deben reforzar o reemplazar. Sin embargo, en un proceso de transición gradual es necesario conocer el orden o la prioridad en el reemplazo de tuberías, con el objetivo de establecer un cronograma de trabajo. En los siguientes acápite se describe una metodología que persigue este fin.

#### 8.4. Caudal máximo teórico

El caudal máximo teórico ( $Q_{m\acute{a}x}$ ), es un instrumento que permite cuantificar la capacidad de la red. Por lo tanto, su uso es imprescindible para el planteamiento de un proceso de ampliación de la capacidad de la red y permite cuantificar el logro de los objetivos.

El incremento de la capacidad de la red es equivalente al incremento del caudal máximo teórico. A continuación se analizan las opciones existentes para el incremento de la capacidad de la red, en función del tipo de fuente de suministro y las modificaciones en la red o en la presión de servicio.

En sistemas alimentados por depósitos, el caudal máximo teórico puede incrementarse por medio de mejoras, sustituciones, refuerzos y a través de mayor conectividad de la red; de esta forma, se reduce la pendiente de la curva de consigna (Fig. 8.2). Se debe considerar que la energía disponible de ingreso presenta poca variación, solo la que le permite la altura interna del depósito. El incremento de la capacidad de la red desde la fuente se produce con la modificación de la cota del depósito; es decir, se debe construir un nuevo depósito que permita disponer de una mayor altura manométrica (Fig. 8.3).

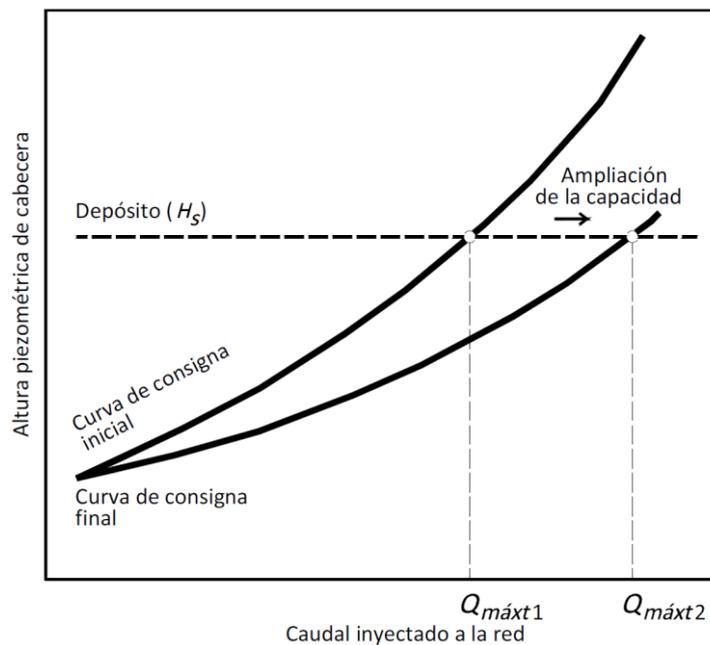


Fig. 8.2. Incremento de la capacidad de la red con la modificación de la red, sistema alimentado por depósitos

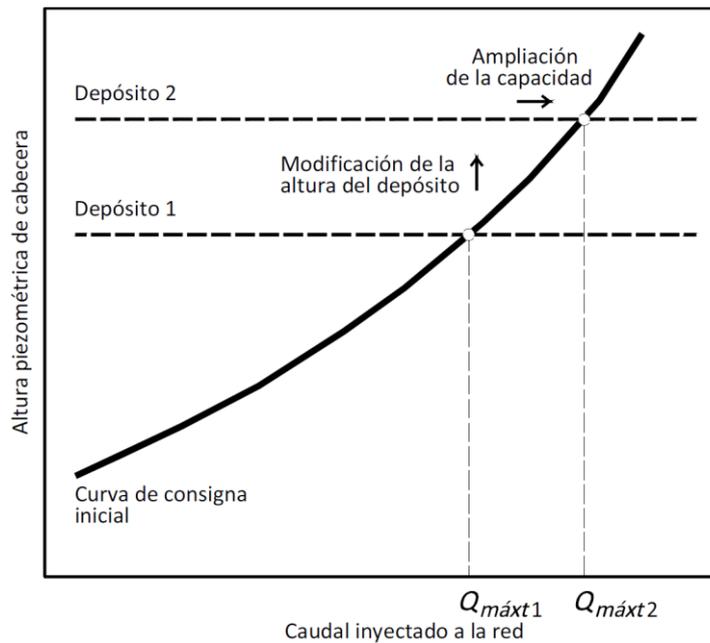


Fig. 8.3. Incremento de la capacidad de la red con la modificación de la fuente de suministro, sistema alimentado por depósitos

En los sistemas de suministro alimentados directamente por bombeo, existen dos opciones para ampliar el caudal máximo teórico. La primera implica mejoras, sustituciones o refuerzos en la red, que modificarán la pendiente de la curva de consigna (Fig. 8.4), y la segunda forma se produce mejorando el equipo de bombeo; la nueva curva de bombeo, con caudales y alturas manométricas mayores, alcanzará un valor del caudal máximo teórico más grande (Fig. 8.5).

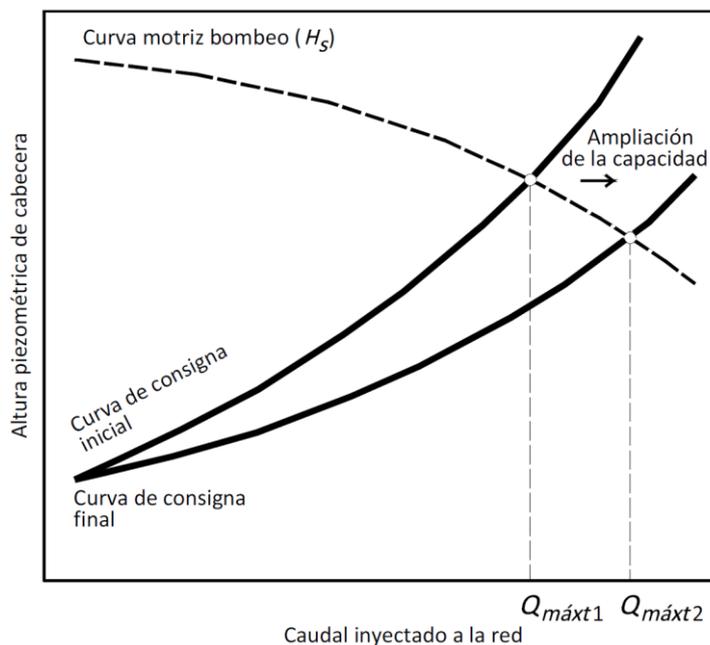


Fig. 8.4. Incremento de la capacidad de la red con la modificación de la red, sistema alimentado por bombeo

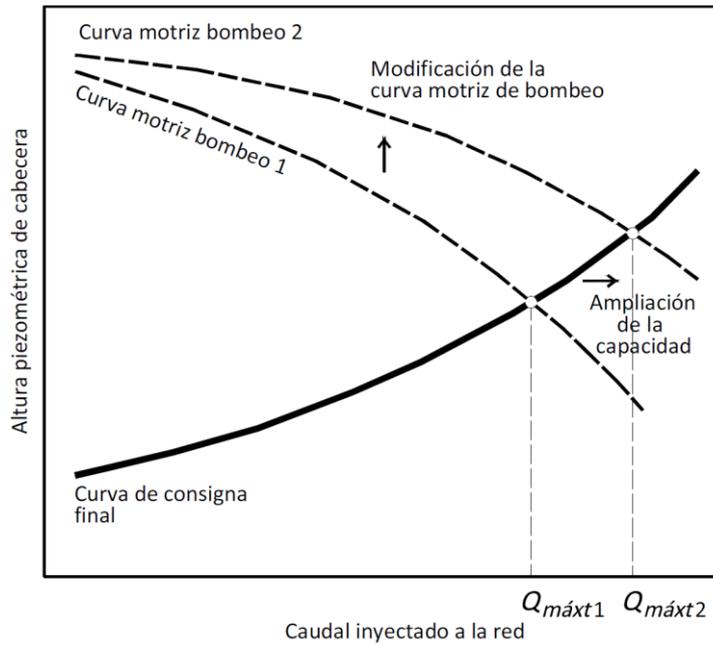


Fig. 8.5. Incremento de la capacidad de la red con la modificación de la curva motriz de bombeo, sistema alimentado por bombeo

Uno de los inconvenientes de la modificación de la curva motriz de bombeo, agregando más equipos de bombeo o a través del cambio por bombas de mayor capacidad, es el incremento de la presión en horas en las cuales la demanda es baja; en consecuencia, se produce un nivel de fugas mayor. En este caso, es recomendable el uso de variadores de frecuencia en las bombas que permitan el ajuste de la curva motriz al caudal demandado y a la curva de consigna de la red (Martínez et al., 2009).

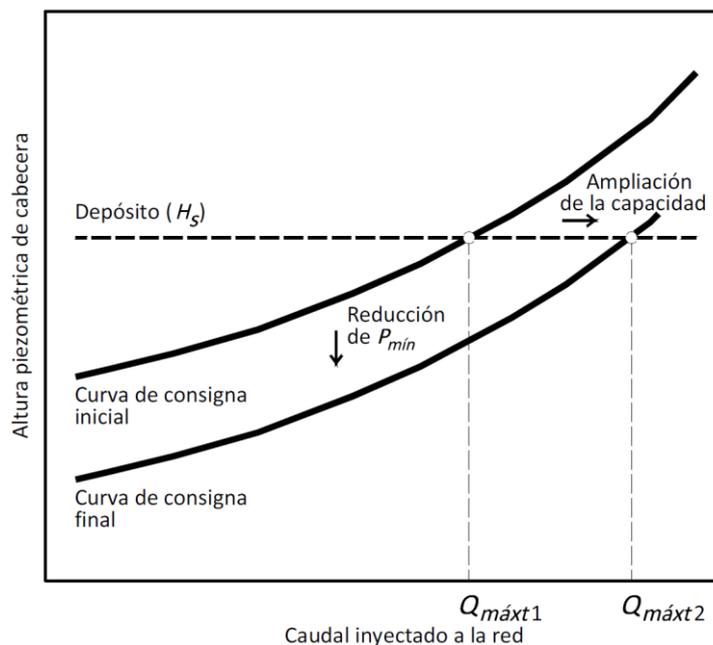


Fig. 8.6. Incremento de la capacidad de la red a través de reducción de la presión de servicio

En sistemas que presentan escasez económica o mala gestión, una forma común de ampliar la capacidad de la red es a través de la reducción de la presión mínima de servicio; en consecuencia, la curva de consigna tenderá a bajar, por lo que el caudal máximo teórico crecerá (Fig. 8.6); sin embargo, las condiciones de servicio no serán las apropiadas (Ilaya-Ayza et al., 2015a), por lo que esta forma de incremento de la capacidad no es la más recomendable.

Básicamente, existen dos formas de acción para aumentar la capacidad de la red: modificaciones en la fuente de suministro o modificación de la red. Los inconvenientes de modificar la curva motriz de la fuente de suministro están relacionados con el incremento de energía y el incremento de la presión en la red en horas de poco consumo, con el consecuente mayor nivel de fugas. Aunque la modificación de la red también producirá incremento de presiones en la red, generando pérdidas de agua, resulta ser ventajosa desde el punto de vista del ahorro asociado a los costes de consumo de energía. En sistemas alimentados por depósitos o reservorios, la modificación de la red suele ser la opción más viable.

El escenario de demanda máxima o caudal máximo teórico está definido solamente por un punto en la curva de consigna; por lo tanto, es un problema de estado estable cuyo valor puede ser identificado numéricamente. Esta condición permite reducir el espacio de búsqueda, al encontrar la solución óptima en cada una de las etapas de ampliación de la capacidad de la red, a una cantidad igual al número de tuberías evaluadas por el número de diámetros candidatos.

En los siguientes acápite, se desarrolla un procedimiento para ampliar la capacidad de la red a través de la modificación de la red, donde el caudal máximo teórico resulta ser fundamental.

## **8.5. Caudal máximo requerido**

En el proceso de ampliación de la capacidad de la red es necesario tener un elemento de referencia, un punto objetivo al que se desea llegar; el caudal máximo requerido cumple con esta función. En el análisis del proceso de transición de suministro intermitente a continuo debe tomarse en cuenta adicionalmente el incremento en las fugas producidas por el incremento en la presión y las horas de suministro; asimismo, deben considerarse las variaciones que ocurrirán en la demanda de agua por parte de los usuarios.

El proceso de ampliación de la capacidad de la red se considera concluido cuando el caudal máximo requerido es alcanzado o superado por el caudal máximo teórico. Esta situación asegura que la nueva curva de consigna, de la red modificada con tramos con nuevos diámetros, permite un suministro con las condiciones adecuadas.

## **8.6. Proceso de ampliación de la capacidad de la red**

En acápite anteriores, se analizan las diferentes posibilidades de ampliación de la capacidad de la red. En la presente tesis se plantea la modificación de la red, como una de las formas más viables de acción para resolver los problemas relacionados con la falta de capacidad de la red.

Debido a que los sistemas con suministro intermitente, aparte de tener problemas hidráulicos, tienen problemas estructurales (Dahasahasra, 2007), (Charalambous, 2001), (Charalambous, 2012a) y de calidad del agua (Kumpel & Nelson, 2013), (Kumpel & Nelson, 2014), se considera que la sustitución será más efectiva que las acciones de refuerzo en el proceso de transición a suministro continuo.

Cuando se diseña o se rehabilita un sistema de agua potable, es común usar métodos de prueba y error o herramientas formales de optimización (Lansley, 2002). La presencia de variables discretas, como los diámetros de las tuberías, y la relación no lineal entre el caudal y la pérdida de carga, hacen que la optimización del diseño o rehabilitación de redes sea una tarea compleja (Vasan & Simonovic, 2010). La optimización en el diseño o rehabilitación de sistemas de agua potable está basada en la minimización del coste, incluyendo las restricciones relacionadas con presiones mínimas en los nudos de consumo y restricciones en el tamaño de tuberías. Adicionalmente, se incluye la maximización de las prestaciones hidráulicas del sistema, fiabilidad de la red, resiliencia (Todini, 2000), redundancia y calidad del agua (Vasan & Simonovic, 2010). Generalmente, estos procesos de optimización definen un conjunto global de las tuberías a sustituir, sin establecer un orden o prioridad para el reemplazo.

Para ampliar la capacidad de la red se propone un procedimiento basado en el caudal máximo teórico; de esta forma, cuando la nueva red de suministro adquiera una curva de consigna que alcance o supere el caudal máximo requerido para la ampliación, se habrá logrado el objetivo.

La propuesta permite configurar una sustitución estratégica de tuberías: aquellas que resultan críticas para la capacidad de la red y cuyo reemplazo implica los menores costes. El proceso está limitado a las condiciones económicas de la empresa que administra el sistema intermitente; por lo tanto, es necesaria una actuación por etapas, las cuales deben organizarse hasta llegar a ampliar la capacidad total de la red. De esta forma, a través del uso de un algoritmo voraz, se define un calendario o cronograma de las etapas para la modificación de la red, lo cual da lugar a un proceso gradual de transición a suministro continuo más eficiente.

Gráficamente, el procedimiento se resume en la modificación de la curva de consigna actual hasta alcanzar el punto objetivo o caudal máximo requerido; cada paso del proceso generará una nueva curva de consigna, a través de la modificación del tramo que produce mayor caudal en relación al su coste de renovación.

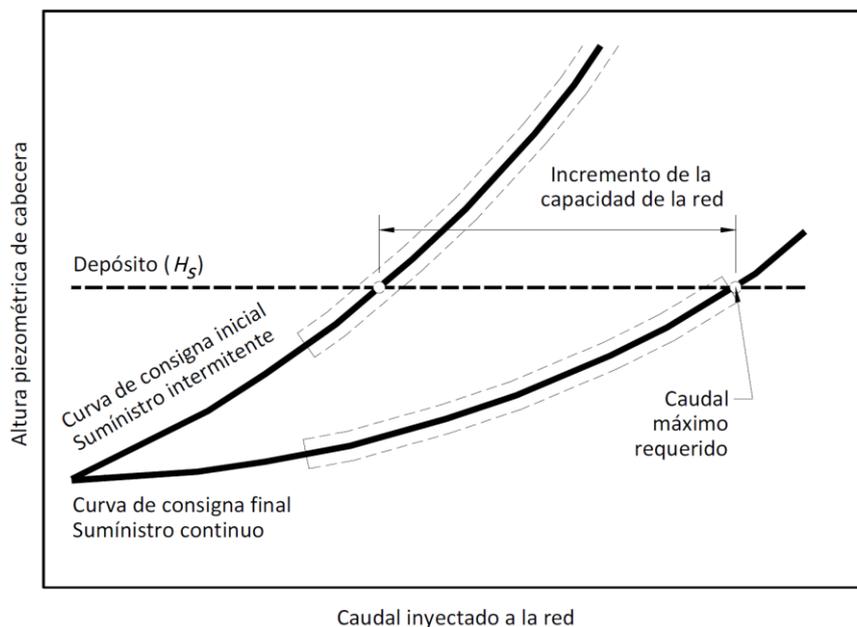


Fig. 8.7. Ampliación de la red de suministro

Generalmente, cuando una red de un sistema con suministro intermitente es evaluada con la curva de consigna para una presión mínima de referencia y asumiendo un suministro continuo, el

resultado es la falta de capacidad en la red. Por lo que la red necesita ser ampliada en su capacidad para lograr el suministro continuo. De esta forma, se asegura que durante el suministro continuo se tengan condiciones de servicio adecuadas, ver Fig. 8.7.

En base a la red actual, cada uno de sus tramos es evaluado tras la modificación o sustitución con un tramo de mayor diámetro; de esta forma, es posible calcular el nuevo caudal máximo teórico producido por este cambio; calculando el incremento en caudal y el coste que implica la renovación del tramo para este diámetro se determina el índice de ampliación.

Tras calcular el índice de ampliación para todo el conjunto de diámetros disponibles para la renovación, se debe elegir el tramo que mayor índice de ampliación haya logrado; esta selección garantiza que el tramo, para un diámetro determinado, es el que permite el mayor incremento del caudal máximo teórico en la red al menor coste, garantizando de esta manera una ampliación de la red bajo el criterio económico.

Este procedimiento debe repetirse hasta superar al caudal máximo requerido, tomando en cuenta que en cada una de las etapas o pasos del proceso, se modifica el diámetro del tramo seleccionado y se mantiene como parte de la solución.

El proceso permite conocer el orden de prioridad para la sustitución de los tramos, lo que permitirá planificar el proceso de ampliación de la capacidad de la red de forma gradual; el coste total podrá ser dividido en etapas en base a esta priorización.

Asimismo, el orden de sustitución de los tramos y las etapas definidas para la transición a suministro continuo permitirá establecer escenarios que irán mejorando las condiciones de servicio paulatinamente; de esta forma, algunos sectores de la red podrán cambiar a suministro continuo antes de que concluya todo el proceso de ampliación.

El proceso de ampliación de la capacidad de la red es detallado en el diagrama de flujo mostrado en la figura 8.8

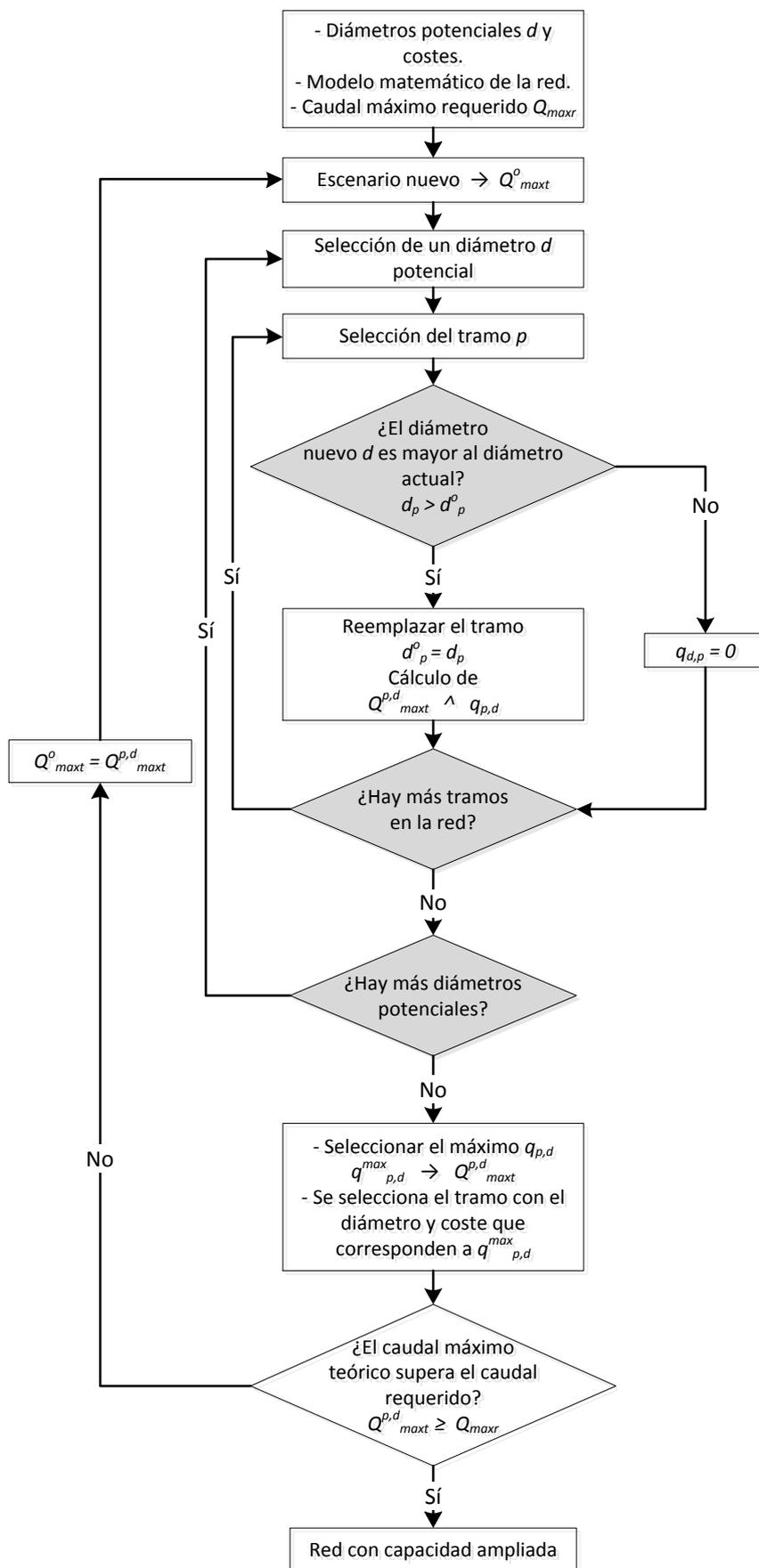


Fig. 8.8. Diagrama de flujo para el proceso de ampliación de la capacidad de la red

### 8.6.1. Costes implicados en la ampliación de la capacidad de la red

Para el funcionamiento correcto de una red de agua potable se consideran básicamente dos costes esenciales: los costes de construcción, costes fijos o costes de capital, asociados a la inversión inicial (Swamee & Sharma, 2008), relacionados con las actividades que se deben ejecutar para que el sistema tenga un pleno servicio; y los costes de explotación, costes variables o costes recurrentes, derivados del uso del sistema.

Tabla 8.2. Clasificación de los costes en una red de agua potable

Coste	Detalle	Características	
De construcción (costes fijos)	Tuberías	-	
	Accesorios	Acoplamientos	
		Anclajes	
		Juntas	
		Valvulería	
	Obra civil	Excavación	
		Relleno	
		Asiento	
		Reposición de asfalto	
		Depósitos	
	Instalaciones	Estaciones de bombeo	
Sistemas de control y regulación			
Seguridad			
De operación (costes variables)	Energéticos	-	
	Mantenimiento	-	
	Personal	-	

Fuente: Pérez (1993)

En el proceso de ampliación de la capacidad de la red, a través de la sustitución de tramos de tubería por otros de mayor capacidad, se consideran solamente costes de tuberías, accesorios y obra civil. En caso de usar tecnología sin zanjas para la sustitución de tuberías, deben considerarse los costes derivados del proceso como: desplazamiento de la maquinaria necesaria, ejecución de excavaciones para la instalación de los equipos y maquinaria, y el uso de equipos de limpieza y control (Pardo, 2010), (Selvakumar et al., 2002).

De forma general, el coste total de las tareas de ampliación de la capacidad de la red está definido por:

$$C_e = \sum_{p=1}^{np} C(d_p) \cdot L_p, \quad (8.1)$$

donde:

$C_e$  = coste total de la ampliación,

$C(d_p)$  = coste por longitud del tramo  $p$  sustituido con diámetro  $d$ ,

$L_p$  = longitud del tramo  $p$  sustituido,

$np$  = número de tuberías sustituidas en la red.

### 8.6.2. Características del modelo matemático de la red

Es importante que la construcción del modelo de la red, aparte de considerar las características topológicas y físicas propias de la red, considere tramos con recorridos homogéneos y representativos del terreno donde está instalada la red; es decir, hay que establecer tramos que tengan características similares como, por ejemplo: el tipo de suelo, pendientes, superficies a reemplazar, u otro tipo de particularidades. Una configuración de este tipo permitirá mayor precisión en el cálculo de los costes de rehabilitación o ampliación de la capacidad de la red.

### 8.6.3. Selección del tramo a modificar

La curva de consigna se modifica desplazándose hacia la derecha cuando se amplían los diámetros de los tramos que se sustituyen en la red. En algunos casos, este movimiento es mayor, generando un mayor incremento en el caudal máximo teórico en aquellos tramos que resultan ser principales para el buen funcionamiento de la red, por lo que puede identificarse aquellos tramos que son cuellos de botella. En otros casos, la curva de consigna no cambia; la modificación de estos diámetros no afecta de forma general a la red, por lo que la sustitución de estos tramos no es conveniente.

La modificación o sustitución de solamente un tramo en el modelo ( $Q_{\text{máx}}^o$ ) genera una nueva curva de consigna y, por consiguiente, un incremento del caudal máximo teórico ( $Q_{\text{máx}}^{p,d}$ ); en ese sentido, en cada una de las etapas de iteración se calcula el incremento de caudal individual para los diámetros candidatos ( $d$ ), con la red original o la modificada en una anterior etapa y el tramo ( $p$ ) estudiado.

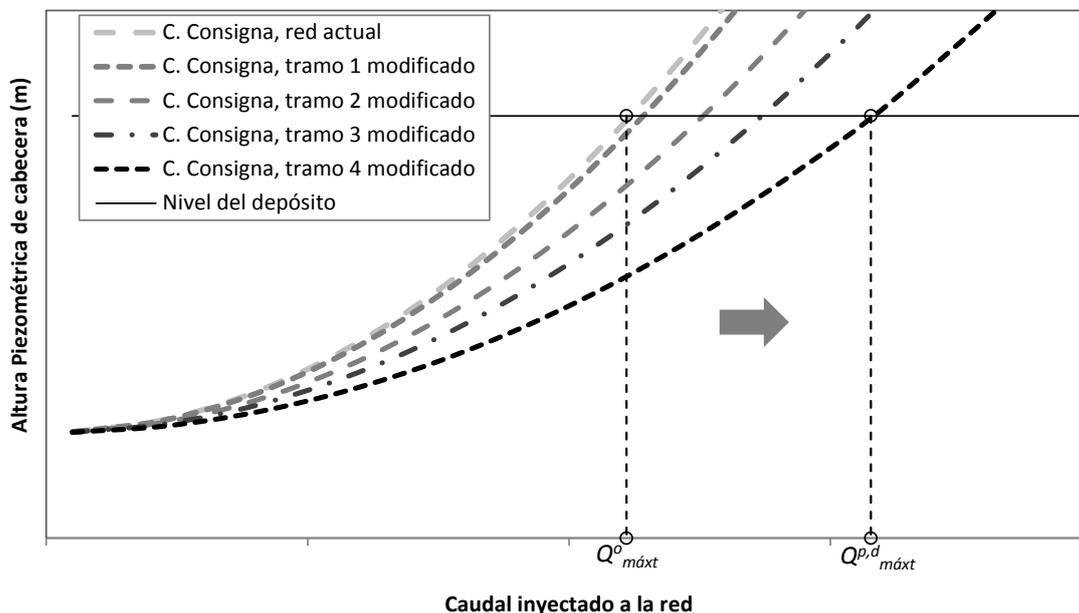


Fig. 8.9. Evolución de la curva de consigna del sistema en el proceso de ampliación de la capacidad de la red

Asimismo, debe considerarse el coste de un conjunto de diámetros potenciales para realizar el cambio o sustitución de los tramos. La relación entre el incremento del caudal y el coste de la sustitución del tramo define el índice de ampliación  $q$ , el cual posee unidades de caudal por unidades monetarias. El uso de este indicador otorga mayor robustez al proceso de selección.

$$q_{p,d} = \frac{Q_{\max t}^{p,d} - Q_{\max t}^o}{C(d_p) \cdot L_p}, \quad (8.2)$$

donde:

$q_{p,d}$  = índice de ampliación, producido por la sustitución del tramo  $p$  con un nuevo diámetro  $d$ ,

$Q_{\max t}^o$  = caudal máximo teórico de la red original o de la red modificada en una etapa anterior,

$Q_{\max t}^{p,d}$  = caudal máximo teórico, tras la sustitución del tramo  $p$  con un nuevo diámetro  $d$ ,

$C(d_p)$  = coste por longitud del tramo  $p$  sustituido con diámetro  $d$ ,

$L_p$  = longitud del tramo  $p$  modificado.

El índice de ampliación es muy útil en la identificación de tuberías que reducen la capacidad de la red. Cuando se trata de ampliaciones en las cuales el incremento de la capacidad es pequeño, este indicador puede llegar a las mejores soluciones.

Una forma de seleccionar los tramos a sustituir, priorizando el caudal de incremento de la red sobre el coste, es elevando a un exponente  $n$  la diferencia de caudal del índice de ampliación; de esta forma, inicialmente se modificarán los tramos a un diámetro mayor, lo cual más adelante permitirá compensar el coste inicial con la sustitución por tramos de diámetro más pequeño.

$$q_{p,d}^n = \frac{(Q_{\max t}^{p,d} - Q_{\max t}^o)^n}{C(d_p) \cdot L_p}, \quad (8.3)$$

donde:

$n$  = exponente del incremento de la capacidad de la red.

Al utilizar el índice de ampliación propuesto en cada una de las etapas de ampliación, se identificará a la tubería que corresponde modificar o reemplazar: aquella que presente el mayor valor de índice de ampliación.

Cuando se tiene presupuesto limitado para realizar mejoras y ampliación de la red, puede ser muy útil obtener el índice de ampliación de cada tramo para priorizar las inversiones; aunque, si el objetivo es llegar a un caudal máximo determinado (punto objetivo), debe evaluarse todo el proceso, pues pueden existir tramos que necesiten ampliarse más de una vez, es decir, tramos que sean ventajosos varias veces por sus características, por lo que la priorización de las obras o la renovación de los diámetros deberá corregirse en función del diámetro más grande alcanzado por cada uno de los tramos a renovar, dentro de las etapas de selección.

## 8.7. Identificación de cuellos de botella en la red

La metodología propuesta en la presente tesis para la ampliación de la capacidad de la red tiene una ventaja adicional: la posibilidad de establecer los tramos que se constituyen como cuellos de botella de la red.

En cada una de las etapas del proceso de ampliación de la capacidad de la red, los tramos son evaluados usando el índice de ampliación  $q$  (ecuación 8.3); por lo tanto, se conoce el impacto del cambio de diámetro de cada tubería y es posible la identificación de aquellos tramos que más restringen al incremento del caudal máximo teórico de la red.

Generalmente, en la evaluación de tramos, los primeros incrementos del diámetro producen los mayores incrementos del caudal máximo teórico: a diámetros más grandes el caudal máximo teórico tiende a mantenerse igual. Este comportamiento asintótico permite definir la “*capacidad incremental máxima*” (ver Fig. 8.10) para cada uno de los tramos, pues la red no puede incrementar más su capacidad con las modificaciones en el tramo evaluado.

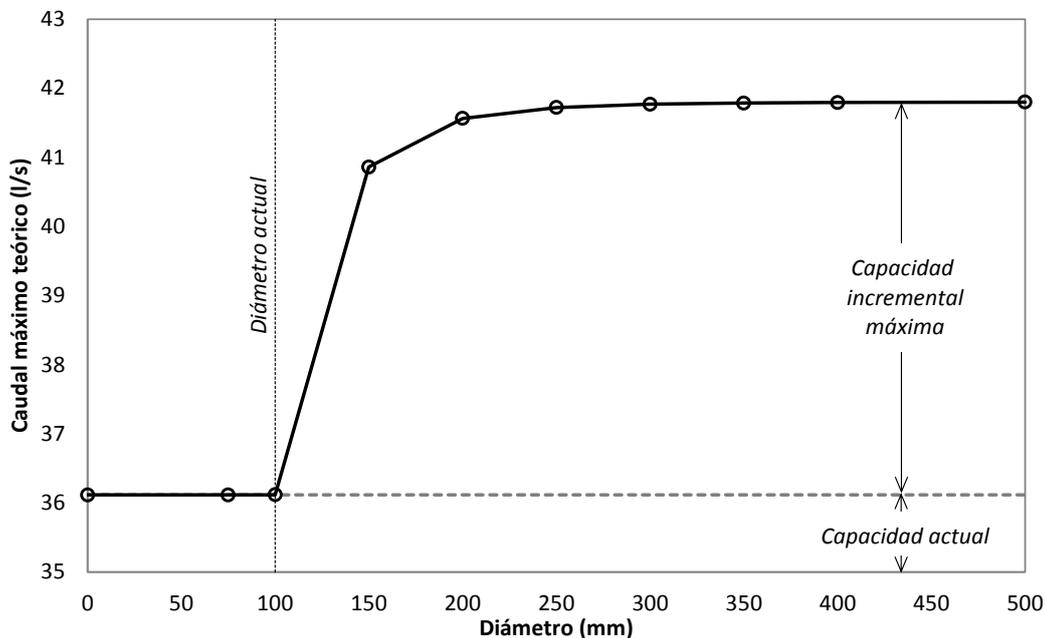


Fig. 8.10. Evaluación del incremento de la capacidad con el incremento del diámetro en un tramo de la red

Si se comparan cada uno de los tramos de la red, es posible observar aquellos tramos que producen mayor incremento del caudal a los primeros cambios de diámetro. El cambio de diámetro en otros tramos no incide en el incremento de la capacidad de la red. Por lo tanto, los tramos que generan mayor capacidad de la red tras el cambio de su diámetro son cuellos de botella de la red; los procesos de incremento de la capacidad de la red deben pasar por la modificación de estos tramos.

Este análisis puede ser muy útil para la planificación de la ampliación, gestión y rehabilitación de redes.

## 8.8. Análisis de las pérdidas reales tras la transición a suministro continuo

Las condiciones de intermitencia en el suministro, con exposición alternada al agua y al aire, provocan un mayor deterioro de las tuberías y accesorios de la red (Central Public Health and

Environmental Engineering Organisation, 2005), (Faure & Pandit, 2010); al requerir una operación constante existen fallas más frecuentes (Charalambous, 2012a) y mayor desgaste de las válvulas de la red (Dahasahasra, 2007); esta situación se complica aún más con la presencia de aire en las tuberías que pueden ser causa de importantes sobrepresiones (Izquierdo et al., 1999). A pesar de estos problemas, el suministro intermitente es elegido por las empresas de agua para reducir el nivel de fugas en la red, pues las pocas horas de servicio y las presiones bajas generan menores niveles de pérdidas de agua, ocultando, de esta forma, los problemas estructurales en la red.

La transición a suministro continuo visibiliza estos problemas, pues, tras este proceso, existe un notable incremento de fugas en la red (Charalambous, 2001), (Charalambous, 2012a). Dos son las razones fundamentales para el crecimiento del volumen de fugas: el incremento de las horas de suministro y el incremento de las presiones. Tras la transición se logra mayor cantidad de horas de suministro, pues el servicio es por veinticuatro horas, y las condiciones de servicio deben mejorar y, en consecuencia, las presiones se incrementan.

En la ciudad de Limasol (Chipre), se realizaron mediciones antes y después del proceso de transición de un sistema con suministro intermitente (2007) a suministro continuo (2010), con el fin de evaluar el efecto de la intermitencia en la red. Se evidenció un incremento en las roturas y pérdidas reportadas durante el periodo con suministro continuo. El número de roturas aumentó de 1 por 7.14 km de red cuando el suministro era intermitente a 1 por 2.38 km de red en un sistema continuo, un incremento del 300%. Asimismo, el número de roturas de conexiones domiciliarias se incrementó de 15.5 por 1000 conexiones a un promedio de 29.7 por 1000 conexiones, incremento de aproximadamente 200%; las fugas se incrementaron 9.40% (Charalambous, 2012a). El DMA 129 de la red incrementó su caudal de fugas de 10 m<sup>3</sup>/h a 20 m<sup>3</sup>/h; esta situación es típica en los DMAs que tienen 40 años de antigüedad, tras el efecto del suministro intermitente (Charalambous, 2012a).

Tabla 8.3. Efecto del suministro intermitente en base al número de roturas reportadas

Descripción	Número de roturas reportadas		
	Antes (Intermitente)	Después (Continuo)	Porcentaje de incremento
Red	1 en 7.14 km	1 en 2.38 km	300
Conexiones domiciliarias	15.5 en 1000	29.7 en 1000	200

Fuente: Charalambous (2012a)

Hay un número significativo de roturas causadas por el ciclo de suministro intermitente que no surgen a la superficie cuando el servicio es intermitente, por lo que es necesario realizar un control activo de fugas tras la transición, cuando la red trabaja presurizada de forma continua.

A continuación, se analiza cómo se incrementan las fugas de agua tras el proceso de transición. Aunque se deben realizar mejoras en la red para tener suministro continuo, se asume que las condiciones físicas de la red se mantienen iguales en suministro continuo y en intermitente.

### 8.8.1. Relación entre volúmenes de fugas en suministro intermitente y continuo

En base al caudal de fugas, es posible calcular el volumen de fugas producido en un sistema con suministro intermitente y en uno con suministro continuo. En suministro intermitente, el volumen de pérdidas reales depende básicamente de las horas de suministro y las presiones de servicio en los

nudos de la red; la presencia de depósitos domiciliarios tiende a reducir la presión y a mantenerla constante. Analizando el volumen de fugas en un sector con suministro intermitente, se tiene:

$$V_{fi} = \sum_{i=1}^{n_n} \left( \sum_{h=1}^{h_{int}} c_i \cdot P_{ih}^{\alpha_i} \cdot \Delta t \right), \quad (8.4)$$

donde:

$V_{fi}$  = volumen de fugas en suministro intermitente;

$c_i$  = coeficiente de fuga del nudo  $i$ ;

$P_{ih}$  = presión en suministro intermitente, en el nudo  $i$ , en la hora de suministro  $h$ ;

$\alpha_i$  = exponente de fuga del nudo  $i$ ;

$\Delta t$  = intervalo de tiempo de cálculo, generalmente 1 hora;

$n_n$  = número total de nudos evaluados;

$h_{int}$  = número total de intervalos de tiempo u horas de suministro.

En un sistema con suministro continuo, la variabilidad de las presiones de suministro es mayor, generando un patrón de presiones medias equivalente al patrón de la demanda; en las horas de menor consumo las presiones son grandes, produciendo mayores niveles de fugas en estas horas, lo cual no sucede en el suministro intermitente. El volumen de fugas en el mismo sector analizado, tras la transición a suministro continuo, es:

$$V_{fc} = \sum_{i=1}^{n_n} \left( \sum_{h=1}^{h_c} c_i \cdot P_{ih}^{\alpha_i} \cdot \Delta t \right), \quad (8.5)$$

donde:

$V_{fc}$  = volumen de fugas en suministro continuo;

$P_{ih}$  = presión en suministro continuo, en el nudo  $i$ , en la hora de suministro  $h$ ;

$h_c$  = número total de intervalos de tiempo u horas de suministro, generalmente 24 horas.

Relacionando los volúmenes de pérdidas reales antes y después del proceso de transición, se tiene:

$$\frac{V_{fc}}{V_{fi}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} \left( \sum_{h=1}^{h_c} c_i \cdot P_{ih}^{\alpha_i} \cdot \Delta t \right)}{\sum_{i=1}^{n_n} \left( \sum_{h=1}^{h_{int}} c_i \cdot P_{ih}^{\alpha_i} \cdot \Delta t \right)}, \quad (8.6)$$

$$R_f = \frac{V_{fc}}{V_{fi}}, \quad (8.7)$$

donde:

$R_f$  = relación del incremento de volúmenes de fugas.

Otra relación que resulta muy útil para evaluar los niveles del crecimiento del volumen de fugas tras la transición, es la relación de presiones, calculada en base a la presión media que tiene el suministro intermitente y la presión media que se producirá cuando el suministro sea continuo.

$$\overline{P_c} = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} \left( \sum_{h=1}^{h_c} P_{c_{ih}} \right)}{n_n \cdot h_c} ; \quad \overline{P_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} \left( \sum_{h=1}^{h_{int}} P_{i_{ih}} \right)}{n_n \cdot h_{int}}, \quad (8.8)$$

$$R_p = \frac{\overline{P_c}}{\overline{P_i}}, \quad (8.9)$$

donde:

$\overline{P_c}$  = presión media de la red en suministro continuo,

$\overline{P_i}$  = presión media de la red en suministro intermitente,

$R_p$  = relación del incremento de presiones medias.

Si se conoce el patrón de presiones medias en suministro continuo, el coeficiente y exponente de fugas en los nudos de la red, es posible determinar la relación del incremento de volumen de fugas  $R_f$ .

Generalmente, cuando se gestiona un sistema con suministro intermitente, se desconoce el patrón de demanda del suministro continuo; por lo tanto, también se desconoce el patrón de presiones medias bajo esta forma de suministro. En base a una simulación estocástica, es posible analizar el incremento de las fugas después de la transición a suministro continuo.

A partir de una distribución uniforme, limitando el rango de acción del patrón de consumo y el coeficiente de fuga, usando un valor constante del exponente de fugas, se puede encontrar una relación media entre el volumen de fugas del suministro continuo y del suministro intermitente.

Por ejemplo, se asume el patrón de presiones medias mostrado en la Fig. 8.11, limitado por un valor máximo y uno mínimo:

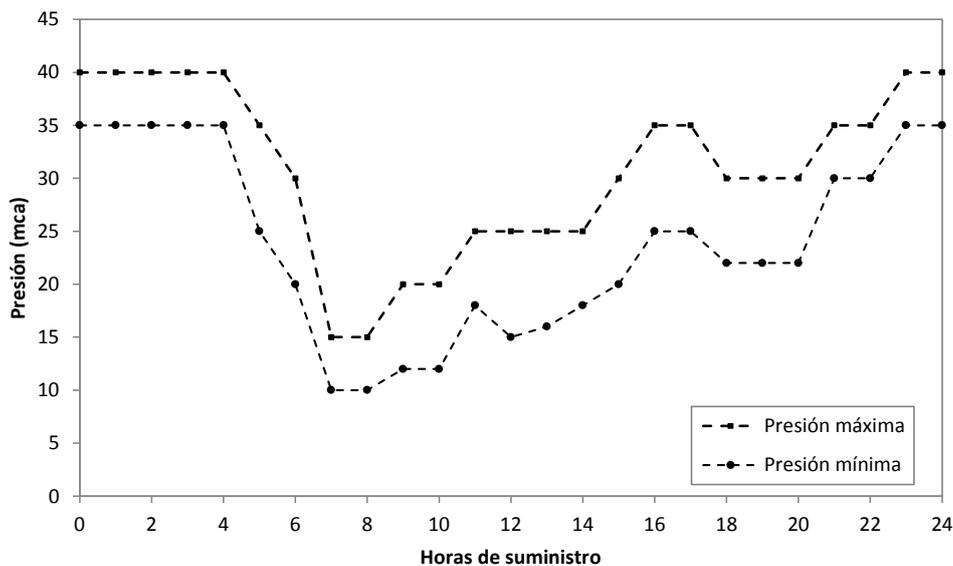


Fig. 8.11. Rango de acción de un patrón de presiones

Asimismo, es necesario definir el rango de actuación del coeficiente de fugas:

$$0 < c < 10. \tag{8.10}$$

En este ejemplo, se asume que la red con suministro intermitente tiene 8 horas de servicio, y la presión de suministro va variando para tener una relación de presiones ( $R_p$ ) incremental (de 1 a 6). Los siguientes gráficos muestran la relación de fugas ( $R_f$ ) para diferentes valores de  $R_p$ ; se modifican los exponentes de fuga ( $\alpha$ ) para realizar comparaciones.

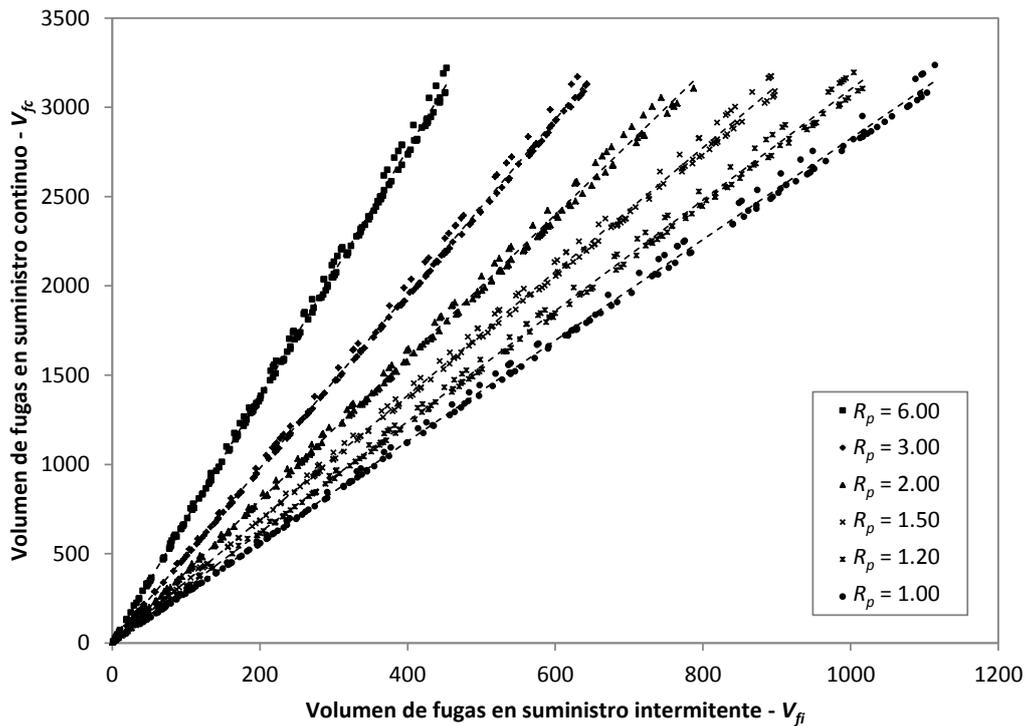


Fig. 8.12. Simulación estocástica, para  $\alpha = 0.5$ , define  $R_f$  a diferentes  $R_p$

Los valores aleatorios del coeficiente de fugas ( $c$ ) establecen diferentes valores para el volumen de fugas en suministro intermitente y el correspondiente en suministro continuo; en las figuras 8.12, 8.13, 8.14 y 8.15 se aprecia que la relación entre ambos tipos de suministro tiende a ser lineal.

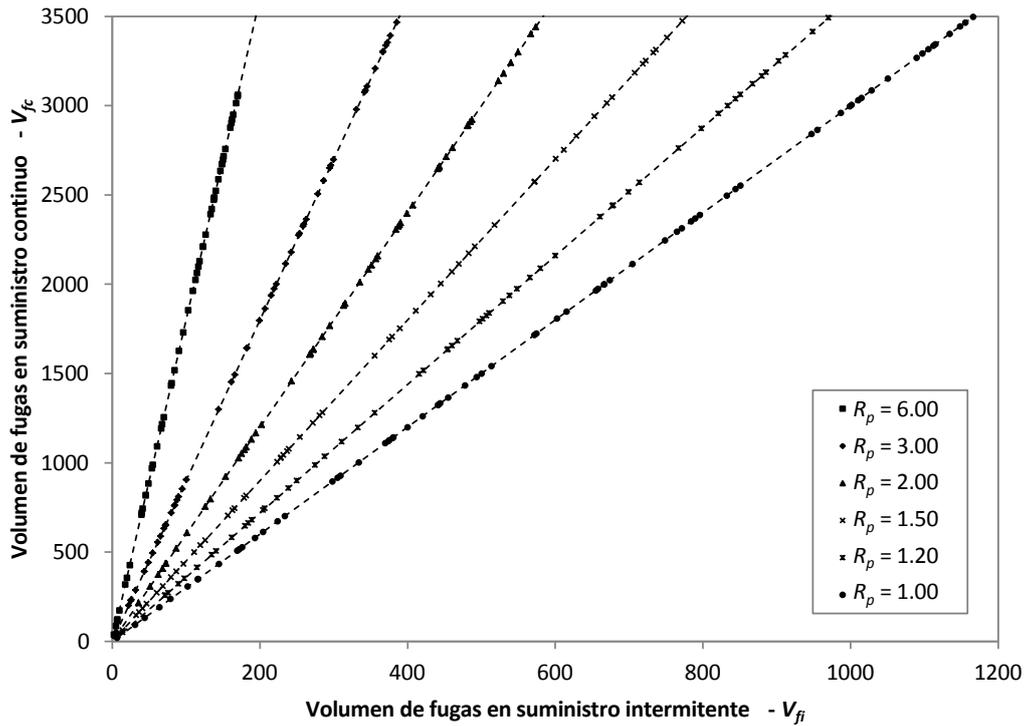


Fig. 8.13. Simulación estocástica, para  $\alpha = 1.0$ , define  $R_f$  a diferentes  $R_p$

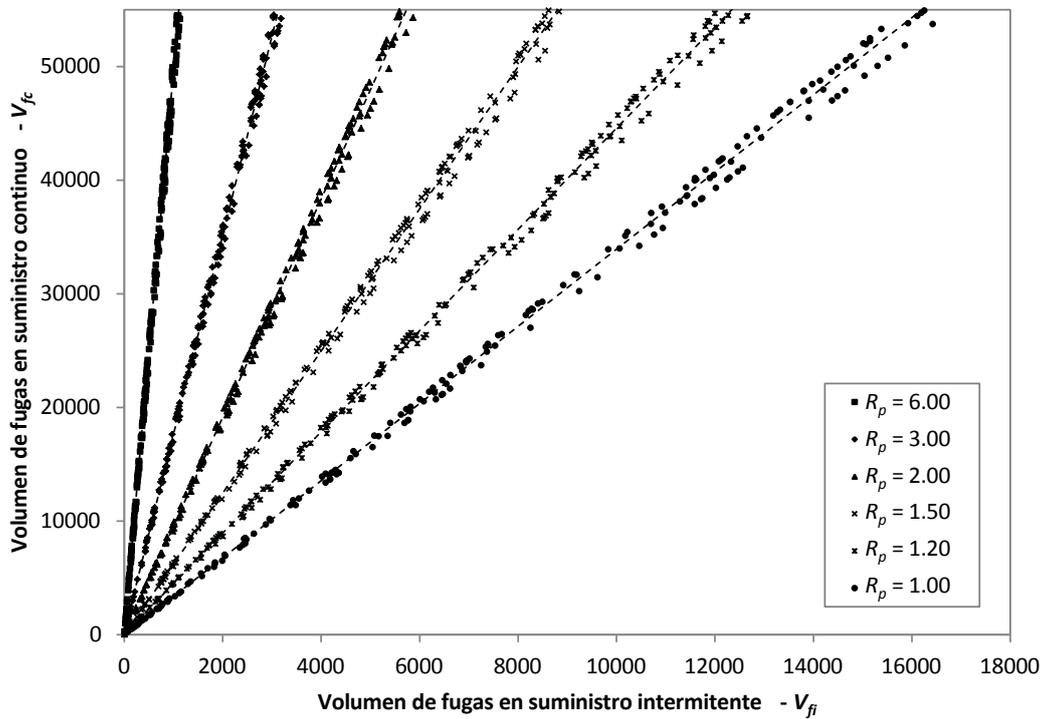


Fig. 8.14. Simulación estocástica, para  $\alpha = 1.5$ , define  $R_f$  a diferentes  $R_p$

Cuando las horas de suministro intermitente son pocas, las fugas en estado intermitente son pequeñas (Morrison et al., 2007), por lo que en suministro continuo, tras la transición, se tendrá un mayor volumen de fugas, en este caso debido al incremento de horas de suministro. Por otro lado,

aquellos sectores que tienen más horas de suministro intermitente, cuando llegan a tener suministro continuo, su nivel de fugas puede resultar menor.

Con respecto a la presión, si un sistema con suministro intermitente tiene presiones bajas, los niveles de fugas son pequeños, al pasar a suministro continuo las presiones se incrementan; entonces, se tienen valores de  $R_p$  mayores a la unidad, consecuentemente las fugas aumentarán, lo cual es valorado con el incremento de  $R_f$ . Si el incremento de presión es pequeño ( $R_p$  bajo, cercano a 1) la relación de volúmenes de fugas será pequeña. En el proceso de transición, debe tenerse en cuenta que los sectores con presiones muy bajas en suministro intermitente tendrán un incremento sustantivo de los volúmenes de pérdidas reales.

En caso de que se desconozca el exponente de fugas ( $\alpha$ ), puede procederse también con una simulación estocástica. El resultado (Fig. 8.15) muestra que también es posible definir un valor medio de la relación entre volúmenes de fuga  $R_f$ .

Ziegler, et al. (2012) sugieren usar un valor del exponente  $\alpha$  enmarcado en el siguiente rango:

$$0.50 < \alpha < 1.50. \tag{8.11}$$

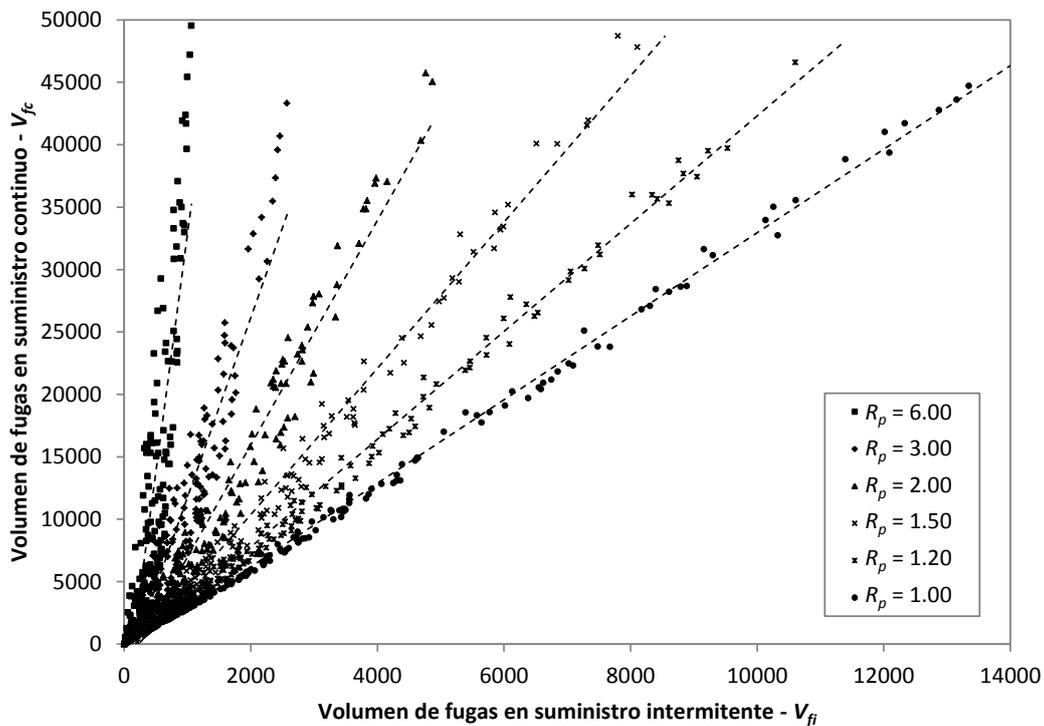


Fig. 8.15. Simulación estocástica, define  $R_f$  a diferentes  $R_p$

Ya sea con valores conocidos o a partir de procesos estocásticos, es posible encontrar el valor de  $R_f$ , por lo tanto se puede estimar el volumen de pérdidas reales incrementado tras el proceso de transición a suministro continuo. Este valor depende de las características operacionales del sistema con suministro intermitente y del sistema con suministro por 24 horas.

### 8.8.2. Relación entre porcentajes de fugas en suministro intermitente y continuo

Otra forma de evaluar el proceso de transición es por medio del porcentaje de fugas, tanto en suministro intermitente como en continuo. Los porcentajes de fugas están representados por las siguientes relaciones:

$$f_i = \frac{V_{fi}}{V_{di} + V_{fi}}; \quad \frac{V_{fi}}{V_{di}} = \frac{f_i}{1 - f_i}, \quad (8.12)$$

$$f_c = \frac{V_{fc}}{V_{dc} + V_{fc}}, \quad (8.13)$$

$$f_c = \frac{R_f}{\frac{V_{dc}}{V_{fi}} + R_f}, \quad (8.14)$$

donde:

$f_i$  = porcentaje de fugas en suministro intermitente,

$f_c$  = porcentaje de fugas en suministro continuo,

$V_{di}$  = volumen demandado en suministro intermitente,

$V_{dc}$  = volumen demandado en suministro continuo.

El consumo de agua en suministro continuo, tras la transición, puede o no sufrir alteraciones, en función de los niveles de satisfacción de la demanda en estado de intermitencia (Andey & Kelkar, 2009). Esta variación en la demanda está definida por la siguiente relación:

$$V_{dc} = D_{ic} \cdot V_{di}, \quad (8.15)$$

$$D_{ic} = \frac{V_{dc}}{V_{di}}, \quad (8.16)$$

donde:

$D_{ic}$  = relación entre demanda en suministro continuo y demanda en suministro intermitente tras el proceso de transición.

Por lo tanto, la relación entre los porcentajes de fugas del suministro intermitente y el suministro continuo es:

$$f_c = \frac{R_f}{D_{ic} \cdot \frac{V_{di}}{V_{fi}} + R_f}, \quad (8.17)$$

$$f_c = \frac{R_f}{D_{ic} \cdot \left( \frac{1 - f_i}{f_i} \right) + R_f}, \quad (8.18)$$

$$f_c = \frac{f_i}{\frac{D_{ic}}{R_f} + \left(1 - \frac{D_{ic}}{R_f}\right) \cdot f_i} \quad (8.19)$$

De esta forma, conociendo el nivel actual de fugas en un suministro intermitente, es posible determinar el porcentaje de fugas tras la transición a suministro continuo.

El incremento de la demanda tiene un efecto reductor del porcentaje de fugas, debido a que el porcentaje está relacionado con el volumen total consumido, incluyendo fugas. El siguiente gráfico (Fig. 8.16) ilustra esta situación para una determinada relación de volúmenes de fugas a diferentes valores de incremento de la demanda.

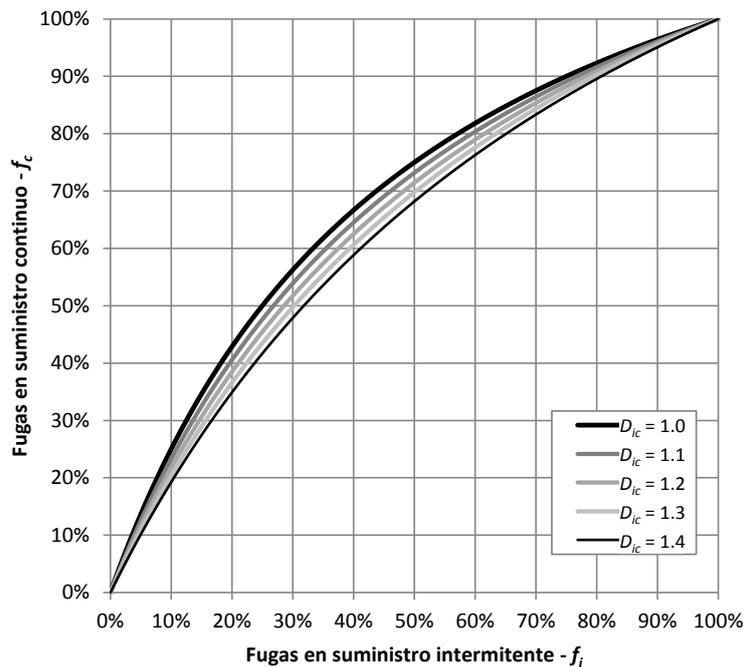


Fig. 8.16. Incremento de fugas en suministro continuo tras la transición, cuando se incrementa la demanda, para  $R_f = 3$

Por efectos de seguridad, para establecer el porcentaje de fugas en el suministro continuo tras la transición, se considera que el volumen suministrado se mantiene ( $D_{ic} = 1$ ), lo cual produce la situación más crítica y arroja los mayores valores de pérdidas.

La relación entre los porcentajes de fugas tras la transición a suministro continuo, para diferentes valores de  $R_f$ , es representada en el siguiente gráfico:

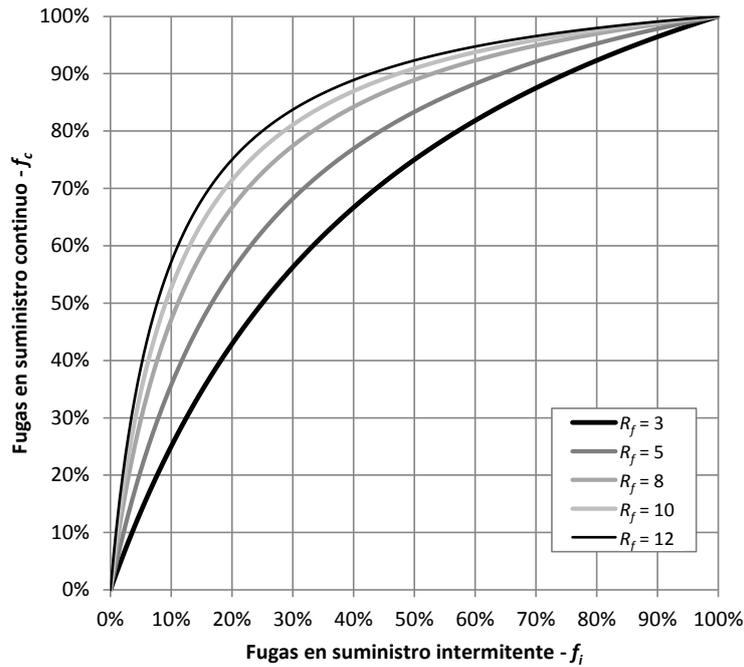


Fig. 8.17. Incremento de fugas en suministro continuo tras la transición, cuando se incrementa  $R_f$ , para  $D_{ic} = 1$

Aunque el incremento de las fugas tras la transición es elevado, debe considerarse que una de las ventajas y razones por la que se opta por el suministro intermitente es la posibilidad de reducir el nivel de fugas, debido principalmente a los tiempos cortos de entrega de agua y a las presiones bajas (Morrison et al., 2007). Por lo tanto, generalmente, el porcentaje de pérdidas reales en sistemas con suministro intermitente es muy bajo.

Incluso con estos bajos niveles de fugas en suministro intermitente, el cambio a suministro continuo puede generar valores elevados de pérdidas de agua (ver Fig. 8.18), según el tipo de relación  $R_f$  que se tenga para el proceso de transición.

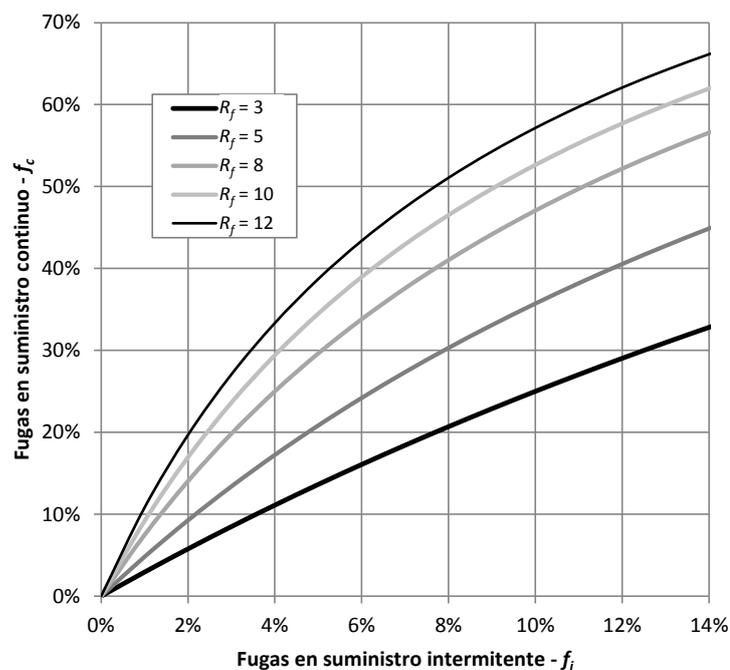


Fig. 8.18. Incremento de fugas en suministro continuo tras la transición a porcentajes bajos de fugas en suministro intermitente

El riesgo de generar un porcentaje de pérdidas reales de agua elevado en suministro continuo exige plantear un proceso de transición responsable. Por lo tanto, un criterio razonable para un proceso de transición adecuado es limitar el nivel de fugas en suministro continuo, a partir del cual es posible determinar la presión de servicio que tendrá el sistema tras la transición. Asimismo, es necesario controlar el nivel de fugas durante el proceso de transición y después, con el fin de no perder agua ni sobredimensionar la red.

### 8.8.3. El porcentaje de fugas en suministro continuo como criterio de diseño

Es preocupante el nivel que alcanzan las fugas tras el proceso de transición de suministro intermitente a continuo. Este proceso no puede ser planteado a ciegas; es decir, no puede elegirse una presión mínima de servicio en suministro continuo sin una estimación de las pérdidas de agua que ocurrirán tras la transición.

La presión media alcanzada en suministro continuo está ligada a los niveles de fugas producidos bajo esta forma de suministro. Esta condición permite establecer inicialmente el nivel de fugas que se quiere tener, para posteriormente calcular la presión mínima que se requiere en el suministro continuo. En cualquier caso, el incremento de fugas es uno de los inconvenientes de la transición a suministro continuo, el cual debe ser gestionado de la mejor forma posible.

Si se conoce el porcentaje de fugas ( $f_i$ ), la presión de servicio media ( $P_i$ ) y el número de horas de servicio en suministro intermitente ( $h_{int}$ ), además de la presión media que se tendrá bajo suministro continuo ( $P_c$ ), es posible determinar el porcentaje de fugas cuando el suministro se realice por 24 horas ( $f_c$ ).

Sin embargo, si se quiere limitar el porcentaje de fugas en suministro continuo, este valor debe ser un dato de partida, un nivel de fugas razonable que pueda ser controlado y reducido cuando el sistema trabaje con suministro continuo. De esta forma, el valor a calcular será la presión de servicio en suministro continuo, que será básico para definir el nivel de ampliación de la red.

De la ecuación 8.17, se tiene:

$$R_f = D_{ic} \cdot \frac{f_c}{f_i} \cdot \left( \frac{1 - f_i}{1 - f_c} \right). \quad (8.20)$$

Usando  $\alpha = 1$  (Lambert & Hirner, 2000), (Thornton & Lambert, 2005), con las presiones medias en suministro continuo e intermitente, la relación del incremento de fugas se aproxima a:

$$R_f = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} \left( \sum_{h=1}^{h_c} c_i \cdot P_c^{\alpha_i} \cdot \Delta t \right)}{\sum_{i=1}^{n_n} \left( \sum_{h=1}^{h_{int}} c_i \cdot P_i^{\alpha_i} \cdot \Delta t \right)}, \quad (8.21)$$

$$R_f \approx \frac{\overline{P_c} \cdot h_c}{\overline{P_i} \cdot h_{int}}. \quad (8.22)$$

Por lo tanto, la presión promedio en suministro continuo ( $P_c$ ) debe ser:

$$\overline{P_c} \approx D_{ic} \cdot \frac{f_c}{f_i} \cdot \left( \frac{1 - f_i}{1 - f_c} \right) \cdot \frac{\overline{P_i} \cdot h_{int}}{24}. \quad (8.23)$$

Esta presión establece un nivel límite para las fugas en suministro continuo ( $f_c$ ); superar este valor implica el incremento de las pérdidas de agua por encima del nivel asumido.

Aunque el nivel de fugas puede reducirse en el proceso y tras la transición a suministro continuo a través de diferentes métodos de intervención para el control de fugas, es importante delimitar la presión de servicio. El valor calculado de la presión será utilizado como referencia para determinar la presión mínima para el cálculo de la capacidad de la red.

La empresa de agua debe conocer que existen las posibilidades de entregar agua que se perderá como fugas, por lo que se requerirá su compromiso en programas de reducción de fugas que busquen recuperar estas pérdidas; pero deben garantizarse los recursos suficientes. Esta condicionante puede ser muy importante al momento de decidir por la transición a suministro continuo. En todo caso, la empresa estará consciente de la cantidad de agua que perderá, no como sucede cuando una empresa tiene presencia de pérdidas pero no es consciente de ello.

Esta situación obliga a la necesidad de incluir en cualquier proceso o proyecto de transición de suministro intermitente a continuo un plan para la reducción de fugas.

### 8.8.3.1. Pérdidas de agua en sistemas con suministro continuo.

Como es necesario tener un nivel de fugas en suministro continuo como referencia para la determinación de la presión de servicio, en el presente acápite se analiza la bibliografía correspondiente.

Las pérdidas de agua pueden ser estimadas a través de la diferencia entre el caudal inyectado al sistema y el consumido por los usuarios (Alegre et al., 2006). Alrededor del mundo, los sistemas con suministro continuo que tienen buena gestión, tienen un rango de 5 a 10% como pérdida total de agua; los sistemas que tienen una larga historia de falta de inversión en el mantenimiento y rehabilitación de las tuberías, además de malas condiciones de administración, superan el 40% de pérdidas de agua (Ratnayaka et al., 2009). Porcentajes superiores a 30% pueden deberse a las fugas producidas en las tuberías y a la falta de la validación de los datos de consumo. Sin embargo, Araujo et al. (2006) estiman que el porcentaje de pérdidas en sistemas de suministro de agua se encuentra frecuentemente entre 30% a 40%.

Tabla 8.4. Valores típicos de las pérdidas totales de agua

Porcentaje del volumen de suministro total	Circunstancias típicas aplicables
5-15%	Sistemas pequeños con pocas fugas; zonas residenciales de sistemas grandes con pocas fugas
16-20%	Valor usual más bajo reportado para ciudades enteras, a menudo asociado con estrategias de control activo de fugas
20-25%	Factible en sistemas grandes con métodos de control activo de fugas y desperdicio, buena monitorización del sistema y datos de la red
25-35%	Reportado para sistemas grandes compuestos de tuberías principales viejas y acometidas en condiciones moderadas a malas, baja cobertura de medición y datos pobres
35-55% y más grandes	Sistemas con muchas tuberías principales viejas y acometidas en malas condiciones; sistemas con medición ineficiente y falta de atención a las fugas y el desperdicio de agua, recursos financieros limitados

Fuente: Ratnayaka et al.(2009)

Según World Health Organization (2003), es recomendable alcanzar un porcentaje de pérdidas menor al 10%, aunque un primer objetivo debe ser llegar al 25%.

En base a estas referencias, se considera que el porcentaje de fugas en suministro continuo no debe superar el 40% y como valor recomendable debe buscarse un 25%. Asimismo, puede calcularse el nivel de fugas en suministro continuo en base a una restricción presupuestaria anual establecida por la empresa de agua; de esta forma se define un porcentaje de pérdidas que no puede ser superado; esta situación es detallada en los siguientes acápite. Por otro lado, debe considerarse también lograr una presión mínima de servicio que garantice un servicio adecuado a la población. Por lo tanto, la presión de suministro debe enmarcarse en este rango, como en el ejemplo mostrado en la Fig. 8.19.

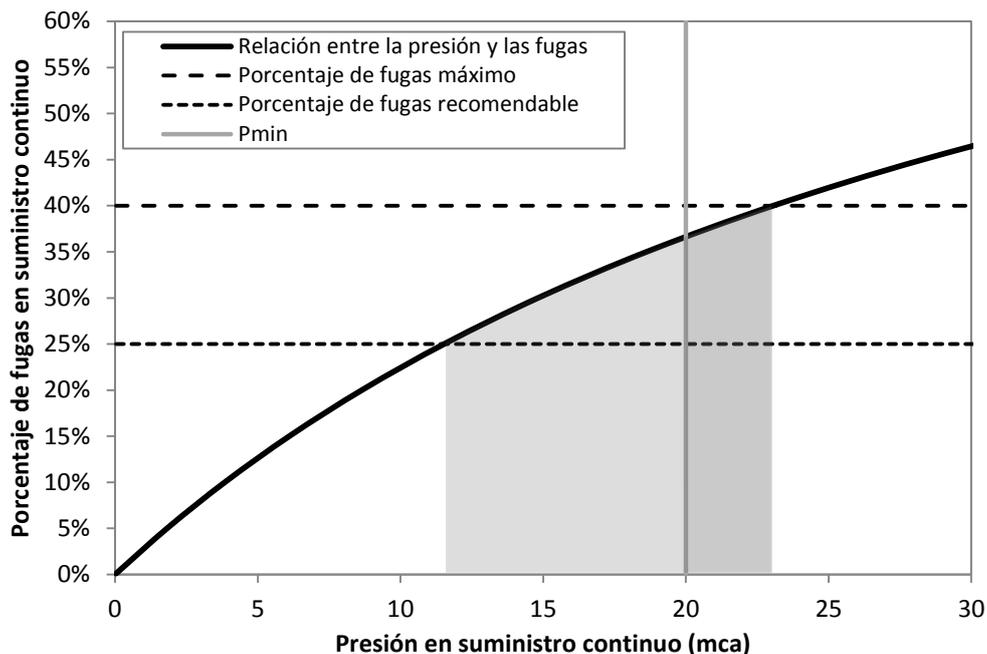


Fig. 8.19. Relación entre la presión de suministro y el porcentaje de fugas establecido entre un mínimo y máximo

Si no se hace nada para reducir el porcentaje de fugas, debe incluirse el volumen adicional de fugas al caudal requerido para el proceso de ampliación de la capacidad de la red. Consecuentemente, se tiende a sobredimensionar la red y a perder un volumen muy importante de agua.

#### 8.8.4. Reducción de las pérdidas reales en el proceso de transición

Como se indica anteriormente, el incremento del caudal de fugas puede producir el sobredimensionamiento de la red y el desperdicio de un recurso muy importante, mucho más en sistemas con escasez física de agua. Por lo tanto, es necesario el control de las fugas durante todo el periodo de ampliación de la capacidad de la red, que resulta ser el periodo de transición a suministro continuo. La mejora gradual de las presiones implica el incremento gradual de las pérdidas; en consecuencia, este elemento hará crecer el Índice Natural de Aumento de Fugas (*INAF*), que debe ser controlado en todo momento. La opción más adecuada es usar control activo de fugas paralelamente al proceso de ampliación de la capacidad de la red; es de suma importancia su implementación.

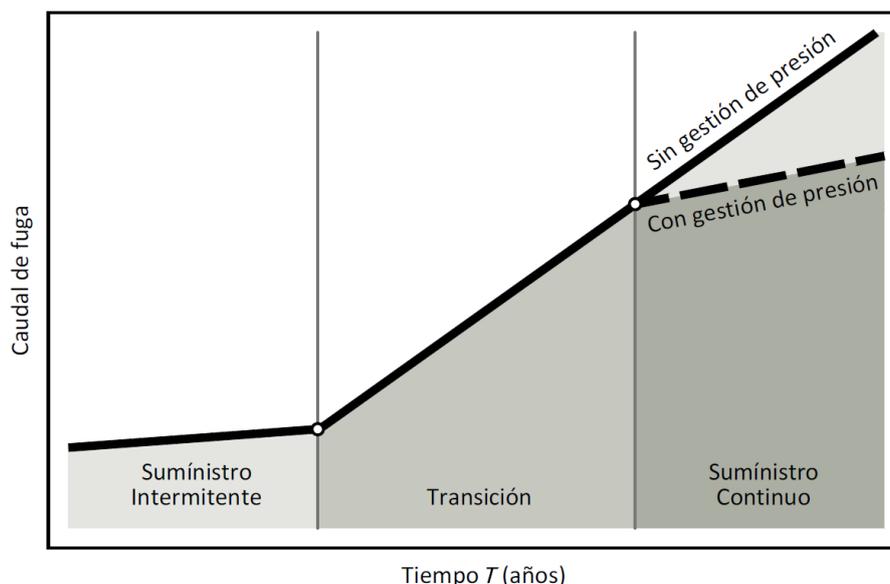


Fig. 8.20. Evolución del caudal de fuga antes, durante y después del proceso de transición

En la Fig. 8.20, se analiza la evolución de las fugas en base al *INAF*, antes, durante y después del proceso de transición. En la misma es posible observar lo siguiente:

- Cuando la red se encuentra con suministro intermitente, el caudal de fugas es pequeño, debido principalmente a las pocas horas de suministro y las bajas presiones en los puntos de suministro.
- En la etapa de transición se van incrementando la presión y las horas de suministro; en consecuencia, hay una fuerte tendencia al crecimiento de las fugas.
- Cuando la red cuenta ya con suministro continuo, el *INAF* tiende a mantenerse constante, como en la etapa de transición. Sin embargo, si se realizan acciones que logren gestionar la presión en los sectores que tienen exceso de presión, la tendencia del crecimiento de las fugas puede reducirse. Sin embargo, si no se realiza el Control Activo de Fugas, el volumen de agua perdido en fugas se incrementará, dificultando el cumplimiento de la demanda de la población.

El crecimiento de las fugas en la red de suministro conlleva varios problemas; entre éstos se destaca la necesidad de mayor capacidad en la red para cumplir con un servicio con la cantidad y la calidad necesaria. Si se toman en cuenta las fugas que se producen tras la transición como parte del requerimiento de la población, se tendría una red sobredimensionada con infraestructura adicional para transportar agua que se perderá.

Por estas razones, es necesario reducir el nivel de fugas durante el proceso de transición a suministro continuo. La mejor forma de hacerlo es a través del Control Activo de Fugas, que debe realizarse simultáneamente a las acciones llevadas a cabo para el proceso de transición, por lo que se debe convertir en una de las tareas adicionales para tener suministro continuo.

El control activo de fugas como parte del proceso de transición es fundamental para reducir los costes en la ampliación de la capacidad de la red; asimismo, garantizará el volumen demandado por la población. La frecuencia de las inspecciones de control y reparación de fugas será mayor

durante el tiempo que dure la transición; ésta puede rebajar cuando el sistema trabaje con suministro continuo, si tras la transición se implementan acciones de gestión de presión, gestión de la infraestructura, y se logra rapidez y calidad en las reparaciones.

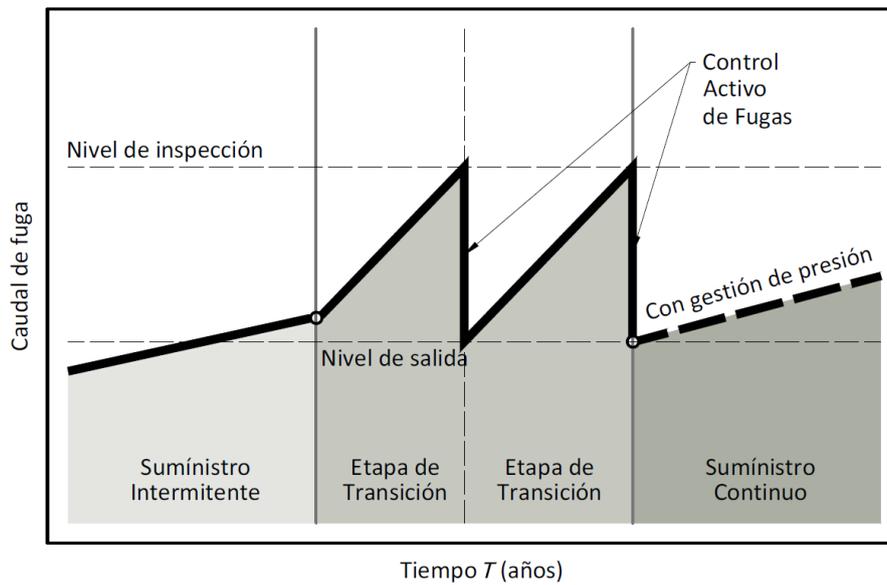


Fig. 8.21. Control Activo de Fugas durante el proceso de transición

Cuando los recursos económicos de la empresa de agua son muy limitados, se puede ampliar el tiempo de transición, con lo cual las inversiones anuales de mejora de la red se reducirán y el *INAF* logra tener una menor pendiente. En consecuencia, el coste anual de inspección se reduce.

Para calcular el coste del Control Activo de Fugas, es necesario conocer el *INAF* generado en el proceso de transición. Para este fin, serán útiles los porcentajes de pérdidas en estado de intermitencia y de continuidad.

$$Q_1 = \frac{V_{fc}}{1 \text{ día}}, \quad (8.24)$$

$$V_{fc} = V_{dc} \cdot f_c, \quad (8.25)$$

$$Q_0 = \frac{V_{f0}}{1 \text{ día}}, \quad (8.26)$$

$$V_{f0} = V_{dc} \cdot f_0, \quad (8.27)$$

$$INAF = \frac{V_{fc} - V_{f0}}{T_t} = \frac{V_{dc}(f_c - f_0)}{T_t}, \quad (8.28)$$

donde:

$Q_1$  = caudal de fuga cuando el sistema trabaja con suministro continuo,

$Q_0$  = caudal de fuga al inicio del periodo de transición,

$f_c$  = porcentaje de fugas en suministro continuo,

$f_0$  = porcentaje de fugas al inicio del periodo de transición,

$V_{dc}$  = volumen demandado en suministro continuo,

$T_t$  = tiempo de transición,

$INAF$  = Índice natural de aumento de fugas.

El coste anual de inspección ( $CAI$ ) en función del  $INAF$  es:

$$CAI = \frac{12 \cdot CI}{\sqrt{\frac{0.789 \cdot CI}{CMA \cdot INAF}}}. \quad (8.29)$$

Asimismo, si existe un presupuesto anual fijo ( $CAI$ ) para el Control Activo de Fugas, es posible calcular el porcentaje máximo de fugas en suministro continuo que es posible gestionar.

Reemplazando la ecuación 8.28 en 8.29:

$$CAI^2 = \frac{144 \cdot CI \cdot CMA \cdot V_{dc} \cdot (f_c - f_0)}{0.789 \cdot T_t}, \quad (8.30)$$

se tiene:

$$f_c = f_0 + \frac{0.789 \cdot CAI^2 \cdot T_t}{144 \cdot CI \cdot CMA \cdot V_{dc}}. \quad (8.31)$$

Como se conocen las condiciones iniciales en suministro intermitente, es conveniente que el cálculo esté en función de éstas; por lo tanto:

$$V_{máxri} = V_{di} + V_{fi}, \quad (8.32)$$

$$V_{di} = \frac{V_{máxri}}{1 + f_i}, \quad (8.33)$$

donde:

$V_{máxri}$  = volumen máximo requerido en suministro intermitente,

$V_{di}$  = volumen demandado en suministro intermitente,

$V_{fi}$  = volumen de fugas en suministro intermitente.

El incremento del volumen demandado por la población, tras el proceso de transición a suministro continuo, está definido por:

$$V_{dc} = D_{ic} \cdot V_{di}. \quad (8.34)$$

Reemplazando (8.34) en (8.31) se obtiene el porcentaje de fugas en suministro continuo, en función del suministro intermitente:

$$f_c = f_0 + \frac{0.789 \cdot CAI^2 \cdot T_t}{144 \cdot CI \cdot CMA \cdot D_{ic} \cdot V_{di}}. \quad (8.35)$$

Esta relación resulta muy útil para contar con una referencia adicional para establecer el nivel máximo de fugas en suministro continuo, que puede ser gestionado por la empresa de agua, en base a la limitación del presupuesto anual para las inspecciones.

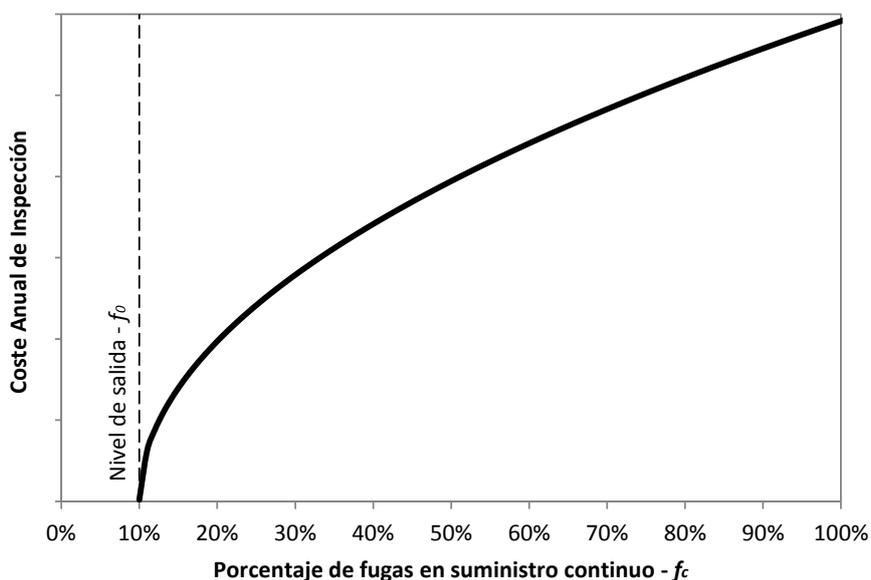


Fig. 8.22. Ejemplo de la relación entre el CAI y el porcentaje de fugas en suministro continuo

### 8.8.5. Gestión de presión en los sectores tras el proceso de transición

Como es posible apreciar en acápite anteriores, uno de los problemas críticos del proceso de transición a suministro continuo es el incremento de las fugas que ocurre tras este proceso. Si no se hace nada, las pérdidas serán grandes y pueden provocar nuevamente el suministro intermitente (Ziegler et al., 2012); esta vez, no debido a la falta de capacidad de la red, sino a la falta de agua.

Por lo tanto, la reducción de las pérdidas cuando el sistema trabaje con suministro continuo es muy importante; de esta forma, se garantiza la sostenibilidad del servicio por veinticuatro horas. Una herramienta que permite reducir el nivel de fugas en la red es la gestión de la presión, la cual es fundamental en el proceso de transición a suministro continuo (Sridhar, 2013).

La evaluación de los sectores usando la curva de consigna permite evaluar las presiones de suministro requeridas en cada uno de ellos. La red ampliada garantizará presiones superiores a las mínimas requeridas; por lo tanto, se debe compatibilizar el requerimiento del sector con la presión ofrecida por la red principal.

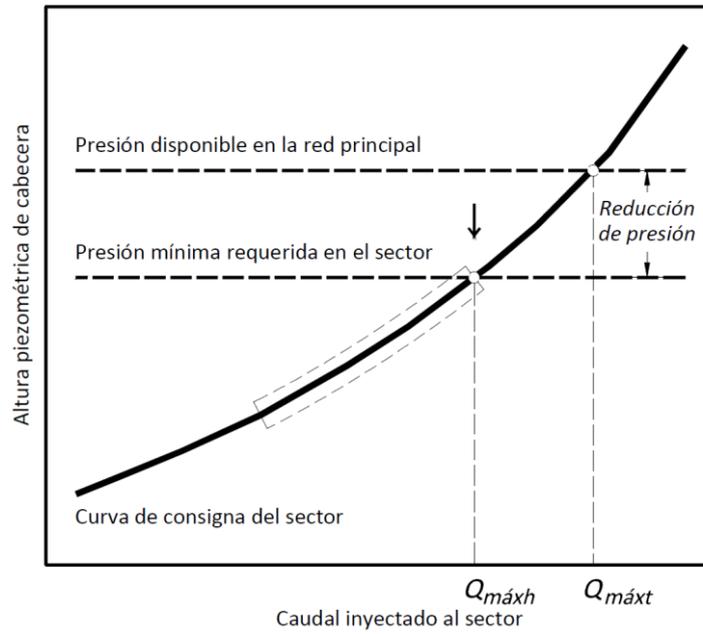


Fig. 8.23. Reducción de la presión de ingreso al sector tras el proceso de transición

La reducción de las presiones en cada uno de los sectores permite reducir las pérdidas reales. Un escenario ideal para reducir aún más las pérdidas se establecería si la válvula de ingreso al sector es regulada siguiendo la curva de consigna; de esta forma, se otorgaría a los usuarios la presión necesaria ajustada a la demanda de la población.

# CAPÍTULO 9. Transición gradual a suministro continuo

---

## 9.1. Introducción

Uno de los problemas inherentes a un servicio intermitente en las zonas en las que prevalece esta forma de suministro, es la consideración del suministro intermitente como algo normal por la mayor parte de los usuarios; por lo tanto, no existe motivación para tomar medidas al respecto (McIntosh, 2003). Sin embargo, el conocimiento de los inconvenientes generados por este tipo de suministro y los problemas de escasez y crecimiento de la demanda de agua deben impulsar a operadores, gobiernos e investigadores, a generar propuestas de solución.

Las mejoras en un sistema con suministro intermitente dependerán de varios factores, entre estos: los relacionados con la cantidad de agua disponible y los recursos económicos. Para definir de forma más coherente las acciones a seguir, Totsuka et al. (2004) establecen una clasificación de los tipos de sistemas intermitentes en una matriz definida por el tipo de escasez y el tipo u origen de los problemas del sistema. La escasez queda dividida en: escasez debida a una mala gestión, escasez económica y escasez absoluta o física. Los problemas del sistema pueden ser: tipo A, relacionados con problemas de sistemas que fueron diseñados como sistemas de 24 horas; y tipo B, problemas de sistemas genuinamente intermitentes (Totsuka et al., 2004).

De esta forma, según el tipo de escasez y los problemas que surgen en el sistema, se pueden plantear soluciones que se adapten a las condiciones y contexto del sistema intermitente. Por ejemplo, serán diferentes las soluciones para un sistema que tiene problemas asociados a los sistemas diseñados para trabajar 24 horas y que tienen escasez debida a una mala gestión, que los de los sistemas que tienen problemas de sistemas genuinamente intermitentes con escasez física.

Una dificultad para la transición a sistema continuo es la escasez económica; en este estado la empresa de agua no está en la capacidad de realizar grandes inversiones, las necesarias para una transición directa, por lo que deben buscarse estrategias rentables y planificadas a largo plazo; en ese sentido, la transición gradual puede ser una buena opción.

El presente capítulo está fuertemente ligado al proceso de ampliación gradual de la capacidad de la red, propuesto en el *capítulo 8*, que permite mejorar las condiciones hidráulicas de la red en cada una de las etapas, lo cual conlleva a escenarios nuevos cada vez con mayor capacidad y que permite presiones mayores en todos los sectores. En cada una de estas etapas es posible realizar la transición

gradual; es decir, se pueden seleccionar sectores, aquellos más apropiados según determinados criterios, para que empiecen a tener suministro continuo. El proceso de transición concluye cuando todos los sectores cuenten con agua las veinticuatro horas del día.

En ese sentido, en cada una de las etapas se tendrán algunos sectores con suministro continuo y otros aún con suministro intermitente. La selección de los sectores que pasan a tener suministro continuo debe considerar el beneficio de la mayor cantidad de usuarios del sistema, garantizar la equidad del suministro en los sectores que aún se mantienen con suministro intermitente, y la conveniencia para las acciones de operación y mantenimiento de la empresa de agua.

El problema de la selección óptima de los sectores que pasan a tener suministro continuo en cada una de las etapas de mejora de la red es abordado mediante el uso de análisis multicriterio y algoritmos genéticos; en el problema se considera que la evaluación de la presión de suministro en cada sector es importante para la toma de decisiones. La aplicación exitosa a diferentes problemas del mundo real refuerza la conclusión de que los algoritmos genéticos son una poderosa y robusta técnica de optimización (Sivanandam & Deepa, 2007).

El proceso de optimización en la selección de sectores está basado en criterios como: cantidad de usuarios, presión de servicio, distancia desde la fuente de suministro, equidad en el suministro del sector y la dificultad en la operación. Al igual que en los otros procesos de selección, como herramientas para la gestión de los sistemas con suministro intermitente, se introduce en este proceso la percepción de los expertos de la empresa de agua con relación a las condiciones de operación de los sectores, a través de encuestas basadas en la metodología AHP (Saaty, 1977), (Saaty & Vargas, 2012). Asimismo, la topología de la red es incluida en el proceso de optimización a través de una reorganización como grafo dirigido, con el fin de establecer un orden en la selección que garantice una transición más eficiente.

La selección de zonas o sectores que pasan a tener suministro continuo es común en proyectos de transición. En el estado de Karnataka (India), se desarrolló un proyecto entre el 2007 y 2008 para el cambio de suministro intermitente a continuo, en el cual se seleccionaron zonas de la red en base a criterios de población socio-económicamente diversa y las posibilidades de aislamiento de la zona de la red (Kumpel & Nelson, 2013).

Uno de los obstáculos para la restauración o implementación del suministro continuo lo constituye la presencia de depósitos domiciliarios (Ziegler et al., 2012). Es necesario retirar estos depósitos, una vez que la red o el sector tenga la suficiente capacidad y el suministro sea por veinticuatro horas; de esta forma, el patrón de suministro no se distorsiona. Para este fin, es importante la mejora de la presión a lo largo de la red y la continuidad del suministro, pues bajo estas condiciones el depósito perjudica en lugar de ayudar ya que limita la presión dentro la vivienda e implica problemas de salubridad, además de que ya no será necesario almacenar agua. Con lo cual, será más sencillo para los usuarios optar por retirar el depósito, siempre y cuando se garanticen los niveles de presión y caudal adecuados, generando confianza entre la gente para no volver nuevamente al uso de los depósitos domiciliarios.

## **9.2. Descripción del proceso de selección de sectores**

En el proceso de selección de sectores que cambian a suministro continuo intervienen tanto factores cuantitativos como cualitativos. Se busca que el proceso de transición sea beneficioso en cada una de sus etapas para la mayor cantidad de usuarios, buscando garantizar las condiciones de equidad para aquellos sectores que continuarán con suministro intermitente.

El proceso de transición implica un cambio de patrón de suministro en toda la red, de un patrón de suministro intermitente a uno de suministro continuo. La selección gradual hace que el patrón de suministro vaya cambiando gradualmente hasta que todos los sectores tengan suministro por veinticuatro horas.

El cambio de patrón de suministro intermitente de un sector es diferente al patrón de suministro de toda la red. En un sector, el patrón tiende a ser un bloque rectangular, definido por un caudal constante durante el tiempo de duración del periodo de entrega de agua. El patrón de suministro para toda la red cambia, pues se deben agregar todos los bloques representativos de cada sector,; el cambio a suministro continuo genera una curva que va cambiando gradualmente en cada etapa de mejora hasta lograr una curva de suministro continuo.

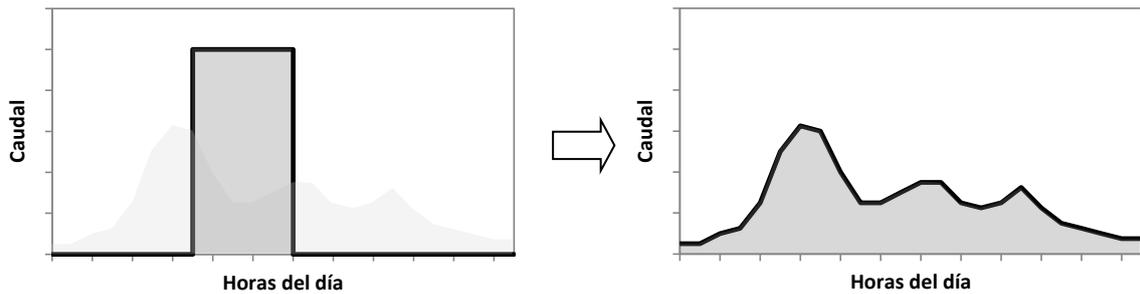


Fig. 9.1. Cambio de patrón de suministro en un sector

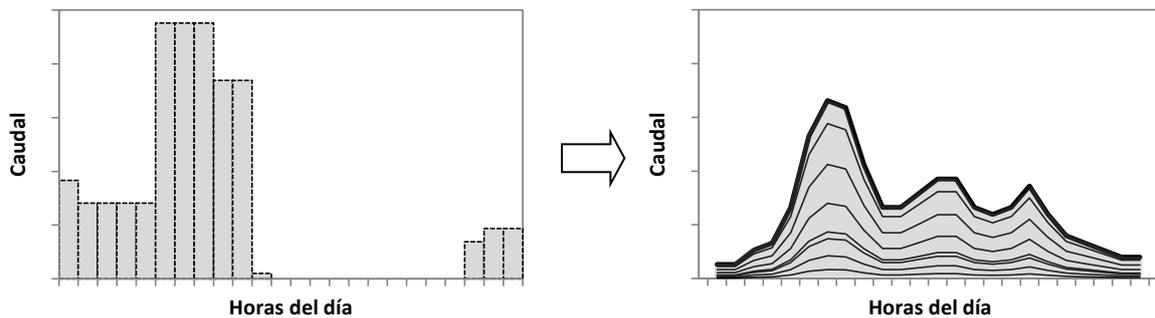


Fig. 9.2. Cambio de patrón de suministro en la red

El patrón de suministro intermitente simplificado para cada uno de los sectores es rectangular, por lo que el volumen por hora puede calcularse dividiendo el volumen diario suministrado al sector sobre el número de horas de suministro:

$$V_{S_i} = \frac{V_{d_i}}{h_i}, \quad (9.1)$$

donde:

$V_{d_i}$  = volumen diario suministrado al sector  $i$ ,

$h_i$  = horas de suministro en el sector  $i$ ,

$V_{S_i}$  = volumen suministrado por hora al sector  $i$ .

Pueden darse dos casos de patrones de suministro intermitente de la red, cuya comparación con el patrón de suministro continuo permite afrontar el proceso de selección:

- Cuando el caudal pico del patrón de suministro intermitente es mayor al caudal pico del patrón de suministro continuo.
- Cuando el caudal pico del patrón de suministro intermitente es menor al caudal pico del patrón de suministro continuo.

Ambos escenarios requieren un análisis diferente. En un caso se requiere la reducción del caudal máximo o pico y en el otro caso es necesario el crecimiento de este caudal.

### **9.2.1. Transición gradual con reducción del caudal pico**

Generalmente, las empresas de agua que gestionan sistemas con suministro intermitente, optan por dar agua en las horas en las cuales la población necesita más, por ejemplo, en horas de la mañana antes de las actividades laborales. Estas decisiones establecen horarios de suministro simultáneos en muchos sectores; esta simultaneidad genera un caudal pico muy grande que puede llegar a ser superior al caudal pico del suministro continuo; en estas condiciones, existe una reducción de las presiones de servicio y quejas por la falta de agua en las zonas desfavorables. Cuando se tiene este tipo de patrón de suministro, es necesario reducir el caudal pico en el proceso de transición a suministro continuo.

La reducción está condicionada a la modificación del tipo de suministro de algunos sectores; aquellos que se encuentran en las horas de mayor consumo y aportan al caudal pico en suministro intermitente pueden reducir su caudal pico a través del cambio a suministro continuo. Por lo tanto, es necesario seleccionar aquellos sectores que cambiando a suministro continuo reducen el caudal pico, siempre y cuando cumplan con una presión mínima requerida para el proceso de transición.

La reducción del caudal pico garantiza las presiones suficientes en los puntos de ingreso a los sectores. Asimismo, existe una mejora de la presión en las etapas de ampliación de la capacidad de la red, lo cual es considerado en el proceso de optimización como parte de las restricciones.

### **9.2.2. Transición gradual con crecimiento del caudal pico**

Un sistema con suministro intermitente bien planificado y gestionado, tiene sectores con horarios de suministro que permiten un caudal pico inferior al caudal pico de suministro continuo. Esta condición es ideal para lograr buenas presiones en las horas de suministro en cada sector.

Este escenario también puede lograrse mediante la gestión de horarios en sistemas con suministro intermitente propuesta en el *capítulo 7* de la presente tesis.

Cuando el caudal pico del suministro intermitente es menor al caudal pico en suministro continuo, el proceso de transición gradual debe seleccionar aquellos sectores que se convertirán a suministro continuo, incrementando el caudal pico hasta llegar al valor máximo en suministro continuo.

Cada una de las etapas de mejora de la capacidad de la red implica un caudal máximo teórico cada vez mayor, con lo cual la selección de sectores que se convertirán a suministro continuo debe generar un caudal no superior a este valor. Asimismo, la presión que produce una determinada configuración de los sectores (unos con suministro continuo y otros con intermitente) debe ser superior

a un límite referencial. Si esta presión no es superada con el cambio de los sectores, debe mantenerse la configuración actual.

### 9.3. Algoritmos evolutivos

La selección de los sectores que deben trabajar bajo suministro continuo implica la verificación de presiones en la red, una relación no lineal que debe ser calculada en el modelo hidráulico de la red. Estas condiciones exigen el uso de herramientas que sean capaces de superar este tipo de inconvenientes; los algoritmos evolutivos, en particular los genéticos, se constituyen en las herramientas ideales para este fin.

Los algoritmos evolutivos son inspirados en algunos procesos que se llevan a cabo en el proceso de la evolución natural. Estos procesos están sustentados en base a una fuerte evidencia experimental (Sivanandam & Deepa, 2007), la cual establece que:

- La evolución es un proceso que opera sobre cromosomas más que sobre los organismos. Los cromosomas son herramientas orgánicas que codifican la estructura de un ser vivo.
- La selección natural es el mecanismo que relaciona a los cromosomas con la eficiencia de la entidad que representan; esto permite que el organismo eficiente, que se adapta muy bien al entorno, se reproduzca con más frecuencia que los menos eficientes.
- El proceso evolutivo tiene lugar durante la fase de reproducción. Existe un gran número de mecanismos reproductivos en la naturaleza. Entre las más comunes se encuentran: la mutación (que hace que los cromosomas de la descendencia sean diferentes a los de los padres) y la recombinación (que combina los cromosomas de los padres para producir la descendencia).

Un algoritmo evolutivo es un proceso iterativo y estocástico que opera sobre un conjunto de individuos (población). Cada uno de los individuos representa una solución potencial al problema de optimización, la cual es obtenida por medio de un mecanismo de codificación/decodificación. Inicialmente, la población es generada de forma aleatoria; cada uno de los individuos cuenta con una medición de su bondad con respecto al problema, lo cual sirve como información cuantitativa al algoritmo para el proceso de búsqueda (Sivanandam & Deepa, 2007).

Entre los algoritmos evolutivos, los algoritmos genéticos se constituyen en las herramientas más extendidas para resolver problemas de optimización (Gen et al., 2008).

Es importante también considerar que para espacios de búsqueda con un número pequeño de posibles soluciones, todas las soluciones pueden ser examinadas en un tiempo razonable hasta encontrar el óptimo. Sin embargo, esta búsqueda exhaustiva es poco práctica cuando se tiene un espacio de búsqueda grande (Sivanandam & Deepa, 2007) y será necesario utilizar algoritmos genéticos u otro tipo de algoritmos de optimización.

### 9.4. Algoritmos genéticos

A principios de la década de 1970 se empezaron a concebir las primeras ideas sobre los algoritmos genéticos desarrolladas por Holland en la University of Michigan (Golberg, 1989), (Gen et al., 2008), (Sivanandam & Deepa, 2007). Según Holland, los algoritmos genéticos son algoritmos de

búsqueda estocásticos basados en el mecanismo de la selección natural y la genética natural (Golberg, 1989).

Estos algoritmos van creando generaciones sucesivas cada vez mejores. Generalmente, los padres son seleccionados probabilísticamente en base a la medición de la bondad con respecto al problema y la siguiente generación sustituye a los padres (Sivanandam & Deepa, 2007) (Gen et al., 2008).

Cada una de las iteraciones de un algoritmo genético está compuesta por:

- **Selección:** El primer paso consiste en la selección de los individuos para la reproducción. Esta selección se realiza aleatoriamente; la probabilidad depende de la aptitud relativa de los individuos; para la reproducción se eligen a los mejores.
- **Reproducción:** Como segundo paso se genera la descendencia. Para la generación de nuevas cromosomas, el algoritmo genético puede utilizar tanto la recombinación como la mutación.
- **Evaluación:** Posteriormente, debe evaluarse la aptitud de los nuevos cromosomas.
- **Reemplazo:** Como último paso, los individuos de la población antigua son eliminados y reemplazados por los nuevos.
- El algoritmo se detiene cuando la población converge hacia la solución óptima.

Los algoritmos genéticos no garantizan el éxito del proceso de optimización; al ser un sistema estocástico se pueden tener resultados lejanos a la solución, por ejemplo, cuando se tiene una convergencia demasiado rápida. Sin embargo, son bastante eficientes (Sivanandam & Deepa, 2007).

En los siguientes acápites se describen de forma general los componentes principales de los algoritmos genéticos.

#### 9.4.1. Cromosoma

En un algoritmo genético tradicional, la representación que se usa es una *cadena de bits de longitud fija* o cromosoma (Palisade Corporation, 2010) (Sivanandam & Deepa, 2007). Se supone que cada posición en la cadena representa una característica particular de un individuo; el valor almacenado en esa posición representa cómo esa característica se expresa en la solución. Cada gen representa una entidad que es estructuralmente independiente de otros genes (Sivanandam & Deepa, 2007).

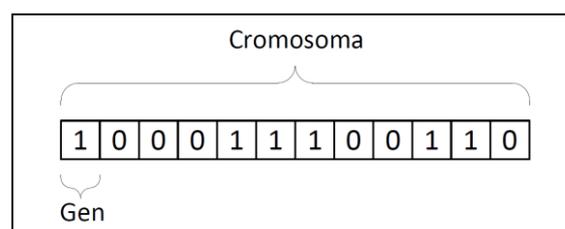


Fig. 9.3. Cromosoma y gen

#### 9.4.1.1. Codificación

La codificación de la solución de un problema en un determinado cromosoma es un punto clave para los algoritmos genéticos (Gen et al., 2008).

En el trabajo de Holland se plantea el uso de codificación binaria. Sin embargo, para aplicaciones en el mundo real, se dificulta la representación de las soluciones a través de la codificación binaria.

Entre los varios métodos de codificación se tienen (Gen et al., 2008):

- Codificación binaria
- Codificación con números reales
- Codificación de permutación entero/literal
- Una estructura de codificación de datos generales

El uso de número reales, elimina la difícil tarea de codificar y decodificar los cromosomas (Gen et al., 2008), (Palisade Corporation, 2010).

#### 9.4.2. Operadores genéticos

Cuando un algoritmo genético trabaja, tanto la búsqueda de la solución óptima como la velocidad de búsqueda son factores importantes, lo que obliga a mantener un equilibrio entre la exploración y la explotación en el espacio de búsqueda. En general, la explotación de la información acumulada resultante de la búsqueda del algoritmo genético se realiza por el mecanismo de selección, mientras que la exploración a nuevas regiones del espacio de búsqueda se realiza por medio de los operadores genéticos (Gen et al., 2008).

Los operadores genéticos imitan el proceso de la herencia de los genes para crear nuevos hijos en cada generación. Estos operadores se utilizan para alterar la composición genética de los individuos. Existen tres operadores genéticos comunes: cruce, mutación y selección (Gen et al., 2008). Estos operadores permiten que el algoritmo genético converja, a través de sucesivas generaciones, al óptimo global (o casi global) (Sivanandam & Deepa, 2007).

##### 9.4.2.1. Cruce

El principal operador de reproducción es el *cruce de cadena de bits* o cromosomas, en el que se utilizan dos cadenas como padres, a partir de los cuales se forman nuevos individuos a través del intercambio de una sub-secuencia entre las dos cadenas (Sivanandam & Deepa, 2007).

Existen dos formas convencionales de actuación del operador de cruce (Gen et al., 2008):

- Cruce simple: de un punto de corte, de dos puntos de corte, de puntos multi-corte o uniforme
- Cruce aleatorio: cruce plano, cruce mezcla

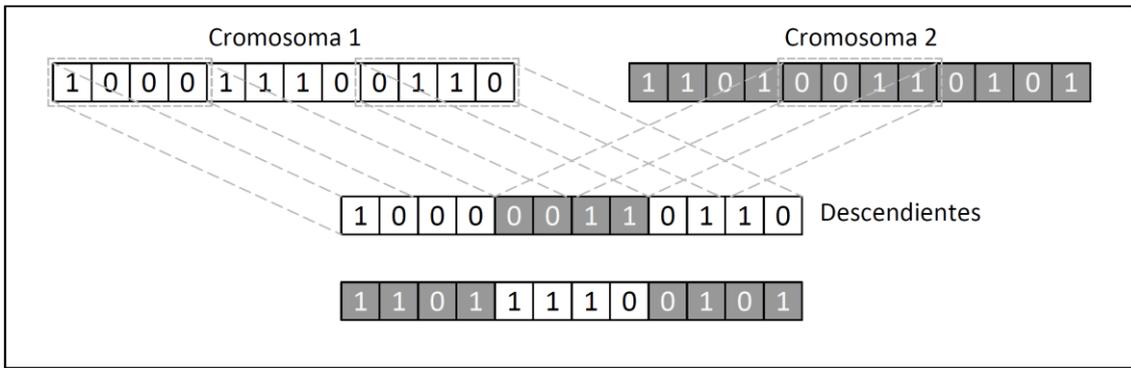


Fig. 9.4. Cruce simple con dos puntos de corte

### 9.4.2.2. Mutación

Otro operador bastante utilizado es la mutación, que produce cambios aleatorios en varios cromosomas. Una forma común de lograr la mutación es a través de la modificación de uno o más genes o bits en la cadena. En los algoritmos genéticos, la mutación tiene un rol crucial, pues con la sustitución de los genes se logra una evaluación de la población en un nuevo contexto (Gen et al., 2008).

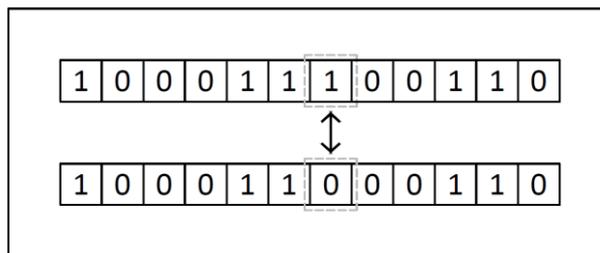


Fig. 9.5. Mutación

Existe una variedad adicional de operadores, sin embargo son poco utilizados (Sivanandam & Deepa, 2007).

### 9.4.2.3. Selección

La selección proporciona la fuerza motriz al algoritmo genético. Una selección pormenorizada hará que la búsqueda genética sea más lenta de lo necesario. Generalmente, es recomendable una menor exigencia en la selección al inicio del proceso de búsqueda, lo cual repercute en una amplia exploración del espacio de búsqueda. Es recomendable mayor exigencia al final del proceso, con el fin de reducir el espacio de búsqueda. La selección dirige la búsqueda genética hacia regiones prometedoras en el espacio de búsqueda (Gen et al., 2008).

## 9.5. Evolver

Evolver es un programa de optimización, un complemento para Microsoft Excel, basado en algoritmos genéticos (Palisade Corporation, 2010). Esta condición hace posible la incorporación de macros, que realicen simulaciones en EPANET, dentro del proceso de optimización.

El programa usa el parámetro tasa de cruce, el cual refleja la probabilidad de que un cromosoma contenga información de generaciones anterior. Una tasa de 0.5 indica que el individuo descendiente contiene aproximadamente el 50% de sus valores de variable de un padre y el resto del otro (Palisade Corporation, 2010).

También es posible usar la tasa de mutación, la cual refleja la probabilidad de que futuros escenarios contengan algunos valores aleatorios; una mayor tasa de mutación indica que se introducirán más mutaciones o valores aleatorios de genes en la población. Cuando esta tasa tiende a 1 (100% de valores aleatorios) se impide que el cruce tenga efecto debido a que Evolver generará escenarios totalmente aleatorios (Palisade Corporation, 2010).

Otras características de Evolver son el tipo de restricciones duras o blandas. Son restricciones duras aquellas condiciones que siempre deben cumplirse para que una solución sea válida. Son restricciones blandas aquellas que nos gustaría que se cumplieran en la medida de la posible, penalizando valores que superan a la restricción; por lo tanto, se pueden ignorar en favor de una gran mejora.

## **9.6. Criterios para la selección de sectores**

La selección de los sectores que cambiarán de tipo de suministro, de intermitente a continuo, debe considerar al mayor número de usuarios beneficiados; no se tienen que disminuir las condiciones de servicio de los sectores que se mantienen con suministro intermitente y deben buscarse las mejores condiciones de operación para la empresa de agua.

Los criterios utilizados para la selección de los sectores que se convertirán a suministro continuo, tras cada etapa de mejora, son cuantitativos y cualitativos.

Se usan criterios cualitativos como:

- Número o cantidad de usuarios,
- Presión de servicio,
- Distancia a la fuente de suministro y
- Equidad en el suministro del sector.

El criterio cualitativo es:

- Dificultad en la operación del sector.

Dos aspectos adicionales que deben considerarse son: la configuración topológica de la red con el fin de organizar a los sectores en el proceso de transición gradual y la presión calculada en cada etapa de mejora, que garantizará la equidad en el suministro para aquellos sectores que continúan con suministro intermitente.

### **9.6.1. Cuantificación de variables**

Cada uno de los sectores representa una variable del problema a optimizar; debe cuantificarse el peso de cada una de éstas con relación a los criterios descritos en el acápite anterior.

Deben diferenciarse aquellas variables cuantitativas directas de las inversas. Asimismo, es importante establecer las matrices de comparación pareadas y su respectivo vector propio (Saaty & Vargas, 2012) para aquellos criterios cualitativos.

### 9.6.1.1. Cantidad usuarios del sector

El cambio del tipo de suministro busca mejorar las condiciones del servicio a la mayor cantidad de usuarios; bajo esta premisa, es conveniente que en cada etapa de mejora se cambie de tipo de suministro a aquellos sectores que tengan mayor cantidad de usuarios.

Estas condiciones hacen que la cantidad de usuarios sea una variable explicativa cuantitativa directa, pues es posible obtener el número de usuarios contenidos en cada sector.

Esta variable es normalizada por la suma:

$$u_i = \frac{nc_i}{\sum_{i=1}^n nc_i}, \quad (9.2)$$

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_n), \quad (9.3)$$

donde:

$nc_i$  = número de clientes o usuarios del sector  $i$ ,

$n$  = número total de sectores de la red,

$U$  = vector de valores normalizados del número de clientes de cada sector.

### 9.6.1.2. Presión de servicio

Este criterio está relacionado con la equidad de suministro y la posibilidad de producción de fugas cuando el sector trabaje con suministro continuo. En primer lugar, los sectores que continúan con suministro intermitente deben tener buenas presiones, por lo que se priorizan a sectores de baja presión para ser seleccionados a tener suministro continuo. Por otro lado, los sectores elegidos, al tener suministro continuo tendrán mayor tiempo de suministro y, si se prioriza la selección de los sectores que tienen mayor presión, los niveles de fugas serán muy elevados en las primeras etapas de la transición.

Estas condiciones hacen de la presión de servicio una variable cualitativa inversa en el proceso de selección. La variable es convertida a variable directa por el método de la diferencia, debido a la posibilidad de existir valores de presión iguales a cero; al igual que las demás variables ésta es normalizada.

En este paso del proceso se utilizan las presiones medidas al ingreso de cada uno de los sectores:

$$p'_i = K - vp_i ; \quad K = \max(vp_1, vp_2, \dots, vp_n), \quad (9.4)$$

$$p_i = \frac{p'_i}{\sum_{i=1}^n p'_i}, \quad (9.5)$$

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n), \quad (9.6)$$

$vp_i$  = Valor de la presión de servicio del sector  $i$ ,

$P$  = vector de valores normalizados de la presión de servicio en cada sector.

### 9.6.1.3. Distancia a la fuente de suministro

La distancia desde el ingreso del sector seleccionado hasta la fuente de suministro es un elemento importante en el proceso de toma de decisiones. Cuando la distancia a los sectores con suministro continuo es corta, la tubería tiene menores posibilidades de producir fugas en el proceso de transición. En caso de existir más de un camino hacia el sector seleccionado, se usa el camino más corto para establecer la distancia de cálculo.

La distancia desde la fuente de suministro es una variable cuantitativa inversa, por lo que debe convertirse a variable directa; se usa la transformación por la inversa y posteriormente estos valores son normalizados:

$$d'_i = \frac{1}{ds_i}, \quad (9.7)$$

$$d_i = \frac{d'_i}{\sum_{i=1}^n d'_i}, \quad (9.8)$$

$$D = (d_1, d_2, \dots, d_n), \quad (9.9)$$

$ds_i$  = distancia desde la fuente de suministro hasta el sector  $i$ ,

$D$  = vector de valores normalizados de la distancia desde la fuente de suministro hasta el sector.

### 9.6.1.4. Equidad de suministro del sector

La selección de los sectores que cambian a suministro continuo debe permitir que aquellos sectores que continúan con suministro intermitente tengan equidad en su suministro. Una de las formas propuestas para medir la equidad en el suministro es a través del coeficiente de uniformidad. Sin embargo, una red con bajas presiones puede tener un buen coeficiente de uniformidad, por lo que debe buscarse que tanto la uniformidad como la disponibilidad de presión estén incluidas en un indicador de la equidad del suministro.

Para este fin, se propone el siguiente indicador que permite evaluar la capacidad y la equidad en el suministro para cada sector:

$$I_{eq,i} = \frac{Q_{máx,i}}{Q_{máxri,i}} \cdot CU_i, \quad (9.10)$$

$$CU = 1 - \frac{\sum |s_k - s_m|}{s_m \cdot n_e}, \quad (9.11)$$

$$s_k = \frac{Q_{sum,k}}{Q_{dem,k}}, \quad (9.12)$$

donde:

$I_{eq,j}$  = índice de equidad para el sector  $i$ ,

$Q_{máx,t,j}$  = caudal máximo teórico en el sector  $i$ ,

$Q_{máx,r,i,j}$  = caudal máximo requerido en suministro intermitente en el sector  $i$ ,

$CU_j$  = coeficiente de uniformidad del sector  $i$ ,

$s_k$  = relación entre el caudal suministrado y el caudal demandado del nudo  $k$ ,

$s_m$  = relación entre el caudal suministrado y el caudal demandado promedio,

$n_e$  = número de nudos evaluados del sector  $i$ ,

$Q_{sum,k}$  = caudal suministrado en el nudo  $k$ ,

$Q_{dem,k}$  = caudal demandado en el nudo  $k$ .

La relación entre el caudal máximo teórico y el caudal requerido en suministro intermitente permite evaluar la capacidad del sector cuando éste trabaja por un determinado número de horas. Como se analiza en acápites anteriores, cuanto menor es el número de horas de suministro se tiene un caudal requerido más elevado. El funcionamiento correcto del sector establecerá una relación superior a 1; de esta forma, se garantiza que el sector tiene la capacidad suficiente para el suministro intermitente logrando presiones superiores al valor mínimo. Por el contrario, cuando esta relación es menor a 1 se tiene deficiencia de capacidad en el sector, lo cual puede ser solucionado con el incremento de la presión de ingreso en el sector o la modificación de la red.

Por otro lado, el coeficiente de uniformidad permite medir el grado de homogeneidad entre los nudos de la red con relación al caudal suministrado y el caudal demandado. Valores más cercanos a 1 garantizan una mayor equidad en el suministro, mientras que valores menores muestran mayor diferencia en el suministro entre los nudos.

Estas razones hacen del índice de equidad una herramienta muy útil para la evaluación de la equidad del suministro en un sector o en una red. Cuando se tienen valores superiores a 1, el sector permite un suministro equitativo; sin embargo, con valores inferiores a 1 el sector tiene deficiencias, por lo cual, no se logra un suministro equitativo.

Para el proceso de transición debe priorizarse la selección de los sectores con menor equidad para tener suministro continuo. Valores altos en los sectores no seleccionados, que continúan con suministro intermitente, permitirán garantizar la equidad del suministro en el proceso de transición.

Estas razones convierten a la variable equidad de suministro en inversa cuantitativa. Es cuantitativa porque es posible calcular el valor del índice de equidad en base al modelo hidráulico de cada sector. La variable debe ser convertida a directa y posteriormente normalizada para el proceso de optimización.

Debido a que el índice de equidad puede adoptar el valor de cero, la conversión a variable directa se realiza por el método de la diferencia:

$$e'_i = K_{eq} - I_{eq,i} ; \quad K_{eq} = \max(I_{eq,1}, I_{eq,2}, \dots, I_{eq,n}) \quad (9.13)$$

$$e_i = \frac{e'_i}{\sum_{i=1}^n e'_i}, \quad (9.14)$$

$$E = (e_1, e_2, \dots, e_n), \quad (9.15)$$

$E$  = vector de valores normalizados de la equidad de cada sector.

### 9.6.1.5. Dificultad de operación del sector

Se considera la dificultad de operación del sector como un criterio cualitativo, debido a que su valoración depende de varios elementos que son difícilmente cuantificables, como las dificultades en el trabajo de operación manual, la presencia de válvulas disponibles e, incluso, las quejas de los usuarios del sector. Esta situación es percibida por los expertos de la empresa de agua, por lo que es necesario consultarles para la evaluación de este criterio.

Este es un criterio que es útil para la selección de los sectores: aquellos que tengan mayor facilidad de operación serán proclives a seguir teniendo suministro intermitente, y aquellos que tengan dificultades será conveniente tenerlos con suministro continuo.

Al ser un criterio cualitativo, se realizan encuestas a los expertos de la empresa de agua. La cuantificación es realizada estableciendo la matriz de comparación pareada del método AHP para los sectores de la red. La media geométrica de las ponderaciones calculadas a través de los vectores propios de cada experto es normalizada por la suma.

$$O' = (o'_1, o'_2, \dots, o'_n), \quad (9.16)$$

$O'$  = vector de valores normalizados de la dificultad en la operación de cada sector.

### 9.6.2. Topología de la red

Cuando algunos sectores empiecen a tener suministro continuo, varios tramos de la red se encontrarán con agua y con presión en horas en las cuales anteriormente no existía agua, lo cual incide en el incremento de fugas. Asimismo, no puede ser prioritario dar suministro continuo a un sector que se encuentre en un extremo de la red, en cuyo trayecto se encuentran sectores con suministro aún intermitente. Por estas razones, debe existir un orden en la selección de los sectores en función de la configuración y topología de la red, además de las mejoras y la selección de sectores para tener suministro continuo en etapas previas del proceso de transición.

Para incluir a la topología de la red en el modelo utilizado para la optimización, se considera la matriz de adyacencia del grafo dirigido de la red simplificada; simplificada en el sentido de que se unen con arcos todos los sectores; cada arco representa el camino que el agua debe seguir para llegar del punto de alimentación de un sector a otro.

Para ilustrar mejor lo descrito se expone el siguiente ejemplo, en el cual se parte de una red simplificada a través de un grafo dirigido; los nudos representan al ingreso de agua de cada sector.

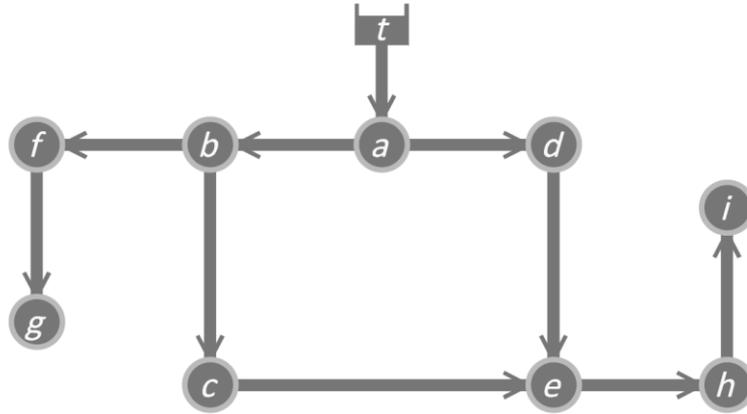


Fig. 9.6. Grafo dirigido de una red simplificada

La matriz de adyacencia  $A$   $(n+t) \times (n+t)$  del grafo dirigido, donde  $n$  es el número de nudos y  $t$  es el número de fuentes de suministro, es:

$$A = \begin{pmatrix} & t & a & b & c & d & e & f & g & h & i \\ t & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (9.17)$$

Se determina la matriz traspuesta de  $A$  para continuar con los cálculos.

$$A^T = \begin{pmatrix} & t & a & b & c & d & e & f & g & h & i \\ t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ d & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ f & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (9.18)$$

Asimismo, se tiene un vector  $S$  de variables binarias, que establece la selección de los nudos o sectores de la red. En el proceso de optimización, este vector debe estar configurado por los nudos seleccionados para tener suministro continuo, incluyendo la fuente de suministro.

$$S = (t, x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (9.19)$$

$$x_j \text{ es binario, } \forall j = 1, 2, \dots, n$$

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{sector con suministro continuo} \\ 0 & \text{sector con suministro intermitente} \end{cases},$$

$$t = 1$$

donde:

$S$  = vector de variables binarias que define la selección del sector o nudo  $x_j$  para tener suministro continuo; incluye la fuente de suministro  $t$ ,

$n$  = número total de nudos en la red, sin incluir a las fuentes de suministro.

Al multiplicar la matriz transpuesta de  $A$  por el vector de variables binarias  $S$ , se tiene un nuevo vector que establece la posibilidad de selección de los siguientes nudos. Cuando el valor calculado en el nudo es igual o superior a 1, es posible su selección como nudo adyacente.

$$A^T \times S = G_e, \quad (9.20)$$

$$G_e = (g_t, g_{e1}, \dots, g_{en}), \quad (9.21)$$

donde:

$A$  = matriz de adyacencia del grafo dirigido,

$G_e$  = vector que define el grado de entrada parcial, según la selección de nudos,

$t$  = nudos que representan las fuentes de suministro.

En principio, el depósito o reservorio  $t$  debe estar seleccionado por ser la fuente de suministro, por lo que le corresponde un valor de 1.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ a = 1 \\ b = 0 \\ c = 0 \\ d = 0 \\ e = 0 \\ f = 0 \\ g = 0 \\ h = 0 \\ i = 0 \end{pmatrix}. \quad (9.22)$$

El resultado habilita solamente al nudo  $a$  para su selección, pues este tiene un grado de entrada igual o superior a 1; los demás nudos no son seleccionables pues no hay ningún vértice o tubería que llega hasta ellos; su grado de entrada es igual a 0.

Seleccionando entonces el nudo  $a$ , introducimos el valor de 1 en el vector  $S$  correspondiente al nudo  $a$ :

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ a=1 \\ b=1 \\ c=0 \\ d=1 \\ e=0 \\ f=0 \\ g=0 \\ h=0 \\ i=0 \end{pmatrix}. \quad (9.23)$$

Se habilitan los nudos  $b$  y  $d$ , adoptando el valor de 1; estos son los nudos potenciales a seleccionar en el siguiente paso. En el caso de seleccionar  $b$  se habilitan otros nudos:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ a=1 \\ b=1 \\ c=1 \\ d=1 \\ e=0 \\ f=1 \\ g=0 \\ h=0 \\ i=0 \end{pmatrix}. \quad (9.24)$$

Ahora adoptan un valor de 1 los nudos que están conectados a  $b$  ( $c$  y  $f$ ); los nudos  $e$ ,  $g$ ,  $h$  e  $i$  no son seleccionables aún, pues no hay nudos previamente seleccionados que permitan llegar a éstos.

Cuando se selecciona el nudo  $c$  se habilita el nudo  $d$ , que permite el acceso hasta  $i$ . Por otro lado, la selección de  $f$  habilita la selección de  $g$ .

Cuando se tienen seleccionados todos los nudos se tiene como resultado el grado de entrada de los vértices del grafo dirigido.

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ a=1 \\ b=1 \\ c=1 \\ d=1 \\ e=2 \\ f=1 \\ g=1 \\ h=1 \\ i=1 \end{pmatrix}. \quad (9.25)$$

En este sentido, cuando el grado de entrada de un vértice es cero, no es posible su selección, ya que no existe un vértice previo seleccionado; por otro lado, cuando este grado es igual o superior a 1, el vértice puede ser seleccionado pues es contiguo a un nudo anteriormente elegido. En base a esta característica del grafo dirigido, es posible incluir la topología de la red dentro de la modelización del problema de optimización, incluyendo como restricción el grado de entrada de los nudos producto de la selección de nudos o sectores de la red en una etapa previa.

### 9.6.3. Presión calculada en cada etapa de mejora

Cada etapa de mejora de la red y el cambio de algunos sectores a suministro continuo implican modificaciones en las presiones de ingreso a los sectores. Con el fin de no perjudicar a sectores que seguirán con suministro intermitente, se propone no realizar el cambio de tipo de suministro si no se garantiza que los nudos de la red tengan una presión mínima requerida.

El cálculo de presiones debe realizarse en cada una de las horas de estudio, utilizando la demanda correspondiente a cada sector, ya sea demanda en suministro continuo o en suministro intermitente. El cálculo hidráulico en cada paso del proceso de optimización busca lograr una transición que garantice la equidad del suministro en cada etapa. Se convierte en la principal restricción para decidir si en una etapa de mejora de la red se procede con el cambio a suministro continuo de algunos sectores.

En cada hora, con el patrón de suministro de cada sector, se define un estado de carga para el cual se encuentra la presión mínima, la cual sirve para la comparación con la presión de referencia.

El vector que reúne estos valores de presión es:

$$Pc = (Pc_1, Pc_2, \dots, Pc_m), \quad (9.26)$$

$$Pc_j = \min(Ps_{1j}, Ps_{2j}, \dots, Ps_{nj}), \quad (9.27)$$

donde:

$Pc_j$  = presión mínima calculada en la hora de suministro  $j$  en toda la red,

$Ps_{ij}$  = presión calculada en el sector  $i$  a la hora de suministro  $j$ .

La modelización hidráulica se realiza en DDA, pues se quiere lograr el suministro continuo, donde se asume que no deben existir depósitos domiciliarios. Asimismo, el cálculo en DDA permite

obtener la situación más crítica, relacionada con la presión (en DDA pueden obtenerse incluso presiones negativas), en comparación con la modelización en PDD; por lo tanto es más útil en este proceso.

#### 9.6.4. Ponderación de criterios

Es necesario realizar la ponderación de los criterios que se utilizan para el proceso de optimización; si este paso es obviado se tiene un peso igual para todos los criterios. En esta fase también la opinión de los expertos es importante, pues define el peso de cada uno de los criterios tomados en cuenta para lograr la mejor selección de los sectores que irán teniendo suministro continuo en cada una de las etapas de ampliación de la capacidad de la red.

Los criterios a ponderar son:

- Número o cantidad de usuarios,
- Presión de servicio,
- Distancia a la fuente de suministro y
- Equidad en el suministro del sector.
- Facilidad en la operación del sector.

La respuesta de los expertos da como resultado vectores propios de prioridades, que son normalizados, y se calcula la media geométrica de estos valores que representa la opinión conjunta de los expertos de la empresa de agua; estos valores son agrupados en un vector  $W$ :

$$W = (wc', wp', wd', we', wo'), \quad (9.28)$$

donde:

$wc'$  = peso del criterio número de usuarios,

$wp'$  = peso del criterio presión de servicio,

$wd'$  = peso del criterio distancia a la fuente de suministro,

$we'$  = peso del criterio equidad en el suministro,

$wo'$  = peso del criterio facilidad en la operación.

#### 9.6.5. Cálculo de factores por cada criterio

Ya definidos los pesos de cada uno de los criterios, se calculan los factores por cada criterio en cada uno de los sectores de la red; estos valores pueden servir como primera referencia de las prioridades en la selección de los sectores que se convertirán a suministro continuo; sin embargo, la selección final debe ser el resultado del proceso de optimización.

Factores que dependen del número de usuarios del sector:

$$Wc = wc' \cdot U = (wc' \cdot u_1, wc' \cdot u_2, \dots, wc' \cdot u_n), \quad (9.29)$$

$$Wc = (wc_1, wc_2, \dots, wc_n). \quad (9.30)$$

Factores que dependen de la presión de servicio del sector:

$$Wp = wp' \cdot P = (wp' \cdot p_1, wp' \cdot p_2, \dots, wp' \cdot p_n), \quad (9.31)$$

$$Wp = (wp_1, wp_2, \dots, wp_n). \quad (9.32)$$

Factores que dependen de la distancia desde la fuente de suministro al sector:

$$Wd = wd' \cdot D = (wd' \cdot d_1, wd' \cdot d_2, \dots, wd' \cdot d_n), \quad (9.33)$$

$$Wd = (wd_1, wd_2, \dots, wd_n). \quad (9.34)$$

Factores que dependen de la equidad en el suministro de cada sector:

$$We = we' \cdot E = (we' \cdot e_1, we' \cdot e_2, \dots, we' \cdot e_n), \quad (9.35)$$

$$We = (we_1, we_2, \dots, we_n). \quad (9.36)$$

Factores que dependen de la facilidad en la operación del sector:

$$Wo = wo' \cdot O' = (wo' \cdot o'_1, wo' \cdot o'_2, \dots, wo' \cdot o'_n), \quad (9.37)$$

$$Wo = (wo_1, wo_2, \dots, wo_n). \quad (9.38)$$

## 9.7. Cambio de patrón de suministro

El proceso de selección de sectores que cambian a suministro continuo está basado en el cambio del patrón de suministro; por lo tanto, es necesario definir el patrón de suministro de cada uno de los sectores en condiciones de intermitencia y de continuidad. De esta forma, se configura el patrón de suministro de toda la red desde que ésta tiene suministro intermitente hasta que toda cuenta con abastecimiento continuo. Se incluyen las etapas del proceso de transición, donde se tiene un patrón de consumo con algunos sectores bajo suministro continuo y otros con suministro intermitente.

Inicialmente, cada uno de los sectores tiene un horario de entrega de agua por partir del suministro intermitente, el cual es representado por el vector  $H$ :

$$H_1 = (h_{11}, h_{21}, \dots, h_{m1})$$

$$H_2 = (h_{12}, h_{22}, \dots, h_{m2}), \quad (9.39)$$

⋮

$$H_n = (h_{1n}, h_{2n}, \dots, h_{mn})$$

$h_{ij}$  es binario,  $\forall i = 1, 2, \dots, m \wedge j = 1, 2, \dots, n$

$$h_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{hora con suministro} \\ 0 & \text{hora sin suministro} \end{cases},$$

donde:

$m$  = número total de horas del día,

$n$  = número total de sectores de la red.

Multiplicando el vector de horarios de cada sector por su correspondiente volumen horario (ecuación 9.1), se tiene su vector  $B$ :

$$\begin{aligned} B_1 &= Vs_1 \cdot (h_{11}, h_{21}, \dots, h_{m1}) = (b_{11}, b_{21}, \dots, b_{m1}) \\ B_2 &= Vs_2 \cdot (h_{12}, h_{22}, \dots, h_{m2}) = (b_{12}, b_{22}, \dots, b_{m2}) \\ &\vdots \\ B_n &= Vs_n \cdot (h_{1n}, h_{2n}, \dots, h_{mn}) = (b_{1n}, b_{2n}, \dots, b_{mn}) \end{aligned} \quad (9.40)$$

El patrón de suministro continuo utilizado para el proceso de transición puede ser de una ciudad o zona con características similares.

En suministro continuo, el volumen diario debe ser multiplicado por cada uno de los factores de consumo por hora, representado por el vector  $K$ ,

$$K = (k_1, k_2, \dots, k_m), \quad (9.41)$$

donde:

$K$  = vector que reúne los factores de modulación de cada hora.

Por lo tanto, el patrón de consumo de cada uno de los sectores está definido por el producto del volumen por hora y el vector de los factores de modulación:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{Vd_1}{m} \cdot (k_1, k_2, \dots, k_m) = (a_{11}, a_{21}, \dots, a_{m1}) \\ A_2 &= \frac{Vd_2}{m} \cdot (k_1, k_2, \dots, k_m) = (a_{12}, a_{22}, \dots, a_{m2}) \\ &\vdots \\ A_n &= \frac{Vd_n}{m} \cdot (k_1, k_2, \dots, k_m) = (a_{1n}, a_{2n}, \dots, a_{mn}) \end{aligned} \quad (9.42)$$

## 9.8. Optimización de la selección de sectores que cambian a suministro continuo

Como se quieren seleccionar sectores para su transición a suministro continuo, existirán dos vectores binarios que componen el conjunto de variables del proceso de optimización.

El primer vector,  $Y$ , es el que define la condición de intermitencia del sector: el sector que tiene suministro intermitente adopta un valor de 1 y el sector que pase a suministro continuo tendrá un valor de 0. Cada una de los componentes del vector  $Y$  adopta el valor de 1 como valor inicial en un sistema con suministro intermitente:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n), \quad (9.43)$$

$y_j$  es binario,  $\forall j = 1, 2, \dots, n$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{sector con suministro intermitente} \\ 0 & \text{sector con suministro continuo} \end{cases},$$

donde:

$Y$  = Vector de variables binarias que reúne a todos los sectores de la red y define el suministro intermitente del sector  $y_j$ ;

$n$  = número total de sectores de la red.

El segundo vector,  $X$ , es el complementario al primer vector  $Y$ , y está relacionado con el suministro continuo. Los sectores que alcanzan a tener suministro continuo adoptan el valor de 1 y los que todavía tienen suministro intermitente se mantienen con 0.

En un sistema con suministro intermitente que empieza el proceso de transición, este vector parte con todos sus elementos con valor 0.

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (9.44)$$

$x_j$  es binario,  $\forall j = 1, 2, \dots, n$

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{sector con suministro continuo} \\ 0 & \text{sector con suministro intermitente} \end{cases}$$

$X$  = vector de variables binarias que reúne a todos los sectores de la red y que define el suministro continuo del sector  $x_j$ .

Este vector define a los sectores que se transformarán a suministro continuo en cada una de las etapas de mejora.

Los vectores  $X$  e  $Y$  son complementarios, pues un sector tendrá suministro intermitente o continuo y no ambos, por lo que la suma de los elementos de ambos debe ser igual a 1, una restricción para el problema de optimización.

La curva que define el proceso de transición está conformada por la suma de volúmenes en cada hora de suministro; incluye tanto a sectores que siguen con suministro intermitente como a sectores que ya cuentan con suministro por veinticuatro horas. Para la diferenciación del tipo de suministro son muy útiles los vectores  $X$  e  $Y$  ya descritos. Esta curva adopta el patrón de consumo de un sistema con suministro continuo al final del proceso. La curva de transición está definida por el vector  $T$ :

$$\begin{aligned} t_1 &= \sum_{j=1}^n (a_{1j} \cdot x_j + b_{1j} \cdot y_j) \\ t_2 &= \sum_{j=1}^n (a_{2j} \cdot x_j + b_{2j} \cdot y_j), \\ &\vdots \end{aligned} \quad (9.45)$$

$$\begin{aligned} t_m &= \sum_{j=1}^n (a_{mj} \cdot x_j + b_{mj} \cdot y_j) \\ T &= (t_1, t_2, \dots, t_m), \end{aligned} \quad (9.46)$$

$$Q_t = \max(t_1, t_2, \dots, t_m), \quad (9.47)$$

donde:

$$Q_t = \text{caudal pico del proceso de transición.}$$

El valor máximo del vector  $T$  representa al caudal pico del suministro. Inicialmente, este caudal pico se produce en suministro intermitente; tras el proceso de transición el caudal pico es igual al pico del suministro continuo.

Debido a la existencia de dos tipos de curva de suministro intermitente, menor y mayor al caudal pico del suministro continuo, se establecen dos enfoques del problema de optimización para abordar cada uno de estos escenarios.

### 9.8.1. Caudal pico en suministro intermitente mayor al caudal pico en suministro continuo

Cuando el sistema con suministro intermitente produce un caudal pico superior al caudal pico en suministro continuo, se tienen presiones muy bajas en la red. Por lo tanto, el proceso de optimización debe buscar reducir el caudal pico a través de la transformación de algunos sectores a suministro continuo.

Si la presión evaluada al ingreso de cada sector, en cada etapa, supera un determinado valor de referencia, es posible adoptar el cambio a suministro continuo de algunos sectores. De esta forma, la transición es gradual, con mejoras progresivas de la presión, hasta lograr que todos los sectores cuenten con agua por veinticuatro horas.

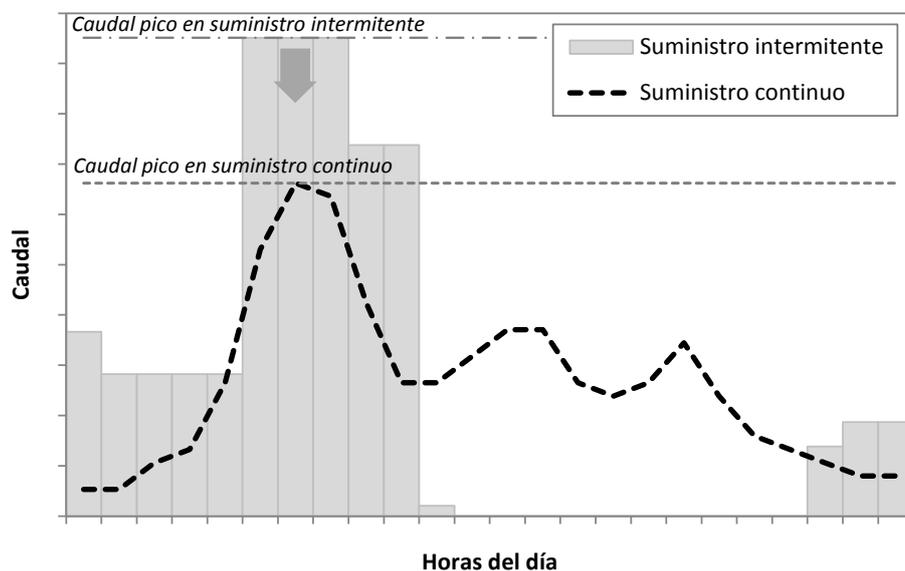


Fig. 9.7. Esquema del proceso de optimización cuando el caudal pico de la curva de suministro intermitente es superior al caudal de la curva de suministro continuo

#### 9.8.1.1. Problema de optimización

El problema de optimización busca maximizar la cantidad de sectores que tendrán suministro continuo en cada etapa, basada en favorecer a la mayor cantidad de usuarios, permitir una mejor presión de servicio en los sectores que continúan con suministro intermitente, reducir la distancia de los tramos que puedan producir fugas durante el proceso de transición, priorizar la equidad en el

suministro en sectores con suministro intermitente y facilitar las tareas de operación para la empresa de agua. Asimismo, se busca reducir el caudal pico del suministro intermitente.

Por lo tanto, el problema de optimización es:

$$\text{Maximizar } \sum_{j=1}^n (wc_j \cdot x_j + wp_j \cdot x_j + wd_j \cdot x_j + we_j \cdot x_j + wo_j \cdot x_j), \quad (9.48)$$

sujeto a:

$$x_1 + y_1 = 1; \quad x_2 + y_2 = 1; \quad \dots; \quad x_n + y_n = 1, \quad (9.49)$$

$$t_1 \leq Q_t; \quad t_2 \leq Q_t; \quad \dots; \quad t_m \leq Q_t, \quad (9.50)$$

$$Pc_1 \geq P_{ref}; \quad Pc_2 \geq P_{ref}; \quad \dots; \quad Pc_m \geq P_{ref}, \quad (9.51)$$

$$x_1 \leq g_{e1}; \quad x_2 \leq g_{e2}; \quad \dots; \quad x_n \leq g_{en}, \quad (9.52)$$

donde:

$P_{ref}$  = presión mínima de referencia en el sector para optar por suministro continuo.

La primera restricción (9.49) está relacionada con la imposibilidad de un sector de tener ambos tipos de suministro: o se mantiene con el suministro intermitente o es seleccionado para tener suministro continuo. Como el tipo de suministro es definido por variables binarias, la suma del sector trabajando como intermitente ( $Y$ ) y con suministro continuo ( $X$ ) debe ser igual a 1.

Otra restricción importante, la (9.50), está relacionada con la limitación del caudal pico en cada etapa de mejora. Esto permite no tener caudales pico superiores al caudal pico inicial. Por ejemplo, el caudal pico de suministro del sistema tendería a incrementarse si se cambia a suministro continuo un sector cuyas horas de entrega de agua inicialmente no son horas de mayor consumo.

Es importante restringir la presión mínima en cada posible escenario a ser seleccionado, (9.51). Hasta que no se cumpla con una presión mínima de referencia en el ingreso a los sectores, no será posible la transición de los sectores. En el mejor caso, se deberán elegir aquellos sectores cuyo cambio a suministro continuo permita superar la presión mínima de referencia.

Finalmente, un elemento importante como restricción está relacionado con la topología de la red (9.52). Para la selección de un sector debe tomarse en cuenta el grado de entrada del vértice o nudo: éste debe ser mayor o igual al valor binario de selección (vector  $X$ ), de esta forma se garantiza que no se seleccionen nudos con grado de entrada iguales a cero, los cuales no estarían directamente conectados a los nudos seleccionados, pues la selección implica siempre un valor de 1.

### 9.8.2. Caudal pico en suministro intermitente menor al caudal pico en suministro continuo

Si el caudal pico en suministro intermitente es menor al caudal pico en suministro continuo, la selección de sectores para que trabajen por veinticuatro horas dependerá de la capacidad de la red. Como el proceso de transición es gradual, cada etapa de mejora implica un nuevo caudal máximo teórico, que establece la capacidad de la red; este caudal no debe ser superado por la curva de

suministro en transición. Por lo tanto, existe la posibilidad de que solamente algunos sectores cambien a suministro continuo en cada etapa: aquellos que no perjudiquen a los otros sectores reduciendo la presión.

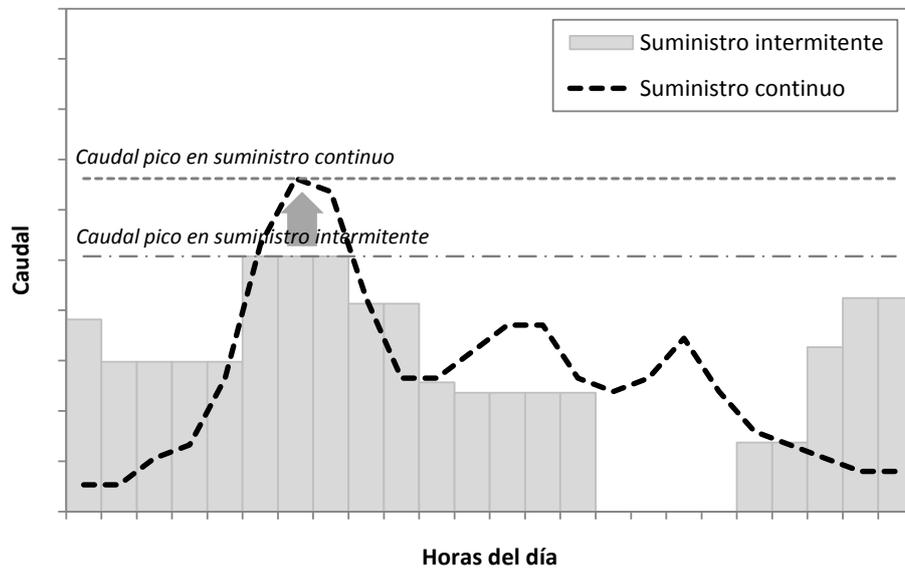


Fig. 9.8. Esquema del proceso de optimización cuando el caudal pico de la curva de suministro intermitente es inferior al caudal de la curva de suministro continuo

La curva de suministro en transición tendrá un caudal pico más grande en cada una de las etapas de mejora, lo cual implica que cada vez se van transformando más sectores a suministro continuo. La transición desde un caudal pico menor permite que las presiones de servicio vayan mejorando de forma gradual.

Es conveniente que el proceso de transición comience por la mejora de las condiciones del servicio en estado intermitente a través de medidas de gestión técnica y, posteriormente, pueden ejecutarse las mejoras en la infraestructura que permitan tener el suministro por veinticuatro horas.

### 9.8.2.1. Problema de optimización

En este caso, el problema de optimización también busca maximizar la cantidad de sectores que se convertirán a suministro continuo, en base a los mismos criterios considerados en la ecuación 9.48. Se considera el caudal máximo teórico de cada etapa de mejora no sea superado por la curva de suministro del proceso de transición. Asimismo, se tienen en cuenta las presiones de suministro, que deben ser superiores a un valor de referencia en cada una de las etapas de mejora.

$$\text{Maximizar } \sum_{j=1}^n (wc_j \cdot x_j + wp_j \cdot x_j + wd_j \cdot x_j + we_j \cdot x_j + wo_j \cdot x_j), \quad (9.53)$$

sujeto a:

$$x_1 + y_1 = 1; \quad x_2 + y_2 = 1; \quad \dots; \quad x_n + y_n = 1, \quad (9.54)$$

$$t_1 \leq Q_{\text{máxte}}; \quad t_2 \leq Q_{\text{máxte}}; \quad \dots; \quad t_m \leq Q_{\text{máxte}}, \quad (9.55)$$

$$Pc_1 \geq P_{\text{ref}}; \quad Pc_2 \geq P_{\text{ref}}; \quad \dots; \quad Pc_m \geq P_{\text{ref}}, \quad (9.56)$$

$$x_1 \leq g_{e1}; \quad x_2 \leq g_{e2}; \quad \dots; \quad x_n \leq g_{en}, \quad (9.57)$$

donde:

$Q_{\text{máxte}}$  = caudal máximo teórico de la etapa de mejora.

Las restricciones se mantienen iguales al problema de optimización cuando el caudal pico en suministro intermitente es superior al caudal pico en suministro continuo. Sin embargo, la segunda restricción se modifica, pues limita el caudal pico en cada etapa de mejora, ajustándose a la capacidad de la red en cada una de ellas.

## CAPÍTULO 10. Caso de estudio: zona sur de la ciudad de Oruro, Bolivia

---

### 10.1. Introducción

En el presente capítulo se aplican cada una de los procesos desarrollados en los capítulos precedentes, para lograr una transición gradual a suministro continuo. Para este fin, se toma como caso de estudio al subsistema de agua potable de la zona sur de la ciudad de Oruro (Bolivia), que actualmente es uno de los subsistemas con suministro intermitente de la ciudad.

En principio, se realiza la sectorización de una pequeña red, con el fin de aplicar la metodología propuesta en el *Capítulo 6* y realizar un seguimiento detallado del algoritmo. Se usa una red diferente debido a que el subsistema de la zona sur de Oruro ya está sectorizado, por lo tanto solamente requiere de la evaluación.

Tras el diagnóstico del sistema de suministro intermitente, donde se plantean las medidas correspondientes para lograr el suministro continuo, basado en los *Capítulos 4 y 5*, se analiza cómo en el subsistema, que nació con suministro continuo, se optó por la política de suministrar agua por horas. Para lo cual se utiliza el concepto del caudal máximo teórico para medir la capacidad de la red y establecer un parámetro de comparación con las mismas magnitudes que la demanda (*Capítulo 3*). De esta forma, es posible analizar las deficiencias de la red en el proceso de transformación a suministro intermitente.

Posteriormente, en base a la propuesta del *Capítulo 7*, se gestionan los horarios de suministro de la red, como primera medida a corto plazo para mejorar el servicio en la zona sur de Oruro. Sin embargo, un proceso de transición a suministro continuo puede también obviar este paso.

El siguiente paso es el diagnóstico de la capacidad de la red; generalmente los sistemas con suministro intermitente tienen deficiencias en la capacidad de la red; por lo tanto, se plantea la ampliación de la capacidad, la cual se realizará por etapas en base a las limitaciones presupuestarias de la empresa de agua de la ciudad de Oruro. Asimismo, se define el coste anual del control activo de fugas que debe ser paralelo al proceso de ampliación y transición a suministro continuo (*Capítulo 8*).

Finalmente, se realiza la transición gradual de los sectores en cada una de las etapas definidas en el proceso de ampliación de la capacidad, en base a lo propuesto en el *Capítulo 9*. De esta forma, se van seleccionando los sectores que van transformándose gradualmente a suministro continuo, hasta lograr que toda la red cuente con suministro por veinticuatro horas.

El proceso global permite establecer un proceso de transición a suministro continuo de forma gradual, enmarcado en las limitaciones económicas de la empresa de agua, convirtiéndose en una propuesta técnicamente viable, muy útil para mejorar la calidad de vida de los usuarios del suministro intermitente en países en vías de desarrollo.

## 10.2. Sectorización de una red con suministro intermitente

La red presentada en la Fig. 10.1, tiene suministro de agua por solo cuatro horas al día; el caudal demandado para cubrir las necesidades de la población en este periodo es de 12.64 l/s; la presión mínima de servicio es 10 mca. El nivel mínimo de agua en el depósito que alimenta a la red se encuentra a una cota de 3737 msnm. La red tiene una elevación promedio de 3718 msnm.

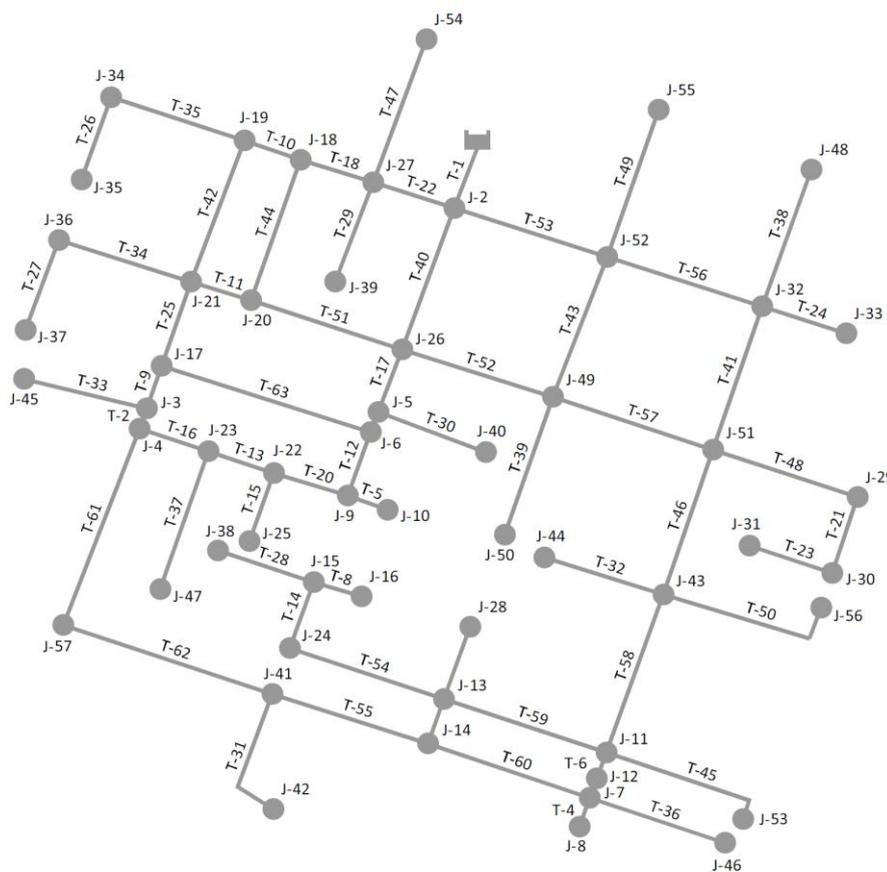


Fig. 10.1. Modelo de la red con suministro intermitente a sectorizar

Bajo estas condiciones, se busca que los usuarios tengan un suministro equitativo, lo cual se logra si la diferencia de presiones entre el valor máximo y el mínimo no supera los 5 mca.

### 10.2.1. Evaluación preliminar de la red

La primera opción para mejorar el servicio en una red con suministro intermitente no siempre es la sectorización; pueden probarse otras opciones de gestión técnica con el fin de evitar la inversión que conlleva la sectorización o división de la red.

Para una primera evaluación de la red, se determina la curva de consigna y el caudal máximo teórico de la red que cumpla con la presión mínima de servicio de 10 mca.

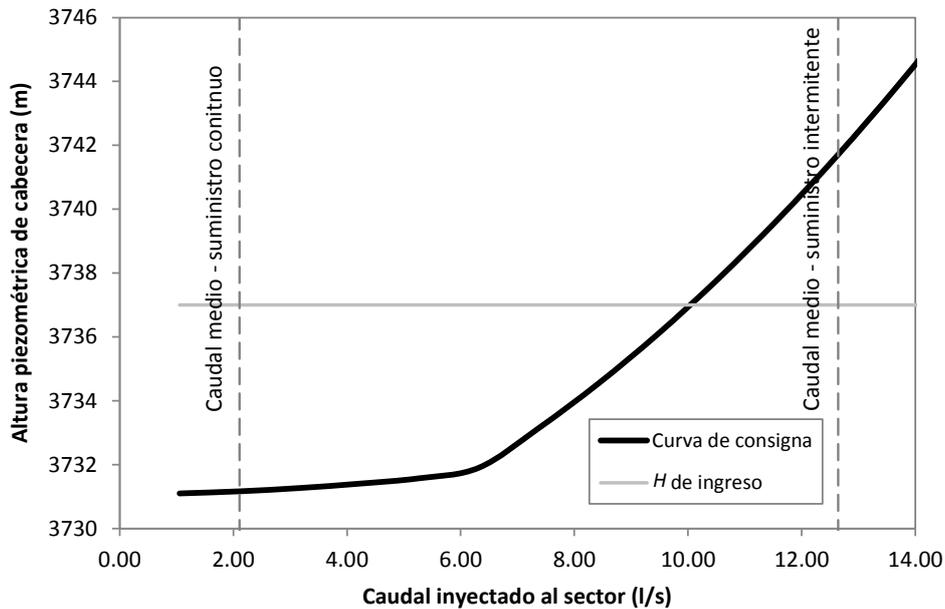


Fig. 10.2. Comparación del caudal máximo teórico y los caudales medios en suministro intermitente y continuo

El caudal máximo teórico de la red es 10.04 l/s, que no cubre el requerimiento de la población en suministro intermitente (12.64 l/s). Una forma de alcanzar el requerimiento de la población es a través de la reducción de la presión mínima de servicio ( $P_{min} = 5.30$  mca), lo cual reconfigura la curva de consigna hasta alcanzar el caudal demandado.

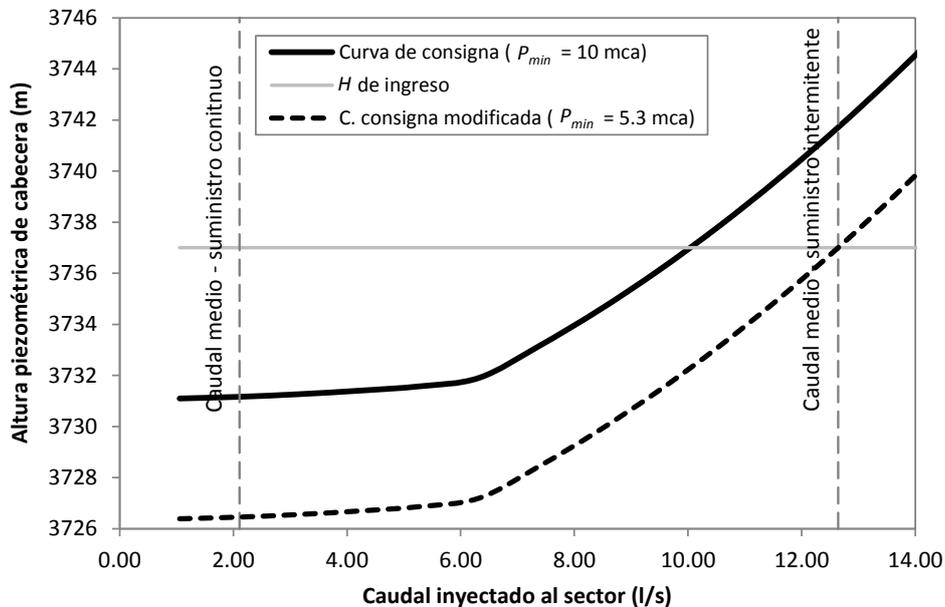


Fig. 10.3. Reducción de la presión mínima para cubrir el suministro intermitente

En este escenario, evidentemente, no se cumple con la presión mínima de 10 mca. Con relación a la diferencia de presión, que establece la equidad del suministro, se tiene:

$$P_{\min} = 5.30 \text{ mca}, \quad (10.1)$$

$$P_{\max} = 17.29 \text{ mca}, \quad (10.2)$$

$$\Delta P = 17.29 - 5.30 = 11.99 \text{ mca} > 5 \text{ mca}. \quad (10.3)$$

Por lo tanto, el suministro tampoco es equitativo. Al no cumplir con estas dos condiciones básicas, es necesario evaluar otras soluciones.

Una segunda alternativa de solución es ampliar el número de horas de suministro; de esta forma, es posible reducir el caudal medio en suministro intermitente hasta que su valor sea igual a la capacidad de la red.

$$Q_{\max} = 10.04 \text{ l/s}, \quad (10.4)$$

$$Q_{\text{int}} = 12.64 \text{ l/s}, \quad (10.5)$$

$$N = 4 \text{ h}. \quad (10.6)$$

Usando la relación (6.22):

$$t_{\min} = \frac{N \cdot Q_{\text{int}}}{Q_{\max}}, \quad (10.7)$$

$$t_{\min} = \frac{4 \cdot 12.64}{10.04} = 5.04 \text{ h}. \quad (10.8)$$

Modificando el tiempo de suministro del sector a un tiempo superior a 5.04 horas, se lograría un caudal que puede ser cubierto por la capacidad de la red (10.04 l/s); por consiguiente, en este escenario las presiones en los nudos son superiores a 10 mca. Sin embargo, también debe evaluarse la diferencia de presiones para verificar si el suministro es equitativo.

$$P_{\min} = 10.00 \text{ mca}, \quad (10.9)$$

$$P_{\max} = 17.88 \text{ mca}, \quad (10.10)$$

$$\Delta P = 17.88 - 10.00 = 7.88 \text{ mca} > 5 \text{ mca}. \quad (10.11)$$

La diferencia de presiones es superior a 5 mca, por lo tanto en este escenario tampoco se logra la equidad deseada.

Tanto la modificación de la presión mínima, como la modificación del tiempo de suministro no garantizan equidad en el suministro; por lo que es necesario sectorizar o dividir la red en búsqueda de esta equidad.

## 10.2.2. Variables para el proceso de clustering

Las variables utilizadas para el proceso de agrupamiento, en búsqueda de lograr equidad en el suministro del sector generado, son:

- Coordenada en  $x$  del nudo,
- Coordenada en  $y$  del nudo,

- Elevación o cota del nudo,
- Presión de servicio cuando toda la red trabaja con el caudal máximo teórico,
- Grado del nudo.

Los valores medidos de cada una de las variables son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 10.1. Variables para el proceso de clustering

Nº	Nudo	x (m)	y (m)	z (m)	Presión (mca)	Grado
1	J-2	698074.22	8010604.23	3719.00	17.87	4
2	J-3	697855.66	8010454.61	3719.00	16.05	3
3	J-4	697853.41	8010448.53	3718.98	16.06	3
4	J-5	698020.42	8010456.06	3718.36	17.57	3
5	J-6	698016.66	8010445.85	3718.29	17.61	3
6	J-7	698171.09	8010187.53	3716.17	12.07	3
7	J-8	698164.83	8010169.60	3716.05	12.19	1
8	J-9	698000.20	8010400.32	3718.02	17.83	3
9	J-10	698022.72	8010392.98	3717.97	17.88	1
10	J-11	698182.09	8010219.11	3716.38	12.12	4
11	J-12	698173.83	8010195.40	3716.21	12.29	1
12	J-13	698068.24	8010257.11	3716.86	11.47	4
13	J-14	698056.93	8010225.97	3716.81	11.57	3
14	J-15	697976.66	8010340.05	3717.64	10.49	3
15	J-16	698009.47	8010329.10	3717.52	10.61	1
16	J-17	697869.52	8010493.50	3719.13	16.13	3
17	J-18	697967.34	8010639.24	3719.43	16.08	3
18	J-19	697927.30	8010652.10	3719.65	15.71	3
19	J-20	697931.52	8010538.82	3719.03	16.46	3
20	J-21	697890.47	8010552.27	3719.33	16.00	4
21	J-22	697948.68	8010416.68	3718.31	17.50	3
22	J-23	697902.23	8010432.35	3718.58	17.19	3
23	J-24	697959.97	8010293.23	3717.66	10.50	2
24	J-25	697931.18	8010369.15	3718.05	17.75	1
25	J-26	698038.11	8010504.57	3718.61	17.43	4
26	J-27	698018.50	8010622.55	3719.21	16.72	4
27	J-28	698086.65	8010307.87	3717.32	11.01	1
28	J-29	698359.39	8010399.44	3717.35	13.79	2
29	J-30	698341.26	8010347.33	3717.18	13.95	2
30	J-31	698284.22	8010365.95	3717.45	13.67	1
31	J-32	698292.23	8010534.02	3718.25	13.55	4
32	J-33	698350.41	8010515.04	3717.91	13.89	1
33	J-34	697834.71	8010682.51	3721.05	14.27	2
34	J-35	697813.14	8010623.50	3720.46	14.86	1
35	J-36	697798.17	8010582.47	3720.19	15.09	2
36	J-37	697774.97	8010517.93	3719.84	15.43	1
37	J-38	697909.03	8010362.76	3718.13	10.00	1
38	J-39	697992.02	8010551.42	3718.94	16.99	1
39	J-40	698097.30	8010430.85	3718.12	17.80	1
40	J-41	697947.95	8010261.78	3717.74	11.55	3
41	J-42	697947.62	8010179.59	3717.80	11.48	1
42	J-43	698221.64	8010332.25	3717.28	12.03	4
43	J-44	698138.85	8010357.33	3717.69	11.61	1
44	J-45	697773.56	8010482.88	3719.54	15.51	1
45	J-46	698266.15	8010155.78	3715.67	12.56	1
46	J-47	697867.85	8010336.16	3718.15	17.61	1
47	J-48	698326.05	8010631.13	3718.44	13.35	1
48	J-49	698145.08	8010470.19	3718.24	15.07	4

49	J-50	698110.16	8010373.46	3717.81	15.48	1
50	J-51	698256.76	8010433.82	3717.92	13.34	4
51	J-52	698181.54	8010570.25	3718.67	14.69	4
52	J-53	698278.59	8010172.10	3715.69	12.80	1
53	J-54	698055.35	8010723.96	3719.58	16.34	1
54	J-55	698219.16	8010674.14	3719.03	14.32	1
55	J-56	698332.64	8010322.21	3717.05	12.23	1
56	J-57	697801.55	8010310.70	3718.60	13.14	2
<b>Suma</b>			<b>448583649.73</b>	<b>208217.36</b>	<b>808.56</b>	

Estos valores son normalizados; los resultados son:

Tabla 10.2. Normalización de variables

Nº	Nudo	x	y	z	Presión
1	J-2	0.00155617	0.01785755	0.01786114	0.02210271
2	J-3	0.00155569	0.01785721	0.01786115	0.01984983
3	J-4	0.00155568	0.01785720	0.01786103	0.01985699
4	J-5	0.00155605	0.01785722	0.01785806	0.02172652
5	J-6	0.00155605	0.01785720	0.01785773	0.02178227
6	J-7	0.00155639	0.01785662	0.01784756	0.01493051
7	J-8	0.00155638	0.01785658	0.01784698	0.01507955
8	J-9	0.00155601	0.01785709	0.01785645	0.02205335
9	J-10	0.00155606	0.01785708	0.01785619	0.02211882
10	J-11	0.00155641	0.01785669	0.01784857	0.01499388
11	J-12	0.00155640	0.01785664	0.01784775	0.01520305
12	J-13	0.00155616	0.01785677	0.01785088	0.01418987
13	J-14	0.00155614	0.01785671	0.01785061	0.01431549
14	J-15	0.00155596	0.01785696	0.01785463	0.01296801
15	J-16	0.00155603	0.01785694	0.01785404	0.01311925
16	J-17	0.00155572	0.01785730	0.01786177	0.01994830
17	J-18	0.00155594	0.01785763	0.01786323	0.01988446
18	J-19	0.00155585	0.01785766	0.01786429	0.01942911
19	J-20	0.00155586	0.01785740	0.01786128	0.02035630
20	J-21	0.00155576	0.01785743	0.01786271	0.01978657
21	J-22	0.00155589	0.01785713	0.01785781	0.02164417
22	J-23	0.00155579	0.01785717	0.01785914	0.02126085
23	J-24	0.00155592	0.01785685	0.01785472	0.01298388
24	J-25	0.00155586	0.01785702	0.01785659	0.02195748
25	J-26	0.00155609	0.01785733	0.01785928	0.02155699
26	J-27	0.00155605	0.01785759	0.01786215	0.02068306
27	J-28	0.00155620	0.01785689	0.01785309	0.01362018
28	J-29	0.00155681	0.01785709	0.01785324	0.01705487
29	J-30	0.00155677	0.01785698	0.01785241	0.01724743
30	J-31	0.00155664	0.01785702	0.01785372	0.01690958
31	J-32	0.00155666	0.01785739	0.01785755	0.01675694
32	J-33	0.00155679	0.01785735	0.01785592	0.01717257
33	J-34	0.00155564	0.01785772	0.01787100	0.01764763
34	J-35	0.00155559	0.01785759	0.01786815	0.01837489
35	J-36	0.00155556	0.01785750	0.01786683	0.01866408
36	J-37	0.00155551	0.01785736	0.01786520	0.01908057
37	J-38	0.00155581	0.01785701	0.01785695	0.01236755
38	J-39	0.00155599	0.01785743	0.01786085	0.02101126
39	J-40	0.00155623	0.01785716	0.01785692	0.02201013
40	J-41	0.00155589	0.01785678	0.01785509	0.01428112
41	J-42	0.00155589	0.01785660	0.01785538	0.01419387
42	J-43	0.00155650	0.01785694	0.01785288	0.01487652
43	J-44	0.00155632	0.01785700	0.01785485	0.01436218
44	J-45	0.00155550	0.01785728	0.01786373	0.01917749
45	J-46	0.00155660	0.01785655	0.01784515	0.01553593

46	J-47	0.00155571	0.01785695	0.01785705	0.02178357
47	J-48	0.00155674	0.01785761	0.01785847	0.01650586
48	J-49	0.00155633	0.01785725	0.01785748	0.01863656
49	J-50	0.00155625	0.01785703	0.01785544	0.01914485
50	J-51	0.00155658	0.01785717	0.01785594	0.01649703
51	J-52	0.00155641	0.01785747	0.01785955	0.01817018
52	J-53	0.00155663	0.01785658	0.01784522	0.01583054
53	J-54	0.00155613	0.01785782	0.01786394	0.02020659
54	J-55	0.00155650	0.01785770	0.01786127	0.01771065
55	J-56	0.00155675	0.01785692	0.01785177	0.01513145
56	J-57	0.00155557	0.01785689	0.01785921	0.01625678

Asimismo, es necesario diferenciar el peso de cada una de las variables. En el siguiente acápite se describe esta tarea.

### 10.2.3. Determinación del peso de las variables

El cálculo del peso de cada una de las variables es realizado comenzando con entrevistas a los expertos de la empresa de agua, a partir de las cuales se establecen matrices de comparación pareadas (Saaty & Vargas, 2012) que contemplan a todas las variables, excepto el grado de los nudos variable que tendrá un tratamiento diferente. Las matrices de comparación pareada de cada uno de los expertos, con sus respectivos vectores propios y el cálculo del ratio de consistencia (CR), son mostradas a continuación.

Tabla 10.3. Matriz de comparación pareada, experto 1

	Coordenadas x e y	Cota	Presión	Vector propio
Coordenadas x e y	1	3	1/2	0.333
Cota	1/3	1	1/3	0.140
Presión	2	3	1	0.528

CR 5.1%

Tabla 10.4. Matriz de comparación pareada, experto 2

	Coordenadas x e y	Cota	Presión	Vector propio
Coordenadas x e y	1	1	1	0.333
Cota	1	1	1	0.333
Presión	1	1	1	0.333

CR 0.0%

Tabla 10.5. Matriz de comparación pareada, experto 3

	Coordenadas x e y	Cota	Presión	Vector propio
Coordenadas x e y	1	1	1/3	0.200
Cota	1	1	1/3	0.200
Presión	3	3	1	0.600

CR 0.0%

El peso de cada variable es obtenido a través del cálculo de la media geométrica de los vectores propios de cada experto.

Tabla 10.6. Peso normalizado de cada variable

Criterio	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Media geométrica	Peso normalizado
Coordenadas x e y	0.333	0.333	0.200	0.281	0.291
Cota	0.140	0.333	0.200	0.210	0.218
Presión	0.528	0.333	0.600	0.473	0.490
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.964</b>	<b>1</b>

Debido a las características de la red, que tiene pocas posibilidades de dejar nudos desconectados en la configuración de los sectores, se considera un peso  $w_g = 1$  debido al grado de conexión de la red.

### 10.2.4. Configuración del primer sector

El nudo J-38 es el más crítico de la red; a partir de este nudo se encuentra el camino más corto a la fuente de suministro (ver Fig. 10.11), con el cual empieza a configurarse el primer sector. Para evaluar el proceso es posible realizar una comparación de los diferentes parámetros calculados tanto del camino más corto como de toda la red.

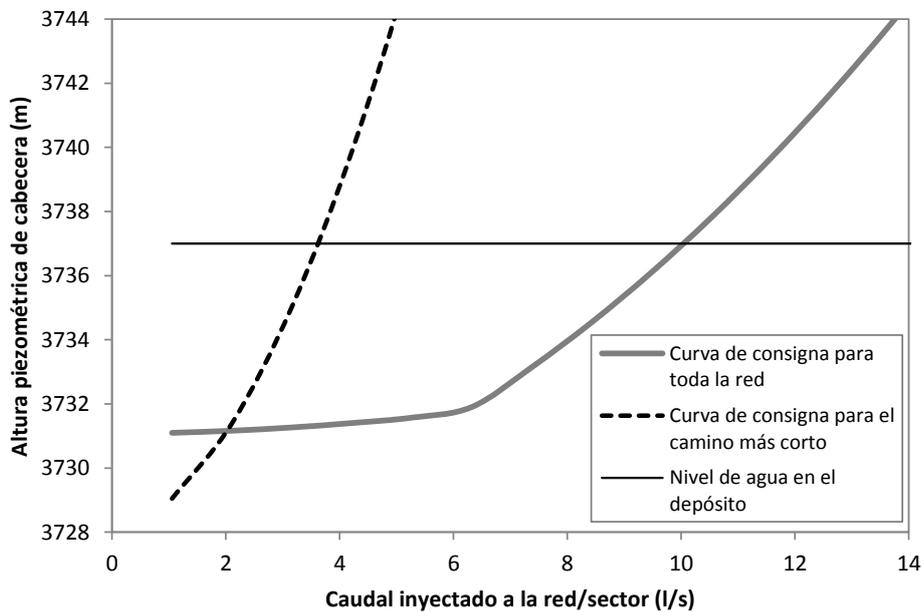


Fig. 10.4. Comparación entre las curvas de consigna para el camino más corto y toda la red

La curva de consigna de toda la red presenta mayor capacidad que la curva de consigna del camino más corto al nudo desfavorable. El proceso de sectorización agrupa nudos de características similares; a mayor número de nudos agrupados se logra incrementar el caudal máximo teórico del futuro sector.

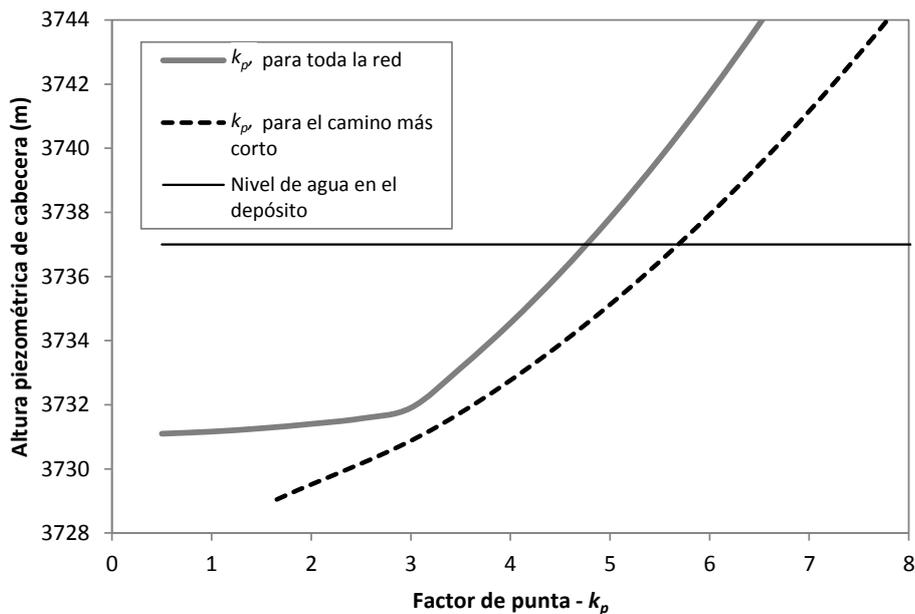


Fig. 10.5. Factor de punta  $k_p$  en función de la altura piezométrica de cabecera

Cuando se realiza la comparación de las curvas de consigna elaboradas, ya no en base al caudal inyectado a la red, sino en función del factor punta  $k_p$ , se aprecia que el nuevo sector que se está configurando tiene un mayor coeficiente de punta con relación a la red. Esta situación indica que, a medida que el sector va ganando nudos, el factor pico se va reduciendo.

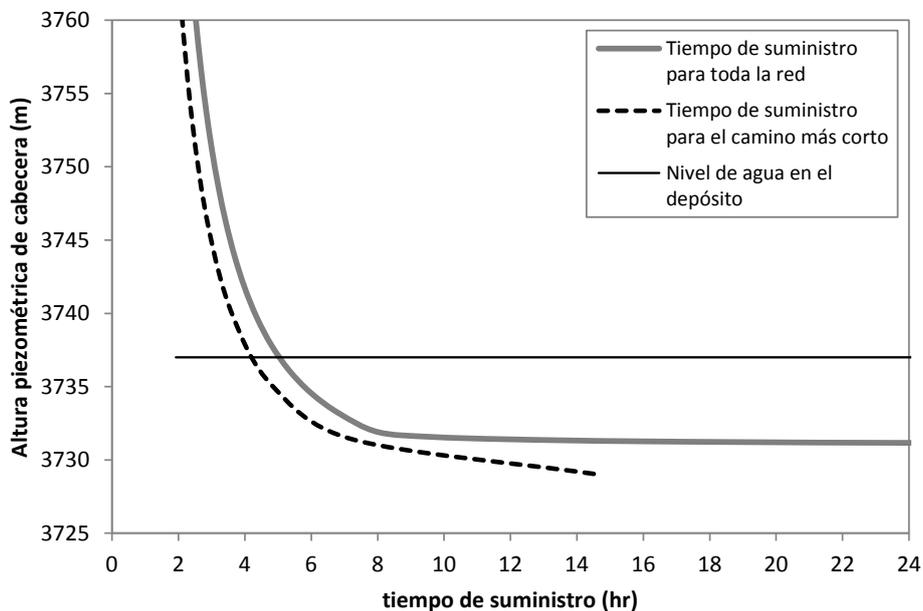


Fig. 10.6. Tiempo de suministro en función de la altura piezométrica de cabecera.

Si la red tiene una altura piezométrica por encima de 3731 m, se garantiza un suministro continuo por 24 horas. A medida que el tiempo de suministro en el sector o red se va reduciendo, se necesitará mayor altura piezométrica de cabecera (Fig. 10.6). En este caso de estudio, la totalidad de la

red no es capaz de suministrar agua en condiciones adecuadas con tiempos de suministro inferiores a 5 horas.

El primer nudo del sector a configurar permite un tiempo de suministro más reducido (cercano a 4 horas); el tiempo de suministro tenderá a crecer cuando el sector empiece a agrupar mayor cantidad de nudos (Fig. 10.6).

Definido el nudo crítico, se procede a la agrupación de nudos en función de la distancia de similaridad. En cada iteración se va incluyendo un nudo al sector; cada paso es evaluado hasta que el conjunto de nudos logre una diferencia de presiones que asegure la equidad deseada.

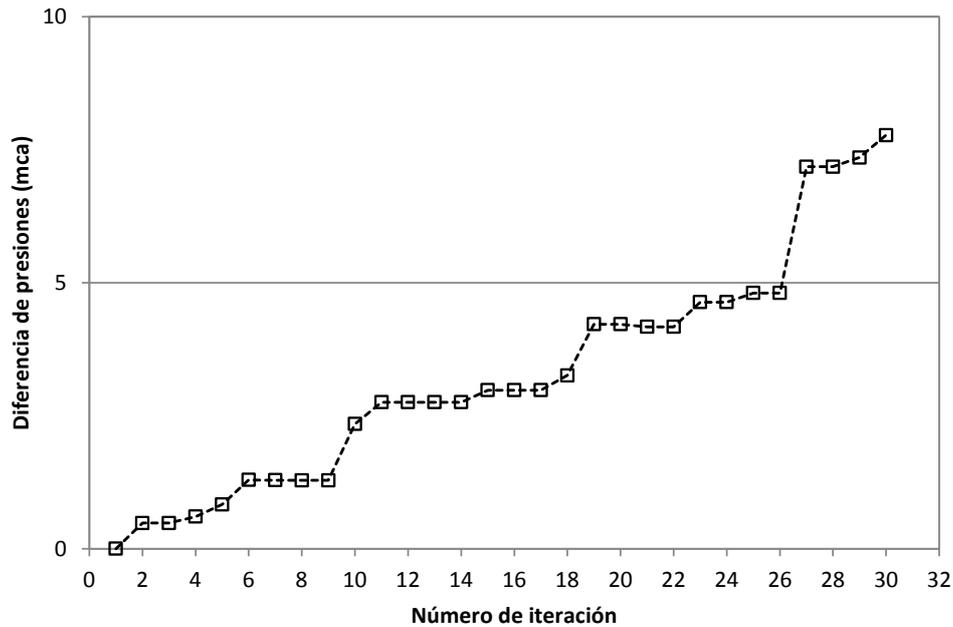


Fig. 10.7. Variación de la diferencia de presiones en función del número de nudos seleccionados

Como muestra la Fig. 10.7, el proceso de agrupamiento produce saltos notorios en la diferencia de presiones. Cada uno de los saltos otorga la posibilidad de parar con el proceso y establecer la configuración de un sector. Debe considerarse que esta diferencia de presiones no debe superar los 5 mca, por lo que el primer sector es configurado con el conjunto de nudos seleccionados que no superan este valor (26 nudos).

El caudal máximo teórico se mantiene constante en algunos periodos de iteración, debido a que el nudo crítico se mantiene o los nudo que se van seleccionando pertenecen al camino más corto seleccionado inicialmente; en todo caso, se produce esta situación cuando la selección de un nudo no altera la capacidad del sector en formación (ver Fig. 10.8).

El incremento brusco de la capacidad del sector en formación es causado por la selección de nudos que tienen un alto grado de conexión con las tuberías ya abiertas (Fig. 10.8), lo cual hace que se produzca una caída en el tiempo de suministro pues, al tener mayor capacidad, el tiempo de suministro puede reducirse (Fig. 10.10).

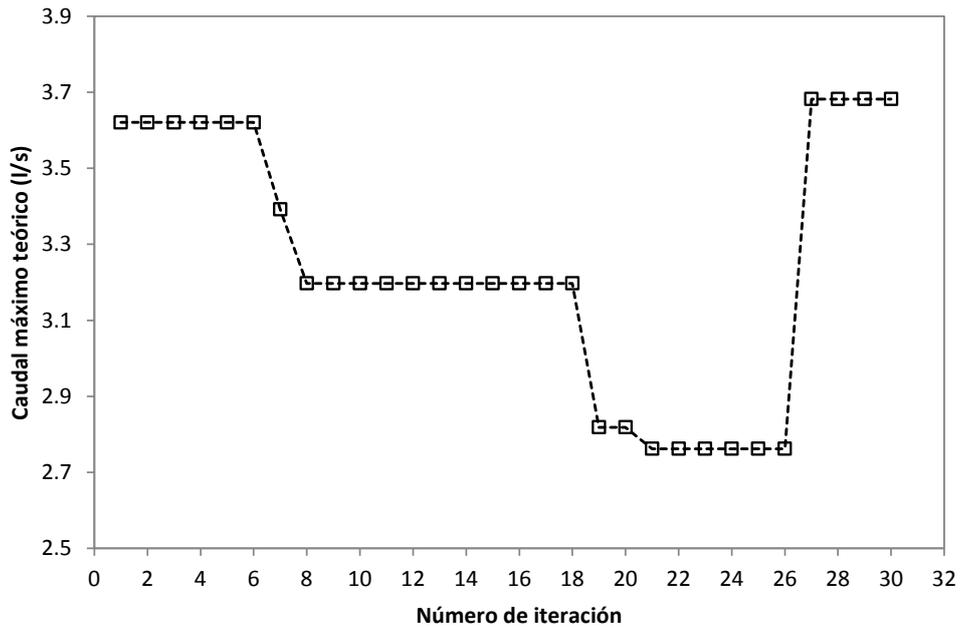


Fig. 10.8. Variación del caudal máximo teórico en función del número de nudos seleccionados

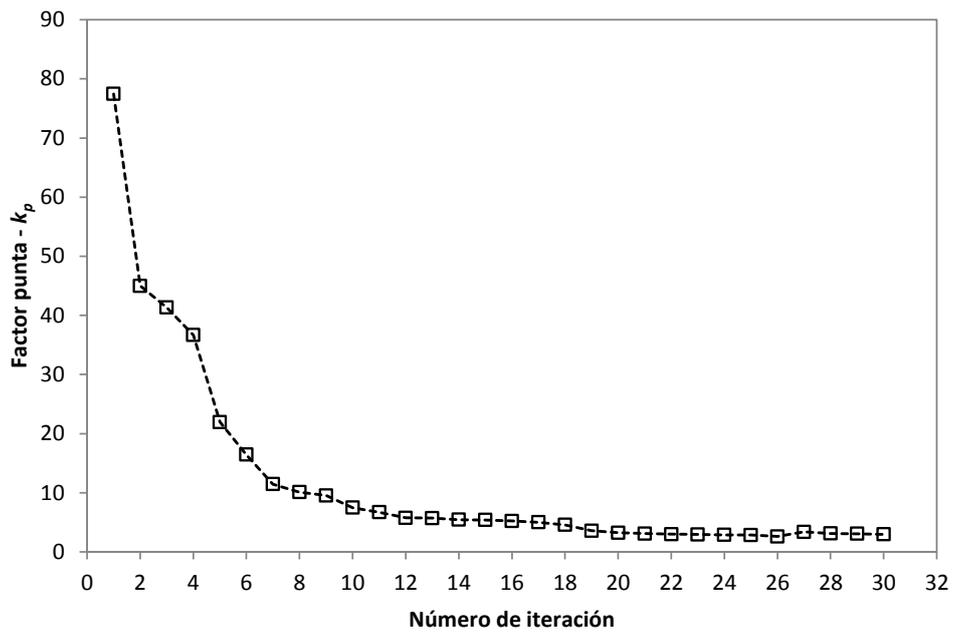


Fig. 10.9. Variación del factor de punta en función del número de nudos seleccionados

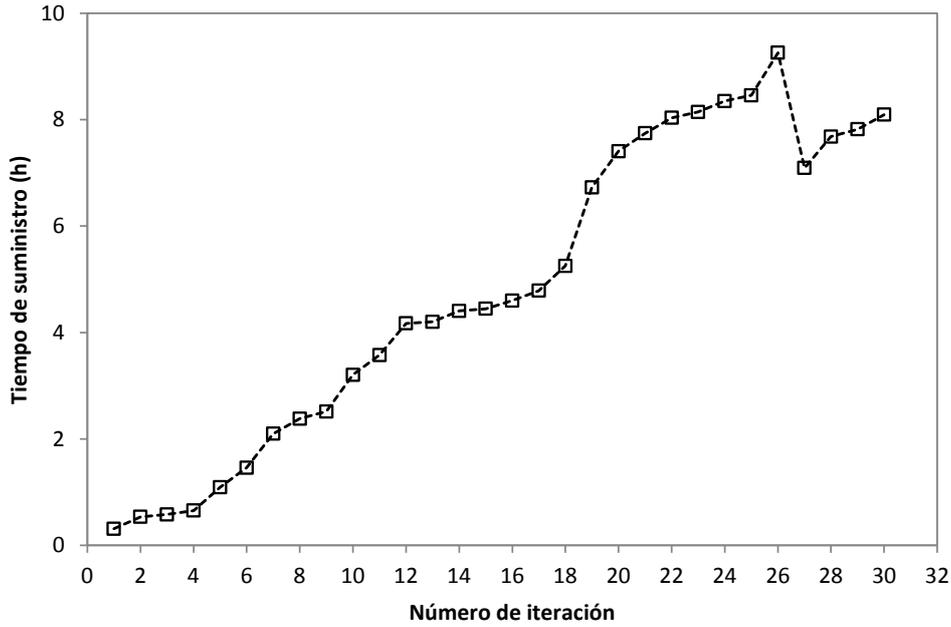


Fig. 10.10. Variación del tiempo de suministro en función del número de nudos seleccionados

El procedimiento permite configurar el primer sector en base al nudo crítico inicial, el camino más corto a la fuente de suministro y la evaluación constante de la equidad del suministro.

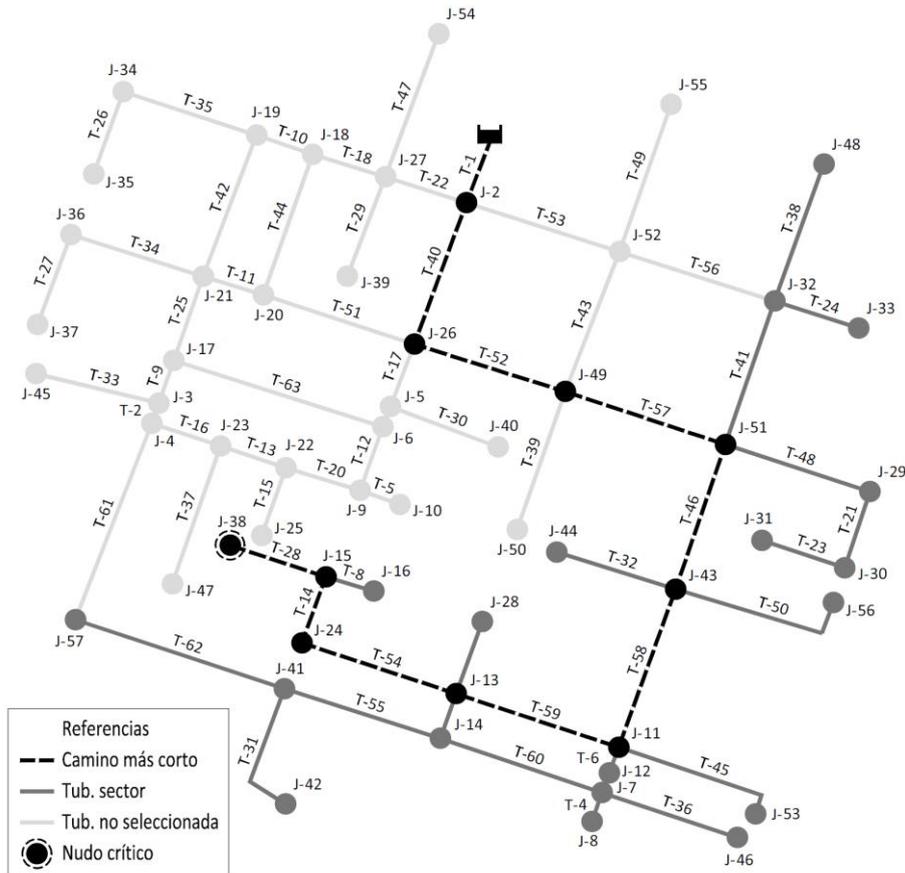


Fig. 10.11. Configuración del sector 1

### 10.2.5. Configuración del segundo sector

El nudo crítico de la red ya fue seleccionado como parte del primer sector, por lo que existe un nuevo nudo crítico entre los nudos que faltan por seleccionar. La diferencia de presiones entre el mismo y la fuente de suministro resulta ser muy grande, lo cual dificulta cumplir con la condición de equidad en el suministro; por lo tanto, puede reducirse la altura piezométrica en la fuente o pueden configurarse más sectores. Operacionalmente lo mejor es la reducción de la presión en la fuente, que permitirá también reducir el nivel de fugas.

Para la configuración del segundo sector, se analizan escenarios en los cuales se reduce la altura piezométrica de la fuente de suministro. Asimismo, se otorga una mayor tolerancia a la diferencia de presiones para analizar lo que sucede en la configuración del sector a grandes presiones.

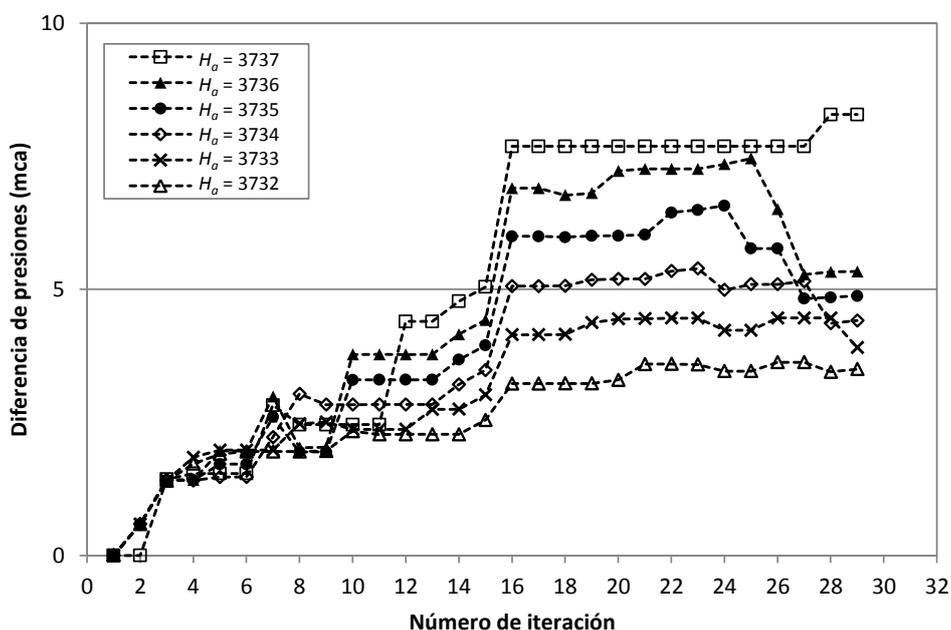


Fig. 10.12. Variación de la diferencia de presiones en función del número de nudos seleccionados y la altura piezométrica en cabecera

La selección de nudos para el segundo sector a diferentes alturas piezométricas permite observar lo siguiente.

Si el suministro del nuevo sector parte de la altura piezométrica en la fuente de suministro actual, de 3737, es necesario definir un tercer sector, ya que no se logra cumplir con la diferencia de presiones que garantiza la equidad en el suministro (Fig. 10.12). Esto se debe a que las presiones se deben ajustar a la diferencia entre la altura piezométrica de la fuente de suministro y la del nudo de menor presión, al existir un rango amplio la presión máxima, tenderá a crecer.

Reduciendo la presión de ingreso a la red, se observa que, a partir de un valor de 3735 m, se cumple con la diferencia de presiones inferior a 5.0 mca. A menor altura piezométrica de ingreso, existe una menor diferencia de presiones entre la fuente de suministro y el nudo crítico; en consecuencia, se puede lograr mayor equidad. Sin embargo, la reducción de la diferencia de presiones está relacionada con el incremento de horas de servicio: a menor diferencia se requieren más horas de servicio (Fig. 10.15).

Debe tomarse en cuenta que la cantidad de horas de servicio es determinante cuando se requiere planificar los horarios de suministro de toda la red: largos periodos de suministro pueden provocar la simultaneidad de periodos de suministro con otros sectores, lo cual incrementa el caudal pico de ingreso a la red y reduce la presión en los sectores. Por lo tanto, también es importante limitar racionalmente las horas de entrega de agua.

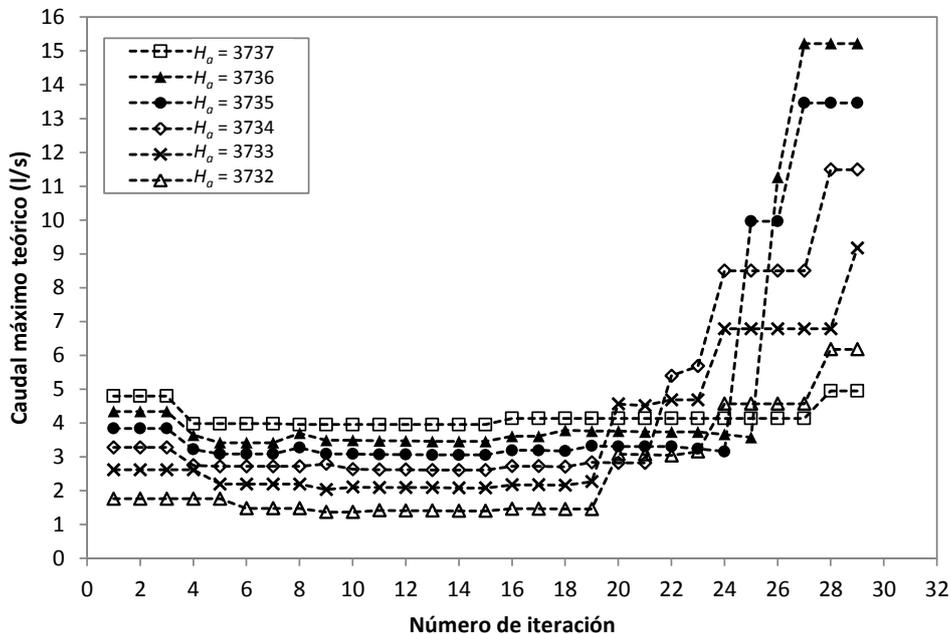


Fig. 10.13. Variación del caudal máximo teórico en función del número de nudos seleccionados y la altura piezométrica en cabecera

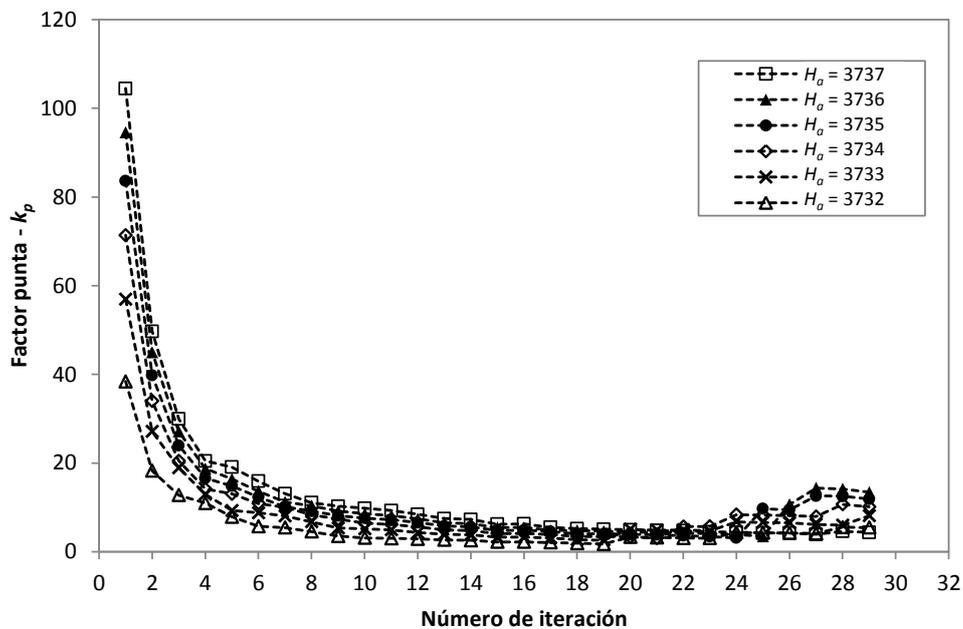


Fig. 10.14. Variación del factor punta en función del número de nudos seleccionados y la altura piezométrica en cabecera

En los tramos en los cuales la diferencia de presiones se mantiene constante (Fig. 10.12) (esto se debe generalmente a la invariancia de la presión máxima en el conjunto de nudos) la presión mínima se mantiene siempre en 10 mca; aunque el nudo de menor presión puede cambiar, en función de la priorización en la selección de nudos.

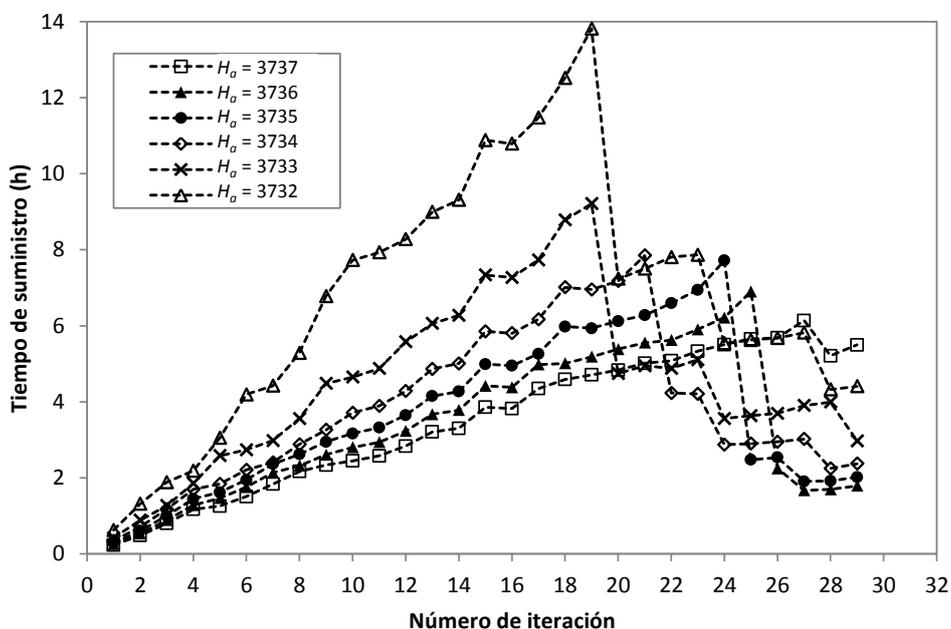


Fig. 10.15. Variación del tiempo de suministro en función del número de nudos seleccionados y la altura piezométrica en cabecera

Las caídas bruscas de las horas de suministro (Fig. 10.15) son debidas al incremento de la capacidad de la red (Fig. 10.13); la selección de nudos con elevado grado de conectividad permite la reducción de la pérdida de carga; en consecuencia, se eleva el valor del caudal máximo teórico, lo cual reduce el tiempo de suministro.

Adicionalmente, se busca no reducir las horas de suministro actuales en la red, lo cual generaría reclamos entre la población. Por lo tanto, se decide no bajar de 4 horas de suministro; en consecuencia, es posible reducir la presión de ingreso en el segundo sector hasta una altura piezométrica de  $H_a = 3732$  mca, según se observa en la Fig. 10.15.

De esta forma, se configura el segundo sector (Fig. 10.16), que requiere la reducción de la presión de ingreso a la red, lo cual es favorable desde el punto de vista de reducción de fugas y también permite lograr mayor equidad durante las horas de suministro.

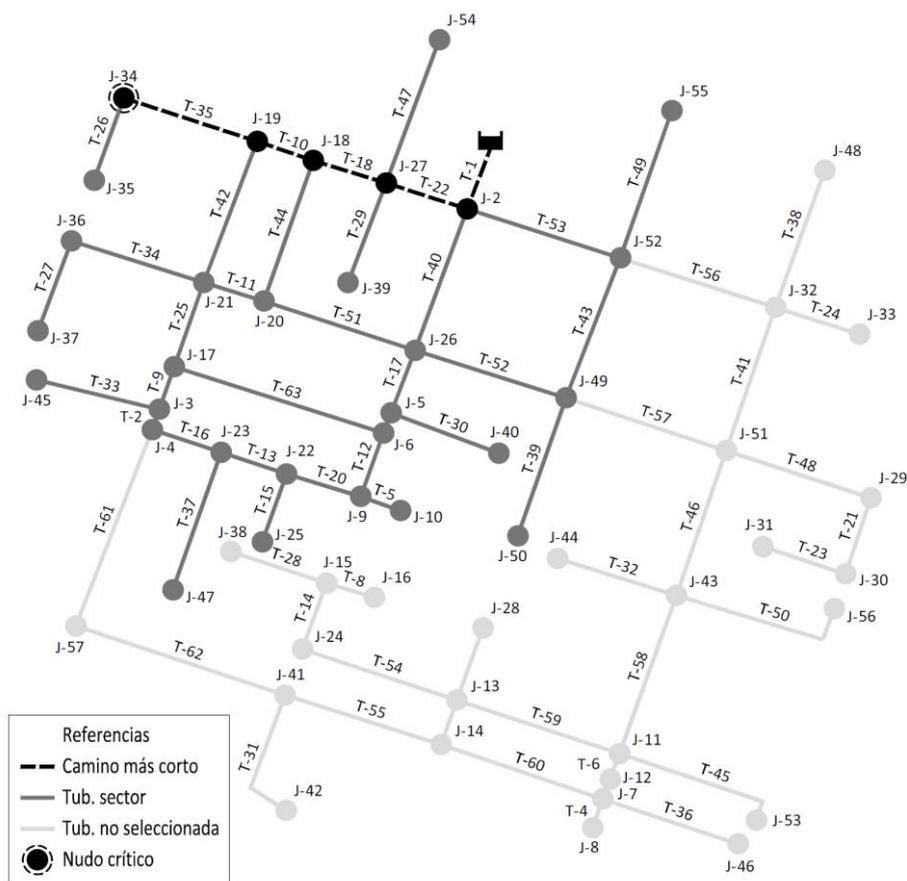


Fig. 10.16. Configuración del sector 2

El proceso de sectorización para una red con suministro intermitente configura dos nuevos sectores tienen las siguientes características:

Tabla 10.7. Características de los sectores, tras el proceso de sectorización

Sector	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$	Diferencia de presiones (mca)	$Q_{m\acute{a}x}$ (l/s)	Tiempo de suministro (h)	$H_a$ (mca)	Cantidad de nudos
Sector 1	14.81	10.00	$4.81 < 5$	2.76	8.46	3737	26
Sector 2	13.54	10.00	$3.54 < 5$	6.18	4.41	3732	30

La diferencia de presiones no supera los 5 mca; esto permitirá un suministro más equitativo a cada uno de los sectores. Las horas de suministro, característica singular de los sistemas con suministro intermitente, son definidas bajo criterios técnicos (la equidad del suministro y la capacidad del sector en formación) y no por criterios empíricos como se hace actualmente. Debe tomarse en cuenta una configuración de horarios que busque un suministro no simultáneo.

La configuración de los sectores y la variación de la presión en cada uno de ellos se presentan en la Fig. 10.17. La separación de los sectores se realiza instalando válvulas de seccionamiento en las tuberías T-56 y T-61; la tubería T-57 es la que permite el ingreso de agua al sector 1.

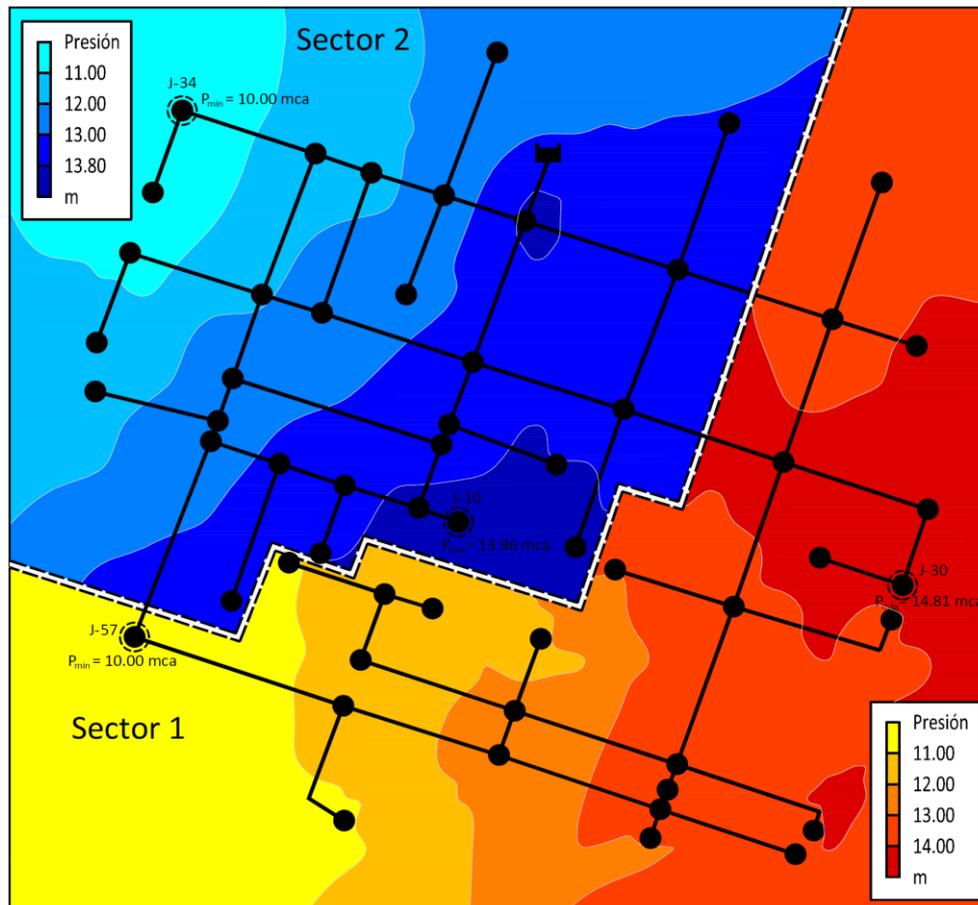


Fig. 10.17. Red sectorizada

El sector 1 incluye al nudo crítico de toda la red, lo cual impone condiciones desfavorables desde un principio a este sector, reduciendo su capacidad y condicionándolo a un mayor tiempo de suministro. En cambio, el sector 2 puede tener mayor capacidad debido a que ya no interviene el nudo crítico; el nuevo nudo crítico tiende a imponer una mayor capacidad.

La configuración del sector y su tamaño están delimitados por la equidad que se quiere lograr en el sector; además, esta configuración establece la cantidad de horas que se puede suministrar como tiempo mínimo sin que las condiciones hidráulicas de la red impongan condiciones desfavorables e inequitativas entre los usuarios.

### 10.3. Diagnóstico del subsistema de la zona sur de Oruro

El sistema utilizado como caso de estudio para el proceso de transición a suministro continuo, es uno de los subsistemas del abastecimiento de agua de la ciudad de Oruro, ciudad ubicada en el altiplano boliviano.

Oruro es una de las ciudades más importantes del país que cuenta con parte de su red operando con suministro intermitente. El subsistema estudiado, ubicado en la parte sur de la ciudad, está constituido por 15 sectores alimentados por un solo depósito.

Las deficiencias en la infraestructura, el crecimiento de la población de la ciudad de Oruro y una tarifa que cubre solamente la operación del sistema, genera una distribución de agua potable

intermitente. En el siguiente acápite se desarrolla el origen del suministro intermitente en esta zona de la ciudad.

La entidad que presta el servicio de agua potable en la ciudad de Oruro es el Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado (SeLA–Oruro); la ciudad se abastece con un caudal producido en fuentes de más de 300 l/s para los más de 50000 usuarios; se cuenta con un volumen de almacenamiento en los depósitos de 11000 m<sup>3</sup>; las aducciones principales llegan a tener una longitud de 65 km y la red de distribución alcanza casi los 900 km de longitud (SeLA - Oruro, 2013).

En los últimos años, el número de reclamos por deficiencias en el servicio en la zona sur se incrementó, principalmente con quejas relacionadas con presiones bajas, lo cual repercute en la cantidad de agua suministrada; los sectores más afectados son las zonas más alejadas del punto de suministro, el depósito Agua de Castilla.

Inicialmente se realiza un diagnóstico; para este fin se recopila información en SeLA-Oruro relacionada con la producción, facturación e infraestructura del subsistema.

Se utilizan las mediciones periódicas que realiza SeLA: presiones, caudales, niveles del agua en los depósitos, entre otras. Estas mediciones son realizadas principalmente por exigencia del ente regulador del servicio de agua potable de Bolivia, la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento (AAPS). Generalmente, los sistemas con suministro intermitente y escasez económica destinan pocos recursos para monitorear su sistema de abastecimiento, por lo que una metodología de mejora viable debe adaptarse a la misma.

### **10.3.1. Descripción del área de estudio**

#### **10.3.1.1. Localización geográfica**

El área de estudio se encuentra en:

- País: Bolivia
- Departamento: Oruro
- Municipio: Oruro
- Zona: Sur

La ciudad de Oruro se encuentra ubicada en la zona altiplánica de Bolivia, al oeste del país, al sur de la ciudad sede de gobierno, La Paz.

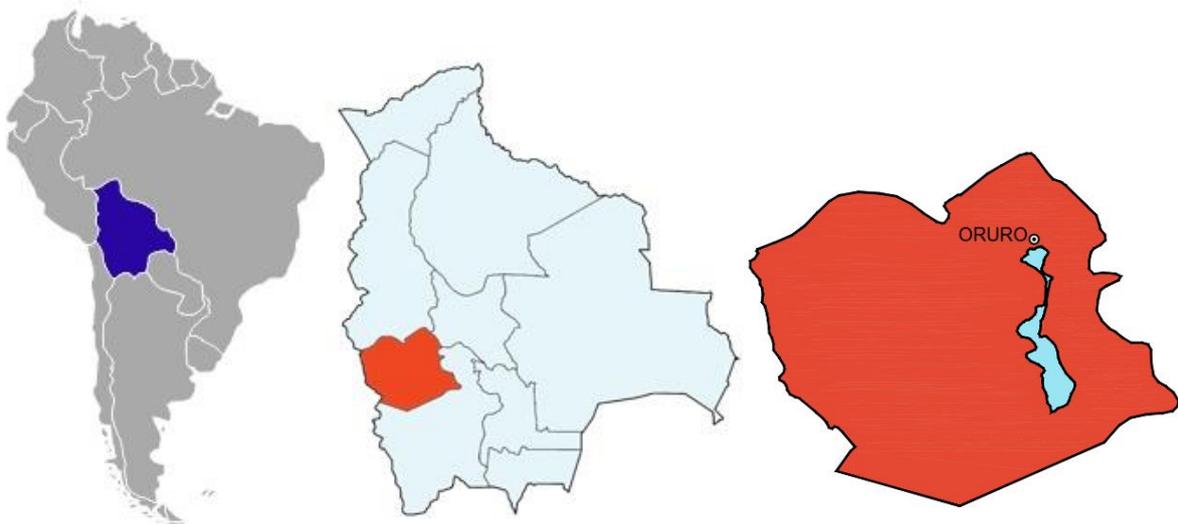


Fig. 10.18. Ubicación geográfica del Departamento de Oruro



Fig. 10.19. Imagen satelital de la ciudad de Oruro

La zona de acción para el estudio se encuentra en la parte sur de la ciudad de Oruro, geográficamente definida en el cuadrante  $17^{\circ} 58' 19''$  a  $18^{\circ} 00' 44''$  de latitud Sur y los  $67^{\circ} 08' 40''$  a  $67^{\circ} 05' 59''$  de longitud Oeste (Datum WGS84).

### 10.3.1.2. Clima

La ciudad de Oruro tiene un clima muy distorsionado debido a su altitud de 3706 msnm y su planicie. Se recopilieron datos climáticos de la ciudad para la gestión 2012 (SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia, 2013); esta información, contrastada con los datos de SeLA, muestran que los meses en los cuales el calor se incrementa y las lluvias son pocas, el consumo de agua es mayor.

La precipitación total anual para la ciudad de Oruro alcanza los 562.1 mm.

Tabla 10.8. Precipitación total, 2012

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación Total (mm)	152.1	126.2	126.8	20.0	0.0	0.0	5.8	0.0	1.6	11.8	16.2	101.6	562.1

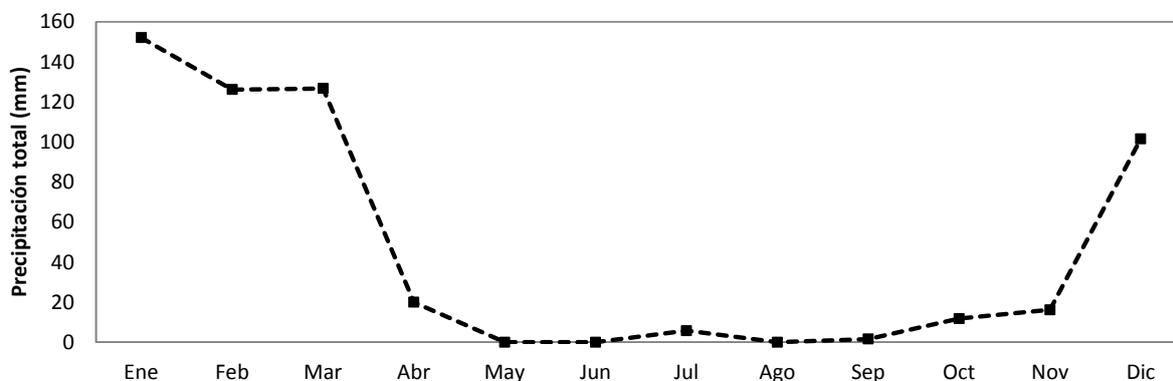


Fig. 10.20. Precipitación total - Gestión 2012.

La temperatura media anual en la ciudad de Oruro alcanzó los 9.9 °C, presentándose en los meses de mayo, junio, julio e inclusive agosto las temperaturas absolutas más bajas que llegan a los 12.6 °C bajo cero.

Tabla 10.9. Temperatura media, 2012.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Temperatura Media (°C)	12.1	11.8	11.6	10.8	6.5	4.8	5.2	6.9	10.2	12.0	13.2	13.2	9.9

Tabla 10.10. Temperatura máxima absoluta - Gestión 2012.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Temperatura Máxima Absoluta (°C)	20.6	21.6	21.9	21.5	20.0	19.0	20.2	21.4	23.2	24.6	25.2	25.4	25.4

Tabla 10.11. Temperatura mínima absoluta, 2012.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Temperatura Mínima Absoluta (°C)	2.2	3.5	0.6	-5.2	-9.0	-11.8	-12.6	-12.3	-7.6	-4.0	-1.2	3.6	-12.6

### 10.3.1.3. Topografía

Gran parte de la zona sur de la ciudad de Oruro se encuentra en una meseta plana, aunque el sector oeste y sur presentan serranías con mayores pendientes; la elevación promedio de la zona de estudio es de 3710 msnm. En esta zona la conformación del suelo es limo arenoso fino producto de sedimentación de origen fluvial.

### 10.3.1.4. Población

Según datos del censo 2012 (INE - Bolivia, 2014), la población de la ciudad de Oruro alcanza a 264683 habitantes (126558 hombres y 138125 mujeres), la tasa de crecimiento poblacional intercensal llega al 1.03%.

En 1950, de la población del departamento de Oruro, el 62% residía en el área rural y solo el 38% en el área urbana; en el año 2001 la población urbana alcanza el 60.25% y la rural el 39.75%. El punto de cambio en la composición de la población por área se presentó en el periodo intercensal de 1950-1976 (INE - Bolivia, 2014).

Los barrios que se encuentran en la zona sur, que pertenecen al subsistema de abastecimiento de agua estudiado son: Carmen Vito, los Olivos, Villa Challacollo, Ciudad Universitaria Verde N° 1, Ciudad Universitaria UTO, San Cristóbal de Chiripujio, Plan 500, Hijos del Sol, San Cristóbal II, Chiripujio Central, Nuevos Horizontes, Taruma Juan Lechín Oquendo, Las Lomas, Villa Taruma, Villa América, San Felipe Alamasí Magisterio Rural, Barrio Uru Uru, Alto Uru Uru, pie de San Felipe, Magisterio Uru Uru Alto, Alto Uru Uru, Tomas Frías II, Barrio Huanuni, San Luis I y II, Barrio Quechisla, Barrio Fabril, Madrid Integrado, Unión América, Agua de Castilla B, El cóndor, Barrio ENAF Plan 50, Juan de La Salle y Villa Germania. Esta zona es la de menor crecimiento de la ciudad de Oruro, pues la ciudad fue creciendo más hacia el norte y al este (Martinelly, 2009).

Debido a que no se cuenta con la población detallada por cada uno de los barrios, se utilizará la información desglosada de usuarios del sistema de agua potable obtenida en SeLA; se considera que el número de habitantes por usuario es de 5 hab/conex, valor mayor al número de habitantes por familia definido por el INE-Bolivia para la ciudad de Oruro (4.3 hab./familia) debido a que muchas veces existen más de una familia por conexión domiciliaria.

Tabla 10.12. Número de usuarios y población - zona sur de Oruro

Sector	Número de usuarios	Población abastecida (hab)
S01-05	147	735
S01-06	467	2335
S01-07	593	2965
S01-08	437	2185
S01-10	385	1925
S01-11	244	1220
S01-09	515	2575
S01-13	1065	5325
S01-14	276	1380
S01-15	211	1055
S01-16	918	4590
S02	575	2875
M02	237	1185
S01-12	1085	5425
S01-18	385	1925
<b>TOTAL</b>	<b>7540</b>	<b>37700</b>

La población estimada de esta zona de la ciudad es 37700 habitantes, los cuales habitan los 32 barrios.

### 10.3.1.5. Características socioeconómicas

Según datos obtenidos en la Encuesta de Hogares 2011- Oruro (INE - Bolivia, 2014), el ingreso promedio mensual que percibe cada familia asciende a Bs. 1315 (144 €), suma destinada al

aprovechamiento de productos de primera necesidad y los requerimientos de educación y salud de la familia, conformada en promedio por 4.3 personas. Se establece que las tarifas por servicios básicos no pueden superar el 5% de los ingresos, aunque en muchos casos llega a más del 10%.

Los idiomas más comunes en la ciudad de Oruro son el español, quechua y aimara. La estructura de organización de los barrios está conformada por Juntas Vecinales. Existen escuelas casi en todos los barrios y los hospitales están concentrados en la zona central.

Las viviendas en su gran mayoría son del tipo unifamiliar, por lo que la ciudad crece horizontalmente, existen pocas viviendas multifamiliares.

### 10.3.2. Características del abastecimiento de agua

En Bolivia, cerca al 25% de la población, rural y urbana, no cuenta con servicio de agua potable continuo por veinticuatro horas; más de la mitad de este porcentaje tiene agua entre 0 y 6 horas por día (INE - Bolivia, 2014).

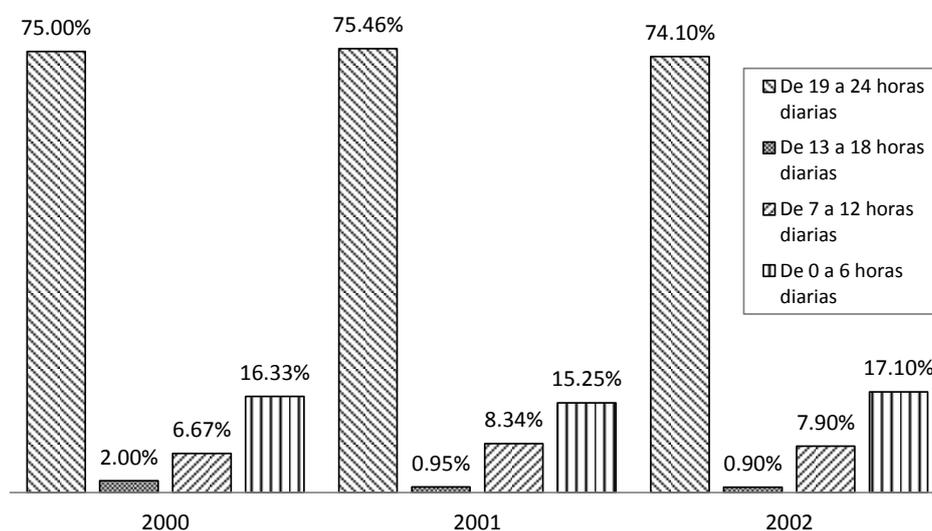


Fig. 10.21. Hogares por continuidad diaria en la provisión de agua (2000 – 2002)

Fuente: INE - Bolivia (2014)

El sistema de agua potable de la ciudad de Oruro cuenta solamente con fuentes subterráneas, un total de 10.21 Hm<sup>3</sup>/año; las vertientes de Cala Cala aportan el 6% del volumen suministrado; los pozos profundos de Challapampa grande y Challapampita 94%; este volumen es almacenado y desinfectado en la Planta JKW; la desinfección se realiza utilizando gas cloro; solamente se procede con la cloración debido a una buena calidad físico-química y bacteriológica del agua por su origen subterráneo; el elemento más problemático es la dureza del agua, sin embargo la misma se encuentra dentro los límites permisibles establecidos en la Norma boliviana NB 512 (Ministerio de Servicios y Obras Públicas de Bolivia, 2004).

Dentro la Planta JKW se tiene un depósito de almacenamiento 1500 m<sup>3</sup>; por medio de cinco bombas centrifugas de 200 HP y 250 HP, se impulsa el agua hacia los depósitos Cerrato (que abastece a la zona central de la ciudad, de capacidad 3800 m<sup>3</sup>), al tanque Agua de Castilla (suministra agua a la Zona sur de la ciudad y cuenta con un volumen de almacenamiento de 1900 m<sup>3</sup>) y una fracción que es bombeada directamente a la red de distribución de la zona norte y este. Adicionalmente, se tienen

depósitos y estaciones de bombeo intermedios de menor capacidad, tanto al norte como en el sur, los cuales buscan mejorar las condiciones del servicio en la ciudad.

La red del sistema de agua potable de la ciudad de Oruro está compuesta por 72 sectores (SeLA - Oruro, 2013), los cuales permiten realizar la operación y mantenimiento de una forma más adecuada; estos sectores son vitales para establecer el suministro intermitente por horas, porque permiten aislar los sectores que no tienen suministro en una hora específica.

El sistema se divide en subsistemas claramente diferenciados: el subsistema de la zona sur, que empieza en el depósito Agua de Castilla, el subsistema de la zona central cuyo punto de suministro es el depósito Cerrato (es el único subsistema que cuenta con el servicio de agua potable por 24 horas), la zona noreste que tiene bombeo directo a la red y la zona norte que cuenta con varias estaciones de bombeo pequeñas para un suministro por horas (ver Fig. 10.22).

Propuesta para la transición de un sistema con suministro de agua intermitente a suministro continuo

UBICACION DE ESTACIONES ELEVADORAS Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO				
Nº	NOMBRE TANQUE	COTA FONDO	CAPACIDAD m3	MATERIAL
1	J.K.W.	3716,00	1500	CHAPA DE ACERO 5/16"
2	CERRATO	3789,00	3800	CHAPA DE ACERO 5/16"
3	AGUA DE CASTILLA	3765,00	1900	CHAPA DE ACERO 5/16"
4	CHAPIKHOLLU	3728,00	1500	CHAPA DE ACERO 5/16"
5	CORAZON DE JESUS	3796,00	80	MAMPOSTERIA DE PIEDRA
6	SANTA BARBARA I	3778,00	353	MAMPOSTERIA DE PIEDRA
7	CHALLACOLLO CARCAMO	3789,00	75	MAMPOSTERIA DE PIEDRA
8	CHALLACOLLO	3729,00	75	MAMPOSTERIA DE PIEDRA
9	PLAN 500 CARCAMO	3752,00	100	HORMIGON ARMADO
10	PLAN 500	3842,00	175	HORMIGON ARMADO
11	SANTA BARBARA II	3850,00	350	HORMIGON ARMADO
12	SANTA ROSA	3735,00	100	HORMIGON ARMADO
13	HUAJARA I	3735,00	100	HORMIGON ARMADO
14	HUAJARA II	3734,00	20	HORMIGON ARMADO
15	ALTO ORURO NORTE	3800,00	70	MAMPOSTERIA DE PIEDRA
16	EB - 1	3735,00	100	HORMIGON ARMADO
17	EB - 2 T1 - 1	3793,00	100	HORMIGON ARMADO
18	T1 - 2	3871,00	100	HORMIGON ARMADO
19	EB - 4 T1 - 4	3722,00	100	HORMIGON ARMADO
20	T1 - 4	3786,00	100	HORMIGON ARMADO
21	EL CARMEN	3737,00	100	HORMIGON ARMADO
22	LOS ANGELES	3725,00	100	HORMIGON ARMADO
23	CORDEOR	3734,00	100	HORMIGON ARMADO
24	SAN ISIDRO	3732,00	100	HORMIGON ARMADO
25	ALTO AREQUIPA	3825,00	100	HORMIGON ARMADO



REFERENCIAS

- PP-18 POZOS DE OBSERVACION
- PP-11 POZOS DE PRODUCCION

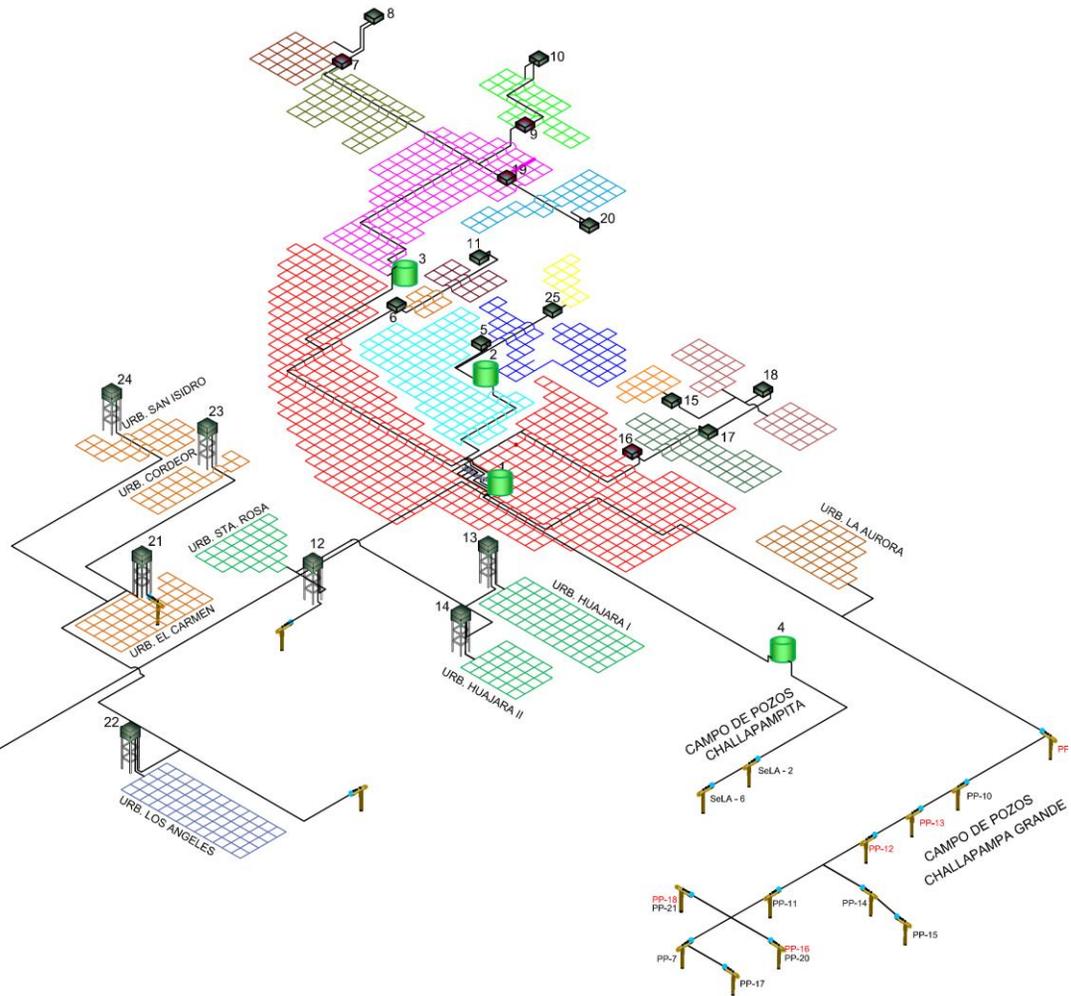


Fig. 10.22. Esquema isométrico del sistema de agua potable de la ciudad de Oruro

Fuente: J.C. Aguirre – SeLA

Uno de los problemas críticos del sistema de agua potable de la ciudad de Oruro está relacionado con la falta de contadores en varias viviendas de la ciudad; recientemente se implementó la política de la instalación obligatoria de contadores. Como las acometidas antiguas aún no cuentan con contadores hay varios sectores que tienen un porcentaje elevado de usuarios sin contador; esta situación perjudica al logro de un balance hídrico más preciso.

Otra característica a tomar en cuenta es la clasificación de los usuarios según su tipo de uso. Más del 90% está clasificado como doméstico, existiendo poca cantidad de usuarios industriales, comerciales e institucionales.

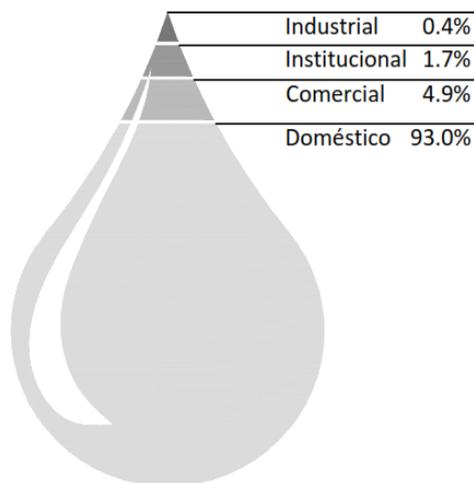


Fig. 10.23. Usuarios por categoría, ciudad de Oruro  
Adaptado de datos de SeLA – Oruro

Comparando los volúmenes de consumo mensual, los clientes domésticos reducen en porcentaje; sin embargo sigue siendo muy importante el consumo doméstico, mayor a 65%.

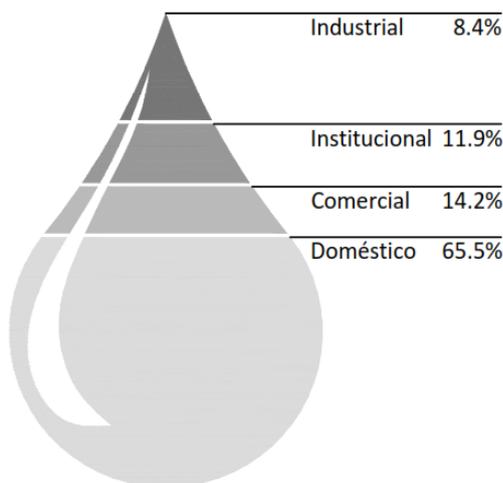


Fig. 10.24. Consumo por categoría de usuario, ciudad de Oruro  
Adaptado de datos de SeLA – Oruro

### **10.3.2.1. SeLA – Oruro**

El Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado de Oruro (SeLA – Oruro) fue creado en 1964 como empresa pública de administración autónoma; presta el servicio de agua potable a la ciudad de Oruro; no administra el sistema de alcantarillado, el cual sigue a cargo del Municipio de la ciudad. La empresa cuenta con un directorio conformado por la alcaldesa de la ciudad, un representante técnico del Municipio, un representante de la Gobernación de Oruro, un representante del Ministerio de medio Ambiente y Agua y un representante de la Sociedad de Ingenieros de Bolivia (como parte de la sociedad civil).

SeLA cuenta con dos formas básicas para la administración de información:

- La base de datos del sistema comercial SELASIS, donde se efectúa la cobranza, facturación, cortes y catastro de usuarios. Este sistema está basado en el código de catastro como referencia espacial; la información que se puede obtener de esta base de datos es la relacionada básicamente con el usuario y su consumo mensual.
- La operación y mantenimiento del sistema de agua potable se realiza por medio de sectores, los cuales no tienen ninguna relación con los códigos de catastro utilizados en el sistema comercial; por esta razón, hasta la fecha, era difícil saber cuántos usuarios existían por circuito.

Gracias a que existe la posibilidad de ingresar el nombre del sector o circuito hidráulico al que pertenece cada usuario en base al código de catastro y al trabajo desarrollado por el personal de la Gerencia Comercial de SeLA, se cuenta ya con esta información muy útil para la empresa y para el presente estudio.

El crecimiento de la ciudad en los últimos años, impulsado por la migración del área rural a los centros urbanos, generó la creación no planificada de las zonas “periurbanas”, las cuales hasta hace pocos años no contaban con el servicio de agua potable. En los últimos años se implementaron proyectos para satisfacer las necesidades de este sector. Con el fin de impulsar la obtención de servicios básicos, los vecinos de estos sectores conformaron organizaciones sociales y utilizaron movilizaciones y medidas de presión para contar con el derecho humano al servicio de agua potable. Como resultado de estos conflictos, se llegó a una situación tensa entre vecinos y SeLA; actualmente, los vecinos de estos sectores no permiten el ingreso de personal de SeLA para la medición, por lo que se optó por una tarifa fija sin medición.

De forma general, la tarifa actual en la ciudad es muy baja (promedio Bs 14.90 ó 1.66 € cargo fijo y Bs. 2.10 ó 0.23 € por metro cúbico consumido); no cubre costes de reposición ni ampliación del sistema, por lo que se puede hablar de un sistema de suministro intermitente de escasez económica. Sin embargo, hay posibilidades de subvenciones anuales por parte del Estado.

### **10.3.2.2. Características de la conexión domiciliaria**

Las conexiones domiciliarias de agua potable en la ciudad de Oruro se instalan en base a lo establecido en el Reglamento Nacional de Instalaciones Sanitarias Domiciliarias (Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia, 2011); generalmente, constan de la acometida en sí o ramal externo, el ramal de alimentación domiciliar, almacenamiento y la red de distribución interna hacia los puntos de consumo o de utilización.

Se opta por el sistema directo cuando se cuenta con presión suficiente y el servicio es continuo; en el sector sur de la ciudad de Oruro el servicio es intermitente por lo cual no se tienen conexiones de este tipo.

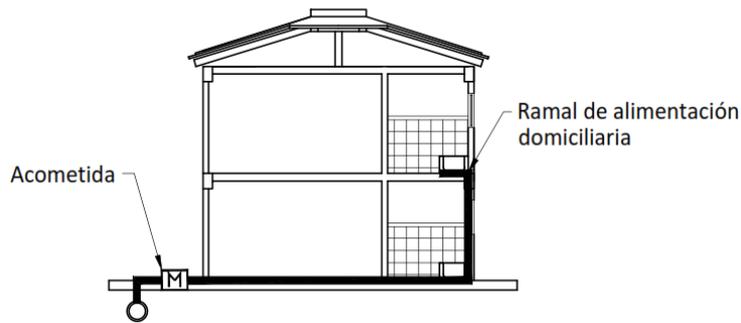


Fig. 10.25. Sistema de conexión directa, sin tanque elevado

En un sistema de suministro intermitente, casi todas las viviendas tienen un sistema de conexión indirecto, debido a que requieren de almacenamiento para cubrir las horas en las cuales no existe suministro de agua.

El sistema indirecto se divide en indirecto sin bombeo y con bombeo. Cuando existe la suficiente presión y caudal para alimentar a los depósitos de almacenamiento elevados se utiliza la conexión indirecta sin bombeo; este tipo de conexión es utilizado en viviendas en las que habitan pocas familias o solamente una, esto debido a que las presiones de servicio no son suficientes para superar más de tres pisos; sin embargo, a pesar de las bajas presiones en la zona sur de la ciudad de Oruro, es una de las formas de conexión predominante.

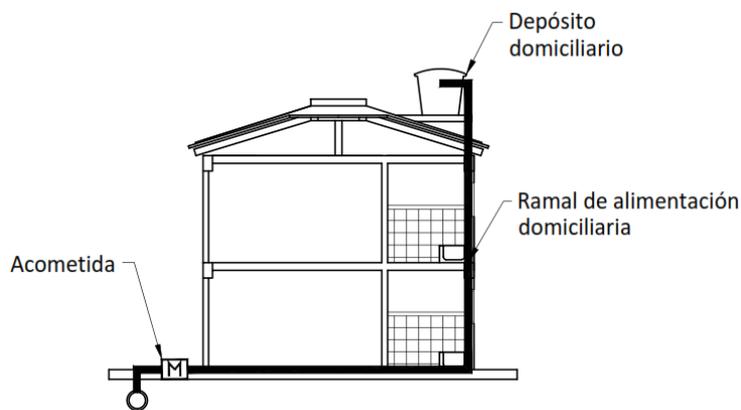


Fig. 10.26. Sistema de conexión indirecta, sin bombeo.

Las conexiones indirectas con bombeo son utilizadas generalmente en edificios multifamiliares; no es utilizado en viviendas donde habita poca gente debido al costo que implica el uso de energía eléctrica para la impulsión del agua. Es poco frecuente este tipo de conexión en la zona de estudio, debido a que existen pocos edificios multifamiliares en el lugar.

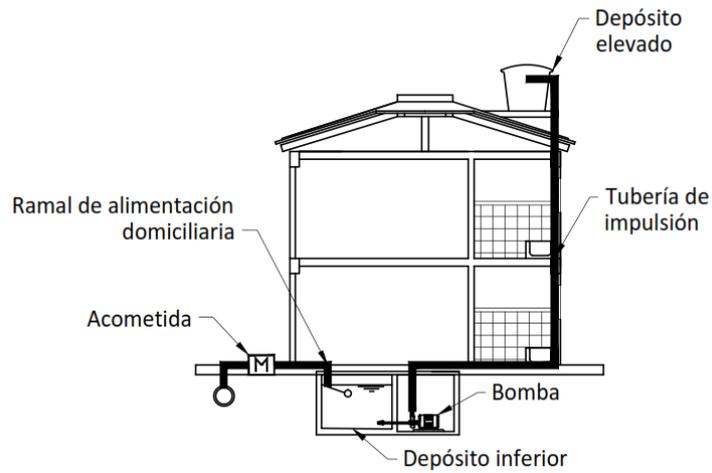


Fig. 10.27. Sistema de conexión indirecto, con bombeo

Debido a la intermitencia del suministro, la población tiene que almacenar agua de la forma que pueda en cada periodo de entrega de agua. En algunos casos, la gente utiliza recipientes pequeños ubicados a nivel del suelo donde consiguen almacenar agua; esto se debe a la baja presión en la red y también debido a la falta de recursos económicos para solventar los gastos energéticos que conlleva elevar el agua dentro la vivienda; esta costumbre puede generar problemas en la calidad del agua.

### 10.3.2.3. Descripción del subsistema de la zona sur

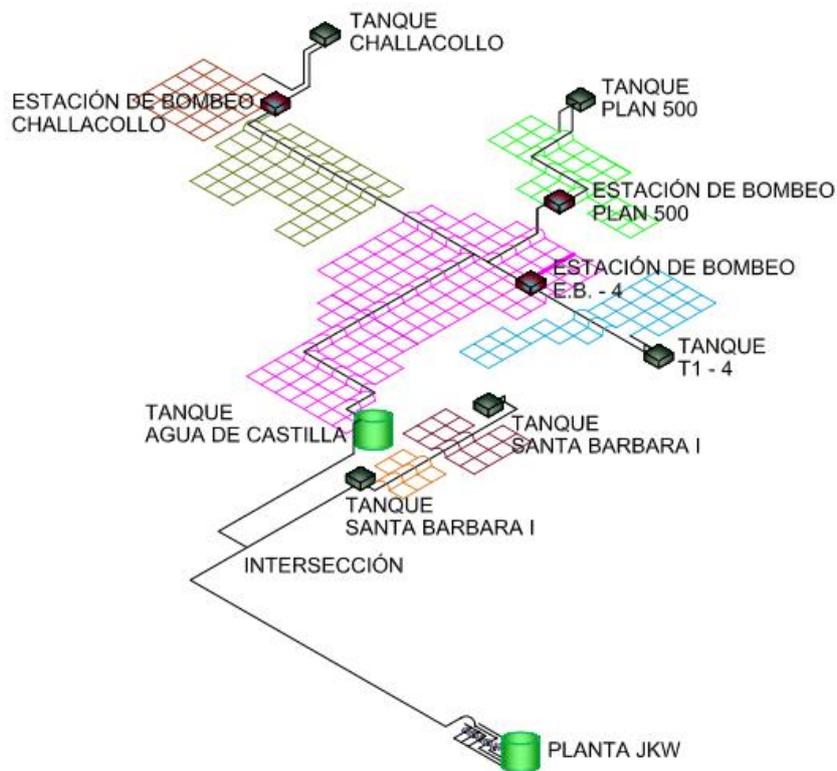


Fig. 10.28. Esquema isométrico del subsistema sur de abastecimiento de agua potable de Oruro

Fuente: SeLA – Oruro

Como se mencionó en anteriores acápite, la mayoría de las fuentes de abastecimiento llegan a la Planta JKW, desde la cual el agua es distribuida a los diferentes puntos de la ciudad. Específicamente, la zona sur es alimentada por la bomba número 4 ubicada en la Planta JKW, la cual impulsa el agua por una línea de impulsión de DN 350 (14 pulgadas) de hierro fundido hasta el tanque Agua de Castilla; esta tubería pasa por un punto de intersección en el cual se desvía una parte del caudal trasegado hacia el depósito Santa Bárbara I en horarios determinados. Los caudales de bombeo y las presiones son registrados a cada hora en la planta JKW; este trabajo se realiza de forma manual.

Una vez que el agua llega al depósito Agua de Castilla, se realiza la distribución a los 15 sectores que conforman el subsistema de la zona sur de la ciudad de Oruro, tres de los cuales cuentan con estaciones de bombeo dentro de la red; estas son las estaciones de Challacollo, Plan 500 y la E.B.-4, que impulsan el agua hacia depósitos más pequeños desde los cuales distribuyen por gravedad a los sectores correspondientes.

### 10.3.3. Balance hídrico

En base a los volúmenes de ingreso al sistema y los volúmenes facturados, desglosados más adelante, se procede a realizar el balance hídrico. Para completar la totalidad de valores se utilizan porcentajes proporcionados por SeLA-Oruro. Como el balance se realiza en el subsistema de la zona sur de la ciudad, utilizando como punto de partida el tanque Agua de Castilla, algunos volúmenes figuran en el cálculo como cero.

La incertidumbre en el volumen de consumo no facturado es un problema a la hora de establecer con precisión los volúmenes de las pérdidas de agua.

***Volumen de entrada al sistema:*** corresponde a un volumen de 1,101,119.20 m<sup>3</sup>/año

***Agua facturada exportada:*** no existen volúmenes exportados desde el tanque Agua de Castilla.

***Consumo facturado medido:*** el consumo facturado medio en la gestión 2012 fue de 601,402.00 m<sup>3</sup>/año.

***Consumo facturado no medido:*** este valor fue estimado en base al consumo promedio de los clientes con medición; este elemento proporciona al análisis de las pérdidas un cierto grado de incertidumbre, debido al desconocimiento real del consumo de los usuarios sin contador, pues gran porcentaje de este volumen puede ser pérdida por fugas o por desperdicio. Para la gestión 2012 se estimó un volumen de 291,537.58 m<sup>3</sup>/año.

***Consumo no facturado medido:*** Según establece el IWA, en este punto ingresan por ejemplo el riego de parques, limpieza de calles con agua, uso de bomberos; los dos primeros consumos son facturados al Municipio, por esta razón no ingresan en esta clasificación, el uso por bomberos fue mínimo por lo que se consideró para la gestión 2012 un volumen de 0.00 m<sup>3</sup>/año.

***Consumo no facturado no medido:*** En este punto corresponde ingresar los volúmenes no facturados no medidos, debido a que se limita el análisis solo a un sector de la ciudad no existirá este tipo de consumos, entonces el volumen ingresado será 0.00 m<sup>3</sup>/año.

***Consumo no autorizado:*** Este consumo se refiere básicamente a las conexiones clandestinas, se estima que en el sector existe un 1.5% del Volumen de entrada al sistema, 16,516.79 m<sup>3</sup>/año.

***Inexactitudes de los contadores y errores en el manejo de datos:*** Debido a la intermitencia del servicio, caudales bajos de llenado de depósitos domiciliarios y al tipo de contadores utilizados

(clase A), se estima un error de 10% del consumo facturado medido, por lo que el volumen es de 60,140.20 m<sup>3</sup>/año.

**Fugas en las tuberías de aducción y distribución:** Mientras no se tenga al sistema mejor estudiado, es difícil indicar cuál es el valor de las pérdidas en la tubería de aducción; sin embargo, esta parte del balance hídrico será calculada como la diferencia del volumen de entrada al sistema y los volúmenes consumidos; por experiencia de los técnicos de SeLA se estima que las pérdidas se dividen en 55% a las tuberías de distribución y 45% en las conexiones domiciliarias; no se consideraron pérdidas en el depósito. De esta forma, el volumen de fugas en las tuberías de distribución es 72,337.44 m<sup>3</sup>/año.

**Fugas y reboses en tanques de almacenamiento:** se considera que las pérdidas en el tanque son mínimas, tampoco se tienen mediciones debido a la dificultad que implica este proceso manteniendo el suministro diario, por lo que asume un valor de 0.00 m<sup>3</sup>/año.

**Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del contador del cliente:** como se indicó en anteriores puntos, el porcentaje de las pérdidas reales considerado para las acometidas es de 45% del total de pérdidas reales, por tanto el volumen de fugas es de 59,185.18 m<sup>3</sup>/año.

El balance hídrico del subsistema es:

Tabla 10.13. Balance hídrico del subsistema en formato del IWA, gestión 2012

Volumen de entrada al sistema $Q_i$  <b>1,101,119.19 m<sup>3</sup>/año</b>	Consumo autorizado $Q_A$  <b>892,939.58 m<sup>3</sup>/año</b>	Consumo autorizado facturado $Q_{AF}$	<b>892,939.58 m<sup>3</sup>/año</b>	Agua facturada exportada	<b>0.00 m<sup>3</sup>/año</b>	Agua facturada  <b>892,939.58 m<sup>3</sup>/año</b>	
				Consumo facturado medido	<b>601,402.00 m<sup>3</sup>/año</b>		
				Consumo facturado no medido	<b>291,537.58 m<sup>3</sup>/año</b>		
		Consumo autorizado no facturado $Q_{AuNF}$  <b>0.00 m<sup>3</sup>/año</b>			Consumo no facturado medido	<b>0.00 m<sup>3</sup>/año</b>	Agua no facturada  <b>208,179.61 m<sup>3</sup>/año</b>
					Consumo no facturado no medido	<b>0.00 m<sup>3</sup>/año</b>	
	Pérdidas de agua $Q_p$  <b>208,179.61 m<sup>3</sup>/año</b>		Pérdidas aparentes $Q_{PA}$			Consumo no autorizado	
					Inexactitudes de los medidores y errores en el manejo de datos	<b>60,140.20 m<sup>3</sup>/año</b>	
		Pérdidas reales $Q_{PR}$	<b>131,522.62 m<sup>3</sup>/año</b>			Fugas en las tuberías de aducción y distribución	
					Fugas y reboses en tanques de almacenamiento	<b>0.00 m<sup>3</sup>/año</b>	
					Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente	<b>59,185.18 m<sup>3</sup>/año</b>	

Resumiendo y calculando porcentajes con relación al volumen de entrada al sistema se tiene:

Tabla 10.14. Porcentajes representativos del Balance Hídrico IWA

Descripción	Volumen	Porcentaje
Agua facturada exportada	0.00 m <sup>3</sup> /año	0.00%
Consumo facturado medido	601,402.00 m <sup>3</sup> /año	54.62%
Consumo facturado no medido	291,537.58 m <sup>3</sup> /año	26.48%
Consumo no facturado medido	0.00 m <sup>3</sup> /año	0.00%
Consumo no facturado no medido	0.00 m <sup>3</sup> /año	0.00%
Consumo no autorizado	16,516.79 m <sup>3</sup> /año	1.50%
Inexactitudes de los medidores y errores en el manejo de datos	60,140.20 m <sup>3</sup> /año	5.46%
Fugas en las tuberías de aducción y distribución	72,337.44 m <sup>3</sup> /año	6.57%
Fugas y reboses en tanques de almacenamiento	0.00 m <sup>3</sup> /año	0.00%
Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente	59,185.18 m <sup>3</sup> /año	5.38%
Volumen de entrada al sistema <i>Q<sub>i</sub></i>	1,101,119.19 m <sup>3</sup> /año	100.00%

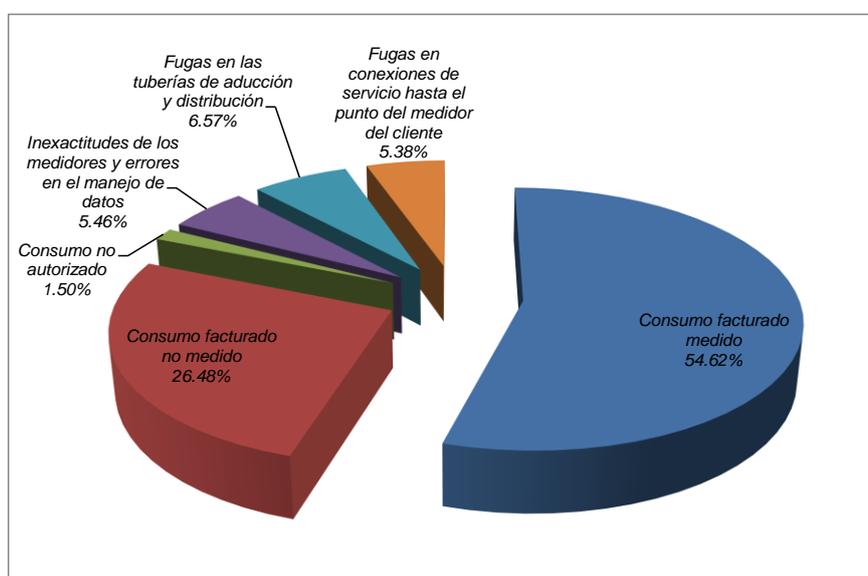


Fig. 10.29. Porcentajes representativos del Balance Hídrico

### 10.3.4. Demanda per cápita

En base al volumen de ingreso al sistema y la cantidad de usuarios del sistema, se calcula la demanda o dotación media del subsistema. Ésta alcanza a un valor de 84.32 l/hab/d, un valor superior a 50 l/hab/d por lo que se considera que el sistema tiene posibilidades de tener suministro continuo.

### 10.3.5. Porcentaje de fugas en suministro intermitente

Tras realizar el balance hídrico, se observa que el porcentaje de fugas en el sistema con suministro intermitente es pequeño. La suma entre el nivel de fugas en las tuberías principales (6.57%) y las que se producen en las conexiones de servicio (5.38%) totaliza un 11.95%.

El porcentaje bajo se debe principalmente a las presiones bajas y las pocas horas de suministro. Este nivel de fugas se incrementa notablemente tras la transición a suministro continuo. En los siguientes acápite se aborda con mayor detalle la propuesta de solución a este problema.

### 10.3.6. Volumen de ingreso al sistema

En base a la información de la gestión 2012, recolectada en la Unidad de Producción de SeLA-Oruro, se tiene el volumen de entrada al sistema.

Debido a que se estudia solo un subsistema, se considera que la planta JKW es la fuente de suministro, por lo que se utilizan los volúmenes enviados desde la misma considerándola como fuente de suministro de agua. Es importante contar con la información detallada por cada hora y la totalizada, tanto para el balance hídrico como para el planteamiento de las medidas de mejora del sistema.

Tabla 10.15. Volumen por horas de ingreso al subsistema

Hora	Volumen de ingreso (m <sup>3</sup> /h)
0:00	210.24
1:00	256.03
2:00	227.01
3:00	192.08
4:00	185.31
5:00	211.43
6:00	183.16
7:00	13.11
8:00	0.00
9:00	0.00
10:00	0.00
11:00	0.00
12:00	0.00
13:00	0.00
14:00	0.00
15:00	5.29
16:00	116.22
17:00	123.31
18:00	139.97
19:00	183.51
20:00	321.49
21:00	324.29
22:00	292.90
23:00	193.48
<b>Total:</b>	<b>3178.84</b>

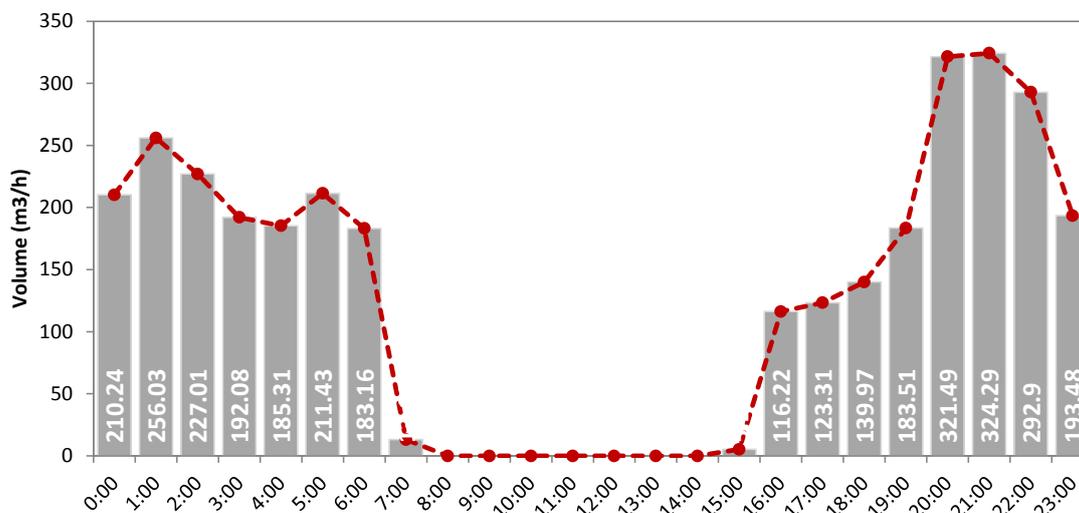


Fig. 10.30. Curva de volumen de ingreso al sistema

### 10.3.7. Volumen consumido en la red

Esta información se recolectó del Departamento de Facturación de SeLA-Oruro, que administra el sistema de información de clientes de la empresa; los datos corresponden al mes de mayor consumo del año 2015, el mes de noviembre. La presencia de usuarios sin contador exige realizar cálculos adicionales para estimar el volumen consumido por éstos.

El volumen consumido por los usuarios con contador, desglosado por sector es detallado en la tabla 10.16.

Tabla 10.16. Volumen de consumo facturado medido

<b>Sector</b>	<b>Volumen mensual, usuarios con contador (m<sup>3</sup>)</b>
S01-05	1655
S01-06	3852
S01-07	5890
S01-08	3550
S01-10	1718
S01-11	1791
S01-09	3092
S01-13	6818
S01-14	1556
S01-15	2313
S01-16	3004
S02	7224
M02	2397
S01-12	12942
S01-18	0
<b>TOTAL</b>	<b>57802</b>

A pesar de contar con medición en todo el sector S01-18, no se realiza la medición debido a problemas sociales. Esta situación y la falta de contadores en varios sectores, genera un volumen de agua consumida facturada no medida que es reflejado en el balance hídrico.

Con el volumen mensual que consume un usuario con medición, calculado en cada sector, se estima el volumen de consumo de los usuarios no medidos. Sin embargo, debe considerarse que esta estimación puede arrojar valores pequeños con relación a la tendencia de consumir mayor cantidad de agua cuando no se cuenta con medición, aunque en un sistema con suministro intermitente este hecho se ve reducido debido a las presiones bajas y la dependencia de la presión del caudal demandado.

Tabla 10.17. Volumen mensual medio consumido por usuarios con medición

<b>Sector</b>	<b>Volumen mensual medido (m<sup>3</sup>/mes/conexión)</b>
S01-05	13.68
S01-06	13.06
S01-07	15.30

S01-08	11.02
S01-10	9.60
S01-11	11.94
S01-09	10.07
S01-13	8.48
S01-14	8.79
S01-15	11.23
S01-16	5.32
S02	13.48
M02	15.87
S01-12	14.41

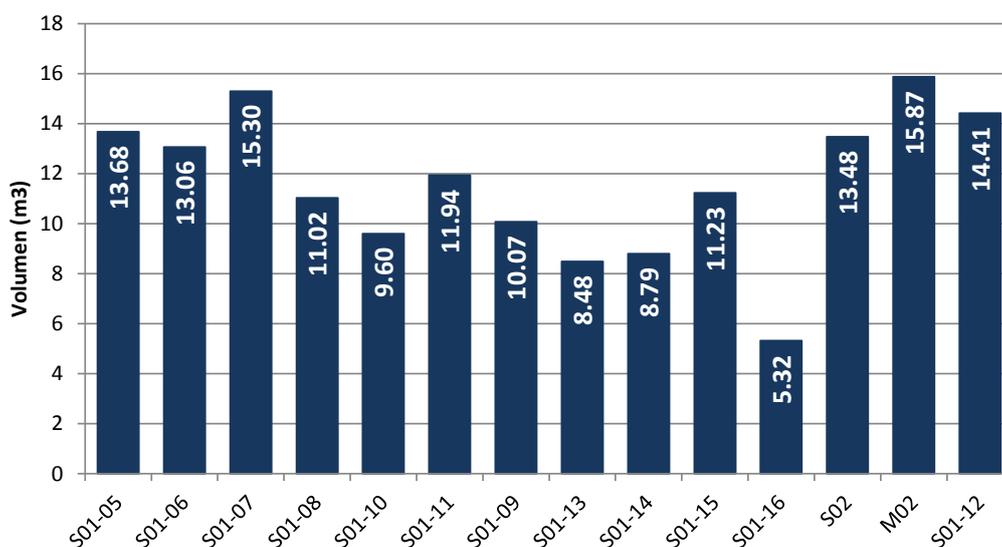


Fig. 10.31. Volumen mensual medio consumido por clientes con medición

Los valores (Fig. 10.31) muestran una distribución inequitativa resultado del suministro intermitente. Generalmente, los sectores con mayor cantidad de horas de suministro y mejores presiones consumen más.

Teniendo como base a estos consumos, se procede a calcular el volumen de consumo facturado no medido:

Tabla 10.18. Volumen de consumo facturado no medido

Sector	Usuarios sin contador	Volumen mensual adoptado (m³/mes/conex)	Volumen mensual (m³/mes)
S01-05	26	13.68	355.62
S01-06	172	13.06	2245.91
S01-07	208	15.30	3182.13
S01-08	115	11.02	1267.86
S01-10	206	9.60	1977.14
S01-11	94	11.94	1122.36
S01-09	208	10.07	2094.91

S01-13	261	8.48	2213.31
S01-14	99	8.79	870.31
S01-15	5	11.23	56.14
S01-16	353	5.32	1876.84
S02	39	13.48	525.63
M02	86	15.87	1365.18
S01-12	187	14.41	2695.05
S01-18	385	11.59	4461.82
<b>TOTAL</b>	<b>2059</b>		<b>26310.19</b>

El sector S01-18 tiene una cobertura de medición de 100%, pero no se realizan las mediciones que corresponden por las razones indicadas anteriormente. En este caso, se estima su consumo utilizando el valor promedio de los otros sectores.

El volumen consumido en el mes de noviembre debe ser ajustado; para este fin, se calcula un peso basado en el volumen mensual consumido por cada sector; a continuación se realizará esta desagregación para calcular el volumen total de entrada a cada sector.

Tabla 10.19. Cálculo del caudal medio de entrada a cada sector

Sector	Consumo autorizado facturado (m <sup>3</sup> /mes)	Peso de cada sector	Volumen de ingreso al sector (m <sup>3</sup> /mes)	Volumen de ingreso al sector (m <sup>3</sup> /d)	Caudal medio de ingreso al sector (l/s)
S01-05	2010.62	2.39%	2279.60	75.99	0.88
S01-06	6097.91	7.25%	6913.70	230.46	2.67
S01-07	9072.13	10.79%	10285.81	342.86	3.97
S01-08	4817.86	5.73%	5462.40	182.08	2.11
S01-10	3695.14	4.39%	4189.48	139.65	1.62
S01-11	2913.36	3.46%	3303.11	110.10	1.27
S01-09	5186.91	6.17%	5880.82	196.03	2.27
S01-13	9031.31	10.74%	10239.53	341.32	3.95
S01-14	2426.31	2.88%	2750.90	91.70	1.06
S01-15	2369.14	2.82%	2686.09	89.54	1.04
S01-16	4880.84	5.80%	5533.80	184.46	2.13
S02	7749.63	9.21%	8786.38	292.88	3.39
M02	3762.18	4.47%	4265.49	142.18	1.65
S01-12	15637.05	18.59%	17728.99	590.97	6.84
S01-18	4461.82	5.30%	5058.73	168.62	1.95
<b>Total</b>	<b>84112.19</b>		<b>95364.82</b>	<b>3178.83</b>	<b>36.79</b>

De esta forma, se obtiene el caudal medio diario de toda la zona de estudio (36.79 l/s), además de los volúmenes diarios de cada uno de los sectores.

### 10.3.7.1. Horarios de suministro

La información relacionada con los horarios de distribución es muy importante; ésta permite calcular los caudales por hora demandados en toda la red; es decir, en base a esta información, se puede elaborar la curva de suministro de la red. Este cálculo es necesario debido a que no se cuenta con contador o medidor de flujo a la salida del depósito Agua de Castilla.

Tabla 10.20. Horarios de suministro del subsistema sur de la ciudad de Oruro

Sector	Hora																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
S01-05																								
S01-06																								
S01-07																								
S01-08																								
S01-10																								
S01-11																								
S01-09																								
S01-13																								
S01-14																								
S01-15																								
S01-16																								
S02																								
M02																								
S01-12																								
S01-18																								

Fuente: SeLA - Oruro

Lo que se puede observar en el horario de suministro es que 14 de los 15 sectores coinciden en horarios de la mañana. Esta simultaneidad en el suministro es desventajosa para un funcionamiento hidráulico del sistema; bajo estas condiciones el sistema demanda un caudal muy grande y, en consecuencia, se tienen bajas presiones en los puntos extremos.

### 10.3.7.2. Curva de suministro

Una vez calculados los volúmenes que ingresan a cada uno de los sectores por hora, se procede a ubicar estos valores en los horarios de suministro correspondientes. La suma de los valores calculados para cada hora corresponde a la curva de suministro de la zona sur de Oruro.

Tabla 10.21. Cálculo del caudal de suministro por horas

Hora	Volumen por horas de cada sector														Total (m <sup>3</sup> /h)	
	S01-05	S01-06	S01-07	S01-08	S01-10	S01-11	S01-09	S01-13	S01-14	S01-15	S01-16	S02	M02	S01-12		S01-18
0:00	0	0	0	0	0	0	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	42.16	183.31
1:00	0	0	0	0	0	0	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	0	141.15
2:00	0	0	0	0	0	0	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	0	141.15
3:00	0	0	0	0	0	0	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	0	141.15
4:00	0	0	0	0	0	0	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	0	141.15
5:00	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	118.19	0	475.57
6:00	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	118.19	0	475.57
7:00	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	118.19	0	475.57
8:00	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	0	0	0	0	0	24.41	10.16	118.19	0	368.98
9:00	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	0	0	0	0	0	24.41	10.16	118.19	0	368.98
10:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.16	0	0	10.16
11:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

15:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.77	0	10.16	0	42.16	69.08	
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.77	24.41	10.16	0	42.16	93.49	
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.77	24.41	10.16	0	42.16	93.49	
<b>Total</b>	<b>75.99</b>	<b>230.46</b>	<b>342.86</b>	<b>182.08</b>	<b>139.65</b>	<b>110.10</b>	<b>196.03</b>	<b>341.32</b>	<b>91.70</b>	<b>89.54</b>	<b>184.46</b>	<b>292.88</b>	<b>142.18</b>	<b>590.97</b>	<b>168.62</b>	<b>3178.83</b>	

Graficando el total suministrado en cada una de las horas, se obtiene la curva de suministro de la población:

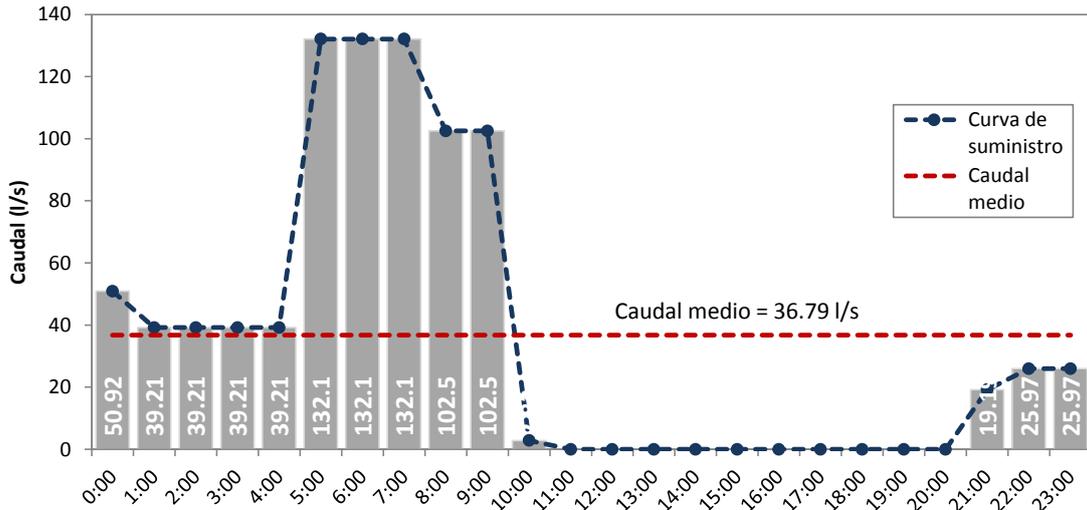


Fig. 10.32. Curva de suministro zona sur de Oruro

En la figura 10.32 se observa que el caudal máximo del sistema alcanza a 132.10 l/s: la simultaneidad en el suministro de 14 sectores, en horarios de la mañana, genera este caudal pico entre las 5:00 y 7:00 a.m.

Asimismo, en base a los caudales calculados en cada hora, es posible determinar la curva de modulación de salida del depósito Agua de Castilla.

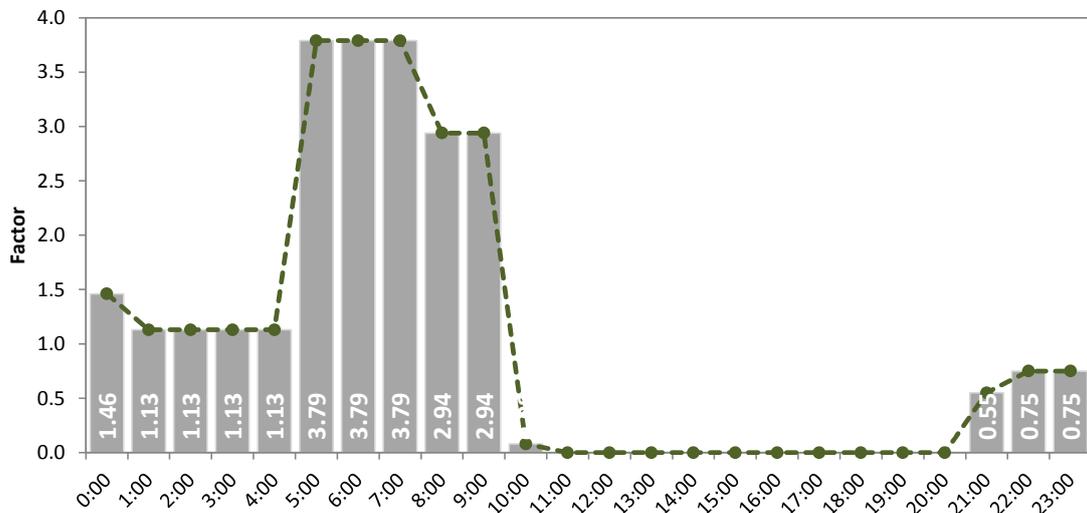


Fig. 10.33. Curva de modulación zona sur de Oruro

El factor pico alcanza a 3.79, superior al factor pico en zonas de la ciudad de Oruro que cuentan con suministro continuo (2.5). Esta es una señal de mala gestión.

### 10.3.8. Volumen de regulación del depósito Agua de Castilla

La información detallada de los volúmenes de ingreso y la curva de suministro permiten calcular volumen de regulación del depósito Agua de Castilla:

Tabla 10.22. Cálculo del volumen de regulación depósito Agua de Castilla

Hora	Volumen de ingreso (m <sup>3</sup> )	Volumen de suministro (m <sup>3</sup> )	Balance (m <sup>3</sup> )	Balance (m <sup>3</sup> )	Volumen de ingreso acumulado (m <sup>3</sup> )	Volumen de suministro acumulado (m <sup>3</sup> )
			0.00	1444.40	0.00	0.00
0:00	210.24	183.31	26.93	1471.33	183.31	210.24
1:00	256.03	141.15	141.81	1586.21	324.46	466.28
2:00	227.01	141.15	227.67	1672.07	465.62	693.29
3:00	192.08	141.15	278.60	1723.00	606.77	885.37
4:00	185.31	141.15	322.75	<b>1767.15</b>	747.93	1070.67
5:00	211.43	475.57	58.60	1503.00	1223.50	1282.10
6:00	183.16	475.57	-233.82	1210.58	1699.07	1465.26
7:00	13.11	475.57	-696.28	748.12	2174.65	1478.37
8:00	0.00	368.98	-1065.26	379.14	2543.63	1478.37
9:00	0.00	368.98	-1434.24	10.16	2912.61	1478.37
10:00	0.00	10.16	-1444.40	0.00	2922.77	1478.37
11:00	0.00	0.00	-1444.40	0.00	2922.77	1478.37
12:00	0.00	0.00	-1444.40	0.00	2922.77	1478.37
13:00	0.00	0.00	-1444.40	0.00	2922.77	1478.37
14:00	0.00	0.00	-1444.40	0.00	2922.77	1478.37
15:00	5.29	0.00	-1439.11	5.29	2922.77	1483.66
16:00	116.22	0.00	-1322.89	121.51	2922.77	1599.88
17:00	123.31	0.00	-1199.57	244.83	2922.77	1723.20
18:00	139.97	0.00	-1059.60	384.80	2922.77	1863.17
19:00	183.51	0.00	-876.09	568.31	2922.77	2046.68
20:00	321.49	0.00	-554.60	889.80	2922.77	2368.17
21:00	324.29	69.08	-299.39	1145.01	2991.85	2692.46
22:00	292.90	93.49	-99.98	1344.42	3085.34	2985.36
23:00	193.48	93.49	0.01	1444.41	3178.83	3178.84

Comparando los volúmenes de ingreso y de salida del tanque de almacenamiento, se observa que el horario de la mañana es sobreexplotado (generando un pico y reduciendo las horas de distribución), y en el horario de la tarde existe acumulación de volumen que no es aprovechado para la distribución.

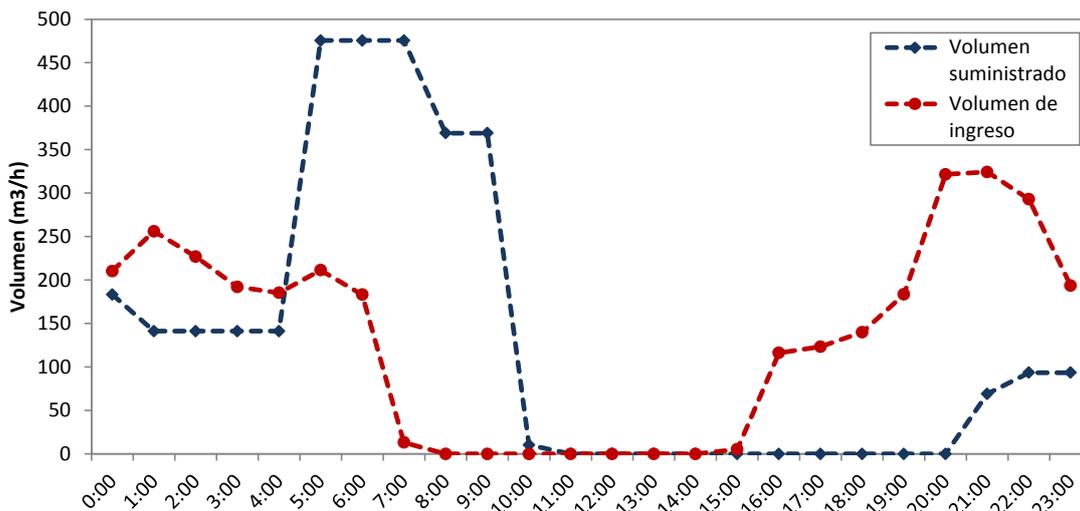


Fig. 10.34. Volúmenes de ingreso y salida, depósito agua de Castilla

Otra forma de evaluar el volumen de regulación del depósito es por medio de la acumulación de los volúmenes para posteriormente realizar el balance correspondiente.

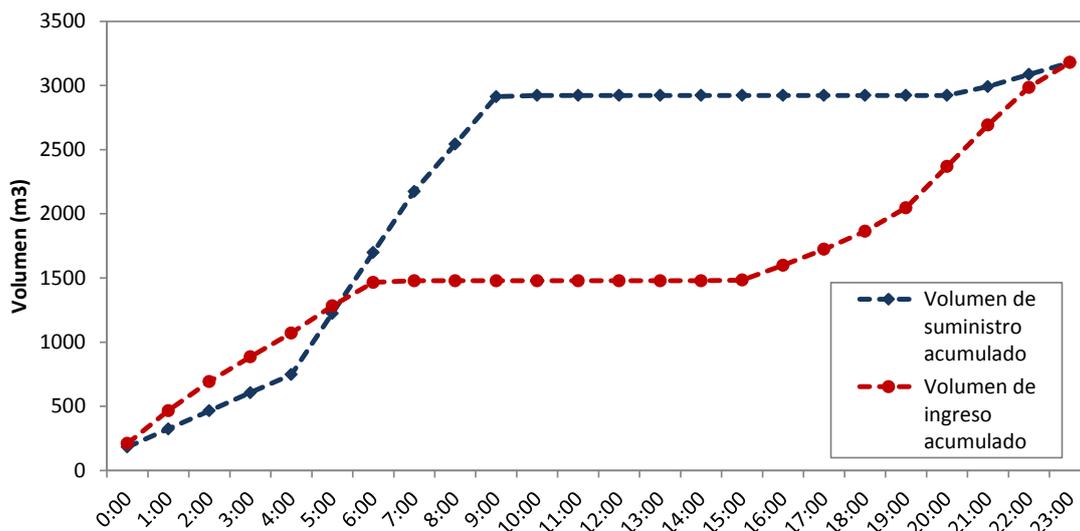


Fig. 10.35. Volúmenes acumulados de ingreso y salida, depósito agua de Castilla

El volumen de regulación del depósito Agua de Castilla es  $1767.15 \text{ m}^3$ , muy cercano a los  $1800 \text{ m}^3$  disponibles; de seguir un crecimiento del sistema incrementando caudales con estos horarios el volumen del tanque será insuficiente.

### 10.3.9. Valores ponderados de presión y horas de suministro

Dos elementos clave para estimar la presión que se alcanzará en suministro continuo son los valores de la presión y el número de horas ponderado del sistema. Estos elementos se calculan en base a los valores medidos en cada sector y la cantidad de usuarios existentes en cada uno de ellos:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^n (vp_i \cdot nc_i)}{\sum_{i=1}^n nc_i}, \quad (10.12)$$

$$h_{\text{int}} = \frac{\sum_{i=1}^n (nh_i \cdot nc_i)}{\sum_{i=1}^n nc_i}, \quad (10.13)$$

donde:

$n$  = número total de sectores de la red

$vp_i$  = valor de la presión de servicio del sector  $i$

$nc_i$  = número de clientes o usuarios del sector  $i$

$nh_i$  = número de horas de suministro del sector  $i$

Tabla 10.23. Cálculo de la presión de servicio y las horas de suministro ponderadas del subsistema

Sector	Presión de servicio (mca)	Número total de usuarios	Horas de suministro
S01-05	40.03	147	5
S01-06	16.83	467	5
S01-07	19.44	593	5
S01-08	22.10	437	5
S01-10	20.06	385	5
S01-11	11.95	244	5
S01-09	30.02	515	8
S01-13	4.44	1065	8
S01-14	15.56	276	8
S01-15	15.67	211	8
S01-16	0.00	918	11
S02	41.70	575	12
M02	26.12	237	14
S01-12	2.01	1085	5
S01-18	26.77	385	4
	<b>15.39</b>	<b>7540</b>	<b>7.32</b>

La presión ponderada, en base al número de usuarios, es 15.39 mca, y la cantidad de horas de suministro del subsistema alcanza a 7.32 horas al día.

### **10.3.10. Categorización del sistema con suministro intermitente**

Tras la evaluación de la demanda per cápita y las pérdidas en el sistema actual con suministro intermitente, éste no presenta escasez física del recurso; por lo tanto, tiene la posibilidad de convertirse en un sistema con suministro continuo.

Debido a las limitaciones económicas de la empresa encargada del servicio de agua potable (SeLA-Oruro), se establece que el sistema intermitente tiene escasez económica, por lo que le corresponde una categoría tipo 2, según la categorización definida en el *capítulo 2* de la presente tesis doctoral.

En el subsistema de suministro de agua de la zona sur de Oruro, los problemas frecuentes son las presiones bajas y el abastecimiento inequitativo; de esta forma, se considera que los problemas son del tipo A.

En consecuencia, la categoría del subsistema estudiado es 2A, de escasez económica, que necesita medidas de gestión técnica para mejorar el servicio. El sistema puede tener suministro continuo por medio de un proceso de transición gradual, tomando en cuenta las limitaciones económicas de la empresa de agua.

### **10.4. Evaluación del origen del suministro intermitente, cuando las ampliaciones reducen la capacidad de la red**

La ampliación de una red de suministro de agua busca llegar con el servicio a un mayor número de personas; sin embargo, cuando esta ampliación no toma en cuenta la capacidad de la red y la influencia de las nuevas extensiones, se puede llegar a escenarios de reducción de la capacidad, amenazando la cantidad y calidad del servicio; incluso, las nuevas condiciones pueden dar pie a un suministro intermitente (Ilaya-Ayza et al., 2015b).

En el presente acápite, se busca reconstruir las condiciones hidráulicas del subsistema de la zona sur de Oruro, en el periodo comprendido entre los años 1968 a 2013. El modelo utilizado es el actual, considerando que la red inicial se mantiene desde la inauguración de la infraestructura. Debido a la inexistencia de información, se utiliza como referencia el crecimiento de la mancha urbana, para la cual se estima la topología de la red de suministro en cada uno de los periodos de estudio. Tomando como referencia la población de cada uno de los periodos estudiados y la demanda de agua, es posible calcular el caudal requerido por la población. Sin embargo, para comparar este valor con la capacidad de la red es necesario que ambos elementos tengan las mismas dimensiones, por lo que se propone el uso del indicador *caudal máximo teórico*.

El año 1968 se inaugura el proyecto “Agua potable para la ciudad de Oruro” (ANESAPA, 2014), el cual incluía la infraestructura principal para el suministro de agua en el subsistema de la zona sur de la ciudad, depósito y tuberías principales. El subsistema tenía suministro continuo; actualmente tiene suministro intermitente; no se cuentan con registros de cuándo el sistema empezó el suministro intermitente.

La ciudad fue creciendo en extensión y población y, consecuentemente, lo hacía la red de distribución; este crecimiento es mostrado en la siguiente figura:

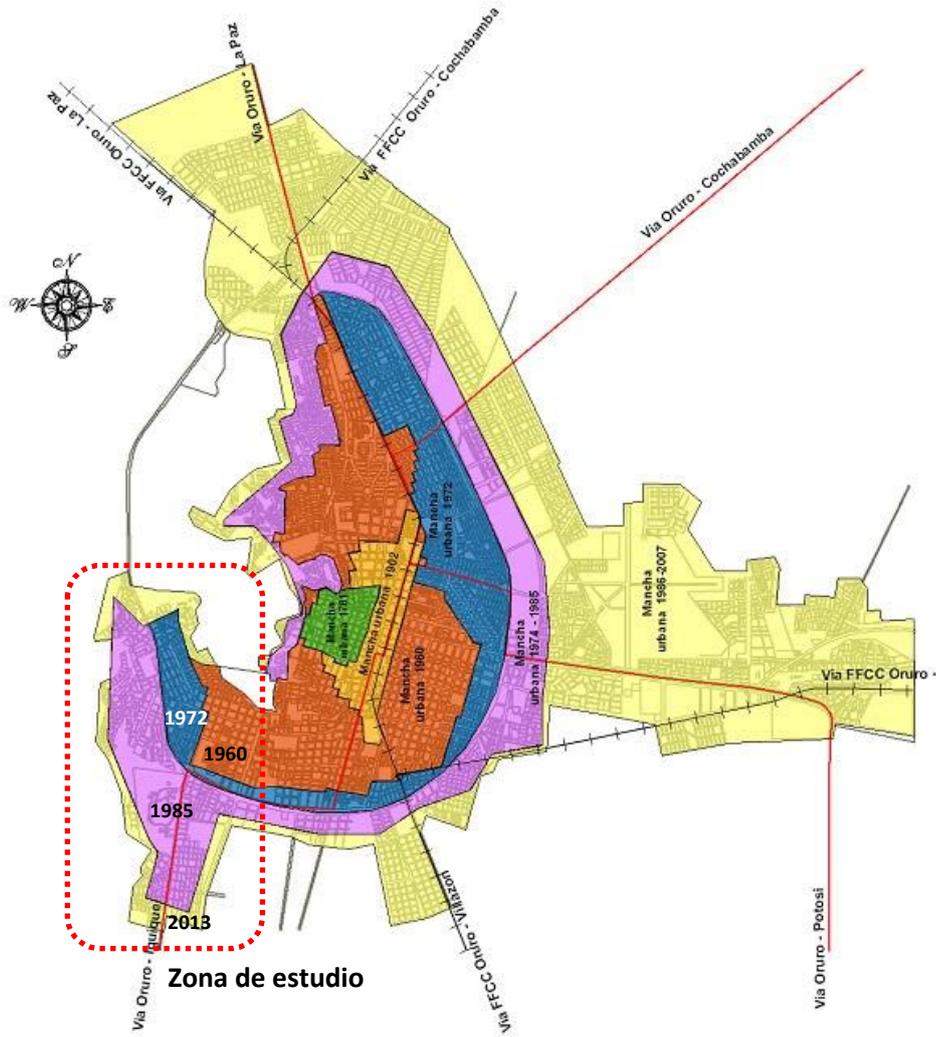


Fig. 10.36. Crecimiento urbano de Oruro

Fuente: (Martinely, 2009)

El crecimiento de la población de la ciudad de Oruro es detallado en la siguiente tabla en base a los datos de censos poblacionales.

Tabla 10.24. Población total de la ciudad de Oruro

Año	Población área urbana (hab)
1950	73 094
1976	158 615
1992	222 018
2001	236 110
2012	264 943

Fuente: INE - Bolivia (2015)

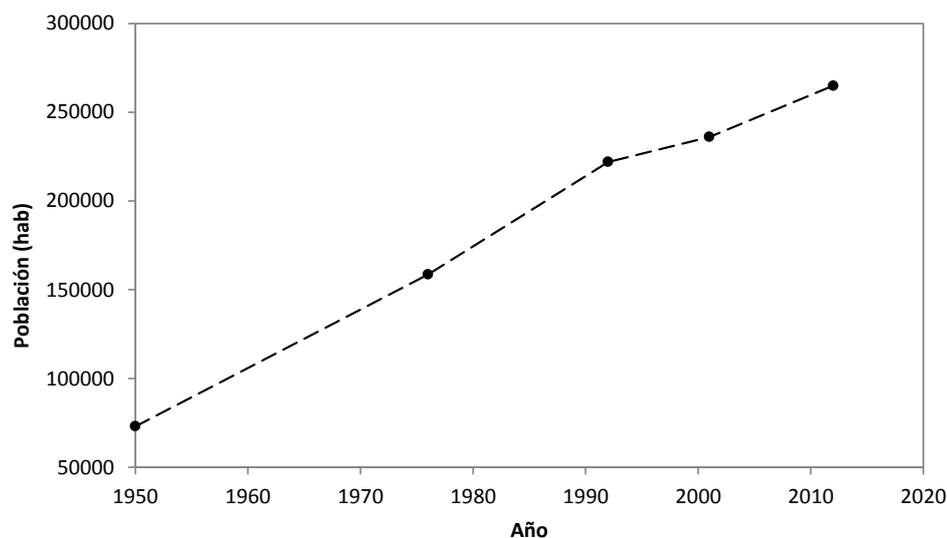


Fig. 10.37. Evolución de la población total de la ciudad de Oruro

Fuente: INE - Bolivia (2015)

Considerando el tamaño del área urbana, la densidad poblacional y la cantidad de usuarios actual, es posible estimar la población de la zona de estudio en cada uno de los periodos de crecimiento conocidos, definidos por el crecimiento urbano. Asimismo, en base a la dotación media actual del subsistema (84.32 l/hab/d) y un factor pico de 2.5, representativo de zonas de la ciudad que cuentan con agua potable durante veinticuatro horas, se calcula el requerimiento de caudal máximo horario en cada uno de los años de estudio.

Tabla 10.25. Población del subsistema sur y caudal máximo requerido

Año	Población (hab)	Caudal máximo requerido (l/s)
1968	13842	33.77
1972	16814	41.02
1985	33407	81.51
2007	37395	91.24
2013	37700	91.98

La red actual del subsistema sur de Oruro, está configurada por los tramos y nudos siguientes:

Tabla 10.26. Nudos y tuberías de la red del subsistema sur de Oruro

Nudo	Cota (m)	Demanda (l/s)	Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)
J-1	3729	0	P-1	419.3	300
J-2a	3726	0	P-2	82.1	200
S01-06	3726	2.667	P-3	354.2	100
J-4	3725	0	P-4	512.2	100
J-5	3724	0	P-5	121.8	150
J-6	3722	0	P-6	217.0	200

J-7	3720	0	P-7	278.3	200
J-8	3720	0	P-8	245.0	200
J-9	3720	0	P-9	32.2	200
S01-18	3716	1.952	P-10	2353.4	150
J-2	3717	0	P-11	229.1	200
M02	3719	1.646	P-12	675.4	200
J-13	3721	0	P-13	389.4	200
J-14	3722	0	P-14	108.5	200
S01-14	3725	1.061	P-15	216.4	200
S01-16	3745	2.135	P-17	1155.8	100
S02	3726	3.39	P-19	881.4	200
J-38	3727	0	P-20	330.1	100
S01-09	3730	2.269	P-21	355.0	100
J-20	3725	0	P-25	201.0	75
S01-15	3722	1.036	P-26	314.3	200
J-26	3722	0	P-27	902.6	150
J-27	3722	0	P-28	469.9	150
S01-12	3731	6.84	P-29	36.0	50
S01-11	3720	1.274	P-30	109.6	100
S01-08	3719	2.107	P-34	111.8	150
S01-10	3721	1.616	P-38	548.7	300
S01-13	3733	3.95	P-40	197.7	200
J-37	3723	0	P-41	60.1	75
S01-05	3724	0.879	P-42	21.5	200
S01-07	3717	3.968	P-43	157.8	100
			P-44	75.8	75

El crecimiento urbano de la ciudad permite configurar los escenarios de crecimiento de la red de suministro del subsistema, tuberías principales e ingreso a sectores (ver Fig. 10.38). En base a estas configuraciones, se calcula la curva de consigna y el caudal máximo teórico o capacidad de la red respectiva (Fig. 10.39). Se adopta una presión mínima de ingreso a los sectores ( $P_{min}$ ) de 20 mca, la elevación mínima del nivel de agua en el depósito ( $H_s$ ) es 3771 msnm y la elevación promedio de la red es 3723.8 msnm.

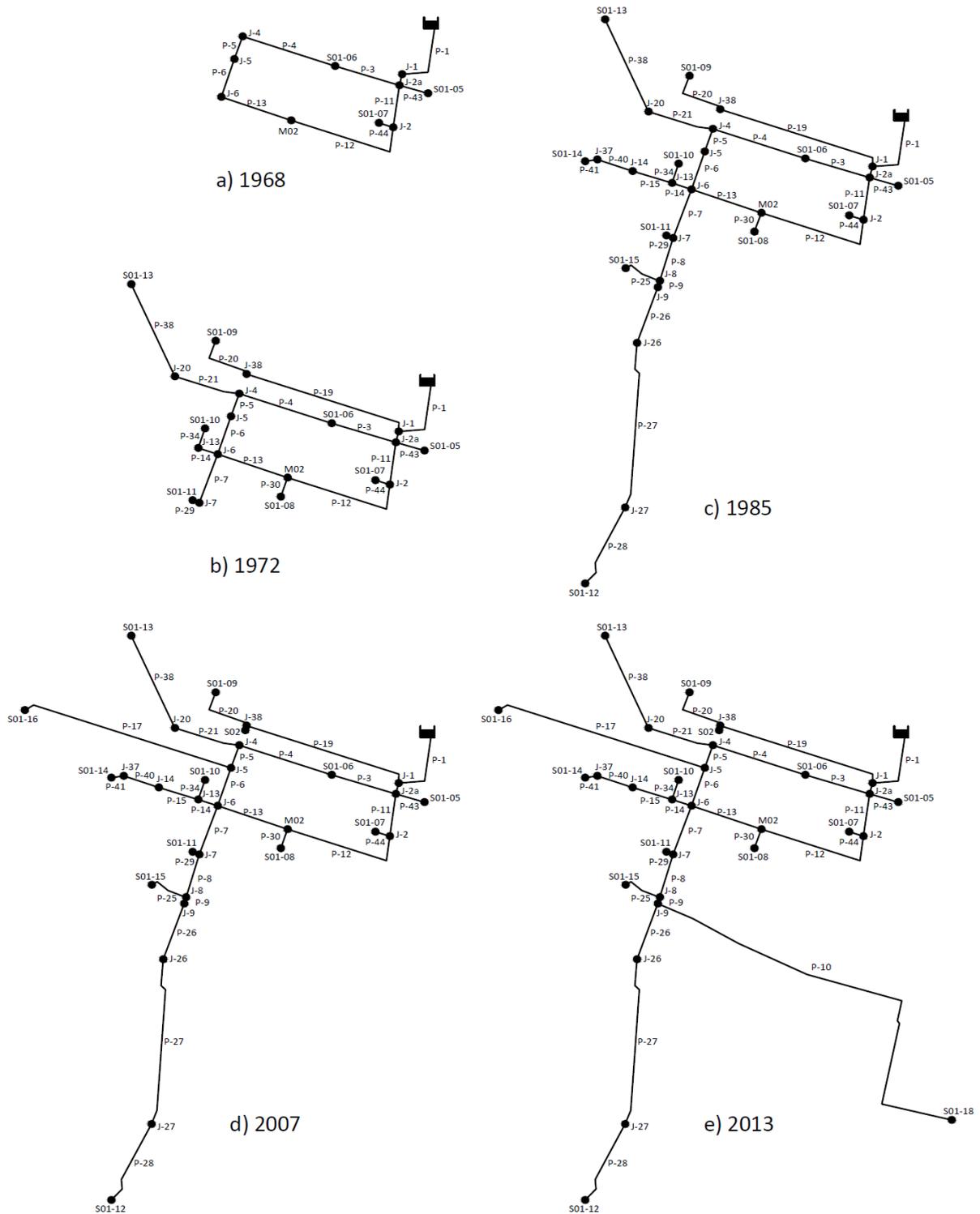


Fig. 10.38. Crecimiento de la red del subsistema sur de Oruro

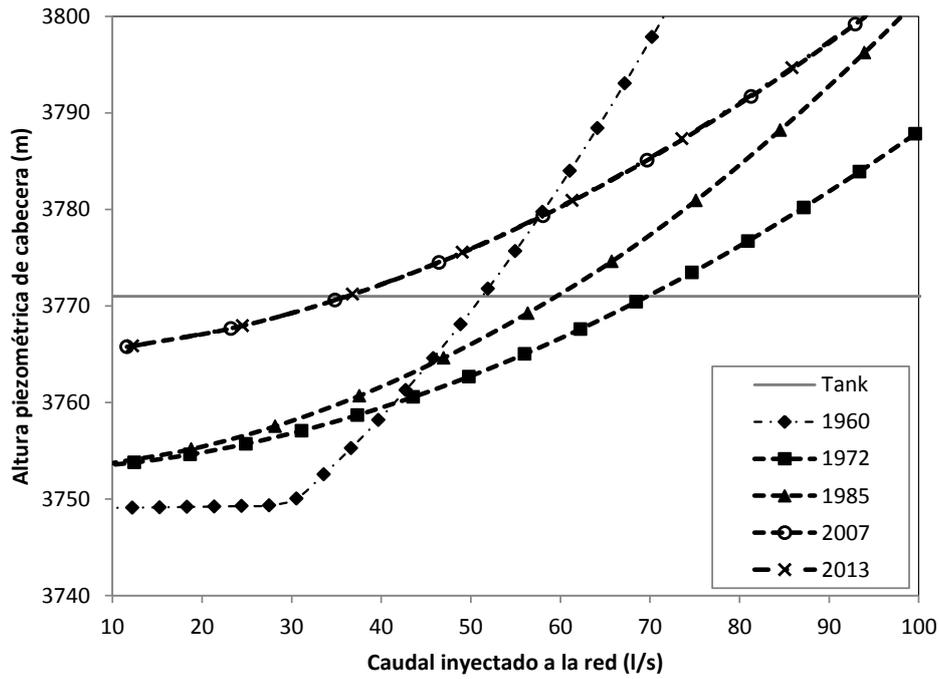


Fig. 10.39. Curva de consigna en cada uno de los años de estudio

Tabla 10.27. Caudal máximo teórico de cada uno de los años de estudio

Año	Población (hab)	Caudal máximo teórico (l/s)
1968	13842	51.88
1972	16814	69.72
1985	33407	59.56
2007	37395	36.21
2013	37700	36.12

La comparación de los valores calculados del caudal máximo teórico, que representa a la capacidad de la red, con el caudal máximo requerido por la población, de cada uno de los años de estudio, es mostrada en la Fig. 10.40.

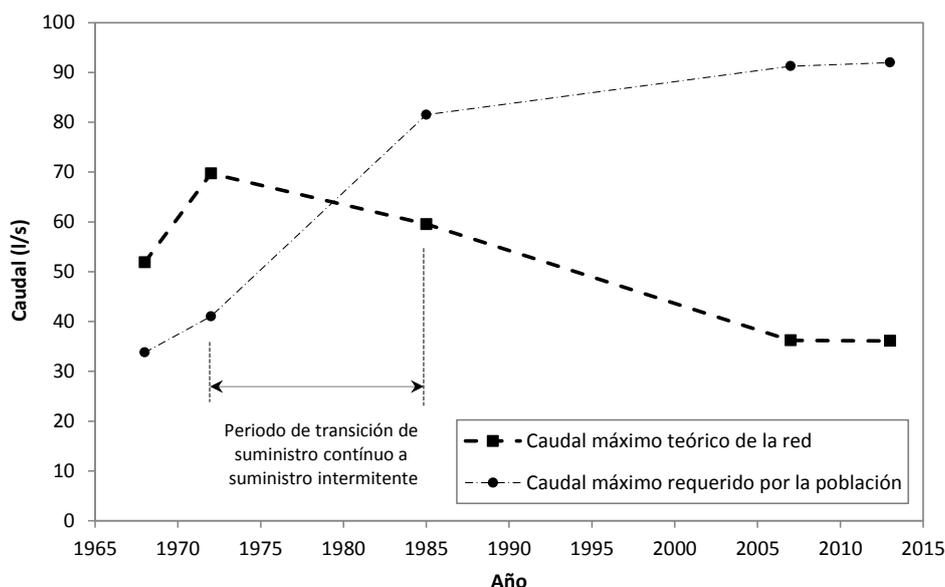


Fig. 10.40. Evolución del caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido en la zona de estudio

El sistema estudiado nace para suministro continuo; esta situación es evidente pues la capacidad de la red es superior al caudal máximo requerido por la población en 1968; la red podía suministrar agua a mayor cantidad de población, pues el diseño inicial así lo permite y otorga una holgura razonable para futuras ampliaciones. Este escenario se mantiene durante todo el primer periodo 1968-1972; las ampliaciones realizadas en este periodo son desarrolladas en zonas favorables lo que repercute en la ampliación de la capacidad de la red y la red se desarrolla de forma adecuada.

En el periodo 1972-1985 la situación es diferente; la zona sur de la ciudad de Oruro crece en mayor proporción al resto de la ciudad y las extensiones de la red para cubrir los nuevos sectores son de gran longitud; la elección de diámetros pequeños incrementa la pérdida de carga y, en consecuencia, la capacidad de la red tiende a reducirse.

En 1985 el caudal máximo requerido por la población supera al caudal máximo teórico, lo cual impone la reducción de las presiones en la red; los nudos desfavorables (ver *Capítulo 3*) pueden quedarse sin agua en periodos de máximo consumo; la gente necesita proteger su suministro y opta por el uso de depósitos domiciliarios. Este escenario genera inequidad en el suministro: los nudos favorables derrochan agua, debido a una medición inexistente, y los usuarios ubicados en zonas desfavorables se quejan por la falta de agua; se impone entre la población y el operador una percepción de escasez física de agua, a la que debe buscarse una solución.

Para resolver la escasez de agua en los puntos desfavorables existen dos soluciones potenciales: la primera opción, aunque no muy evidente en escenarios de escasez económica y gestión deficiente, es la ampliación de la capacidad de la red, renovando y/o reforzando tramos principales; y la segunda opción, generalizada por la idea errónea de la falta de agua y por la escasez económica del sistema, es optar por el suministro intermitente.

La adopción del suministro intermitente limita las horas de suministro en diferentes zonas, imponiendo horarios que buscan reducir el caudal máximo; esta acción puede ser útil inicialmente, pues los tramos principales deben conducir caudales menores; en consecuencia, llega el caudal suficiente a los puntos desfavorables; sin embargo, el crecimiento poblacional exigirá nuevas

extensiones; continuar con estas acciones condena al sistema a la intermitencia en el suministro de agua.

En este segundo periodo, se cruzan las curvas del caudal máximo teórico y el caudal máximo requerido; existe un punto en el cual la capacidad de la red ya no cubre la demanda de la población; desde esa fecha la relación se mantiene, por lo que se puede afirmar que el suministro intermitente en la zona sur de la ciudad de Oruro comenzó entre 1972 y 1985.

En el tercer periodo de estudio, 1985-2007, se consolida el suministro intermitente, pues las nuevas ampliaciones siguen reduciendo la capacidad de la red; la ampliación para el sector S01-16 es de diámetro pequeño y alimenta a un punto de mayor elevación; estas características lo convierten en nudo crítico, lo cual condiciona a la curva de consigna y en consecuencia al valor del caudal máximo teórico.

Entre 2007 y 2013 el subsistema se amplía con el sector S01-18, lo cual resulta no ser determinante en la capacidad de la red, debido a que el sector se encuentra en un sector más bajo y el diámetro instalado es adecuado para las necesidades del mismo; resulta ser una buena ampliación, pues no afecta en demasía a la curva de consigna ni al caudal máximo teórico.

El problema de la reducción de la capacidad de la red no es percibido cuando la red trabaja con suministro intermitente, debido a que se logra llegar con agua, aunque con presiones muy bajas, a todos los sectores; sin embargo, este problema será el principal responsable del suministro inequitativo.

## 10.5. Gestión de horarios de suministro

La gestión de horarios, permite mejorar el servicio intermitente a corto plazo con un coste mínimo. Por lo tanto, es una medida cuya implementación es recomendable para el proceso de transición a suministro continuo. Esta medida es más importante si el sistema no tiene posibilidades de tener suministro por veinticuatro horas.

Debido a que los caudales se incrementan en las horas donde existe mayor simultaneidad de uso, cuando 14 de los 15 sectores trabajan, la mejor opción para mejorar el sistema de suministro intermitente es la modificación del horario de suministro de algunos sectores, de tal forma que se obtenga una menor cantidad de sectores que trabajen en las mismas horas; así se logrará reducir el caudal máximo y, en consecuencia, las presiones y el servicio mejorarán.

En esta parte del caso de estudio, como resultado del proceso de gestión de horarios, se plantean escenarios para la reconfiguración de los horarios de suministro de algunos sectores.

### 10.5.1. Criterios para el proceso de optimización

Los criterios cuantitativos adoptados para la reorganización de horarios son normalizados: presión de servicio, número de usuarios y horas de suministro.

Tabla 10.28. Normalización criterio presión de servicio

Sector	Presión (mca)	$p'_i$	$p_i$
S01-05	40.03	1.67	0.005
S01-06	16.83	24.87	0.075

S01-07	19.44	22.26	0.067
S01-08	22.10	19.60	0.059
S01-10	20.06	21.64	0.065
S01-11	11.95	29.75	0.089
S01-09	30.02	11.68	0.035
S01-13	4.44	37.26	0.112
S01-14	15.56	26.14	0.079
S01-15	15.67	26.03	0.078
S01-16	0.00	41.70	0.125
S02	41.70	0.00	0.000
M02	26.12	15.58	0.047
S01-12	2.01	39.69	0.119
S01-18	26.77	14.93	0.045
<b>Total:</b>		<b>332.80</b>	<b>1.000</b>

Tabla 10.29. Normalización criterio número de usuarios

Sector	Número de usuarios	$l'_i$	$l_i$
S01-05	147	0.0068	0.164
S01-06	467	0.0021	0.052
S01-07	593	0.0017	0.041
S01-08	437	0.0023	0.055
S01-10	385	0.0026	0.063
S01-11	244	0.0041	0.099
S01-09	515	0.0019	0.047
S01-13	1065	0.0009	0.023
S01-14	276	0.0036	0.087
S01-15	211	0.0047	0.114
S01-16	918	0.0011	0.026
S02	575	0.0017	0.042
M02	237	0.0042	0.102
S01-12	1085	0.0009	0.022
S01-18	385	0.0026	0.063
<b>Total:</b>		<b>0.0414</b>	<b>1.000</b>

Tabla 10.30. Normalización criterio horas de suministro

Sector	Horas de suministro (h)	$r'_i$	$r_i$
S01-05	5	0.20	0.083
S01-06	5	0.20	0.083
S01-07	5	0.20	0.083
S01-08	5	0.20	0.083
S01-10	5	0.20	0.083
S01-11	5	0.20	0.083
S01-09	8	0.13	0.052

S01-13	8	0.13	0.052
S01-14	8	0.13	0.052
S01-15	8	0.13	0.052
S01-16	11	0.09	0.038
S02	12	0.08	0.035
M02	14	0.07	0.030
S01-12	5	0.20	0.083
S01-18	4	0.25	0.104
<b>Total:</b>		<b>2.40</b>	<b>1.000</b>

Para el cálculo del criterio cualitativo *facilidad en la operación del sector*, se utiliza AHP; de esta forma se obtiene el peso de cada uno de los sectores relacionados con su facilidad de operación. Como parte del proceso, se realizaron consultas al personal técnico de SeLA-Oruro (Gerente Técnico, Jefe de producción y Jefe de Operación y Mantenimiento), de esta forma se obtiene una matriz de comparación pareada y su vector propio correspondiente. Posteriormente, se determina la media geométrica de las opiniones del grupo homogéneo de expertos; de esta forma, se calcula el peso de cada uno de los sectores con respecto a este criterio.

Únicamente se presenta la matriz de comparación pareada del Experto 1; sin embargo, los vectores propios son reunidos en una tabla posterior.

Tabla 10.31. Matriz de comparación pareada del criterio *facilidad en la operación del sector*, Experto 1

	S01-05	S01-06	S01-07	S01-08	S01-10	S01-11	S01-09	S01-13	S01-14	S01-15	S01-16	S02	M02	S01-12	S01-18	Vector propio
S01-05	1	5	3	1	3	1	1	1	1	1	1	3	7	1	1	0.0915
S01-06	1/5	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3	1/3	1/3	1/3	5	5	1/3	1/3	0.0350
S01-07	1/3	3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	7	1/3	1/3	0.0317
S01-08	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	3	7	1	1	0.0786
S01-10	1/3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7	1	1	0.0698
S01-11	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	7	1	1	0.0736
S01-09	1	5	3	1	1	1	1	1	1	1	1	3	7	3	1	0.0895
S01-13	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	3	3	7	3	1	0.0922
S01-14	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	3	3	7	3	1	0.0922
S01-15	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	3	3	7	3	1	0.0922
S01-16	1	3	3	1	1	1	1	1/3	1/3	1/3	1	1	5	1	1/3	0.0572
S02	1/3	1/5	3	1/3	1	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	5	1	1/3	0.0405
M02	1/7	1/5	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	1	1/5	1/7	0.0100
S01-12	1	3	3	1	1	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	5	1	1/3	0.0535
S01-18	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	3	3	7	3	1	0.0922

CR 5.8%

El ratio de consistencia de todas las matrices de comparación pareadas es inferior al 10%.

Los vectores propios de cada uno de los expertos son:

Tabla 10.32. Vector propio de cada experto y ponderación de cada sector Criterio 4

Sector	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Media geométrica	e <sub>i</sub> Peso
S01-05	0.0915	0.0924	0.0904	0.0915	0.0915
S01-06	0.0350	0.0384	0.0313	0.0348	0.0348
S01-07	0.0317	0.0322	0.0317	0.0318	0.0318
S01-08	0.0786	0.0791	0.0791	0.0789	0.0789
S01-10	0.0698	0.0701	0.0703	0.0701	0.0701
S01-11	0.0736	0.0739	0.0740	0.0738	0.0738
S01-09	0.0895	0.0862	0.0922	0.0893	0.0893
S01-13	0.0922	0.0929	0.0923	0.0925	0.0925
S01-14	0.0922	0.0929	0.0962	0.0938	0.0938
S01-15	0.0922	0.0929	0.0923	0.0925	0.0925
S01-16	0.0572	0.0542	0.0533	0.0549	0.0549
S02	0.0405	0.0417	0.0412	0.0411	0.0411
M02	0.0100	0.0097	0.0107	0.0101	0.0101
S01-12	0.0535	0.0577	0.0526	0.0546	0.0546
S01-18	0.0922	0.0858	0.0923	0.0901	0.0901
<b>Total:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

### 10.5.2. Ponderación de criterios

El peso de cada uno de los criterios también es calculado utilizando la metodología AHP; posteriormente este peso es multiplicado por cada uno de los valores normalizados ya calculados.

Experto 1:

Tabla 10.33. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 1

	Presión	Clientes	Horas	Operación	Vector propio
<b>Presión</b>	1	1	1	1/3	0.1581
<b>Clientes</b>	1	1	1	1/3	0.1581
<b>Horas</b>	1	1	1	1/5	0.1401
<b>Operación</b>	3	3	5	1	0.5437

CR 1.2%

Experto 2:

Tabla 10.34. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 2

	Presión	Clientes	Horas	Operación	Vector propio
<b>Presión</b>	1	1	3	1/3	0.2098
<b>Clientes</b>	1	1	1	1/3	0.1579
<b>Horas</b>	1/3	1	1	1/5	0.1069
<b>Operación</b>	3	3	5	1	0.5255

CR 4.4%

Experto 3:

Tabla 10.35. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 3

	Presión	Clientes	Horas	Operación	Vector propio
Presión	1	1	3	1/5	0.1684
Clientes	1	1	3	1/3	0.1869
Horas	1/3	1/3	1	1/5	0.0746
Operación	5	3	5	1	0.5700

CR 4.3%

Con la opinión de los expertos se calcula la media geométrica (Delgado-Galván et al., 2014); posteriormente, este valor es normalizado y multiplicado por el total de sectores, con el fin de incrementar el peso de los criterios en la función objetivo.

Tabla 10.36. Vector propio de cada experto y ponderación para cada criterio

Criterio	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Media geométrica	Peso normalizado	Peso
Presión	0.1581	0.2098	0.1684	0.1774	0.1784	$wp'=2.6765$
Clientes	0.1581	0.1579	0.1869	0.1671	0.1680	$wc'=2.5203$
Horas	0.1401	0.1069	0.0746	0.1038	0.1043	$wh'=1.5651$
Operación	0.5437	0.5255	0.5700	0.5461	0.5492	$wo'=8.2380$
Total	1	1	1	0.994	1	15

### 10.5.3. Cálculo de los factores por criterio para la optimización

Multiplicando el peso de cada criterio por cada una de las variables, se obtienen los factores que ingresan a la función objetivo de cada criterio para cada sector.

Tabla 10.37. Factores o pesos de cada uno de los sectores según cada criterio

Sector	Presión $Wp$	Usuarios $Wc$	Horas $Wh$	Operación $Wo$
S01-05	0.013	0.414	0.131	0.754
S01-06	0.200	0.130	0.131	0.287
S01-07	0.179	0.103	0.131	0.262
S01-08	0.158	0.139	0.131	0.650
S01-10	0.174	0.158	0.131	0.577
S01-11	0.239	0.249	0.131	0.609
S01-09	0.094	0.118	0.082	0.736
S01-13	0.300	0.057	0.082	0.762
S01-14	0.210	0.220	0.082	0.773
S01-15	0.209	0.288	0.082	0.762
S01-16	0.335	0.066	0.059	0.452
S02	0.000	0.106	0.054	0.339
M02	0.125	0.257	0.047	0.083
S01-12	0.319	0.056	0.131	0.450
S01-18	0.120	0.158	0.163	0.742
<b>Total</b>	<b>2.676</b>	<b>2.520</b>	<b>1.565</b>	<b>8.238</b>

### 10.5.4. Elección del sector que modificará su horario

A continuación, se describen los componentes del modelo utilizado para el proceso de optimización, considerando una restricción de salida del depósito de 350 m<sup>3</sup>.

La matriz de variables binarias  $V$ ,  $m \times n$ , es resultado del proceso optimización; esta matriz solamente muestra la hora de inicio del suministro de agua en cada sector adoptando un valor de 1; en caso contrario corresponde un valor de 0. Cada uno de los sectores debe tener un solo periodo de suministro por día, lo cual corresponde a una de las restricciones.

Tabla 10.38. Matriz  $V$ , resultado de la optimización

Hora	S01-05	S01-06	S01-07	S01-08	S01-10	S01-11	S01-09	S01-13	S01-14	S01-15	S01-16	S02	M02	S01-12	S01-18
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
22	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
$\sum v$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Para facilitar la creación de los periodos de suministro, se tienen a las matrices circulantes  $U$  para cada uno de los sectores, por ejemplo el sector S01-05 tiene 5 horas de suministro en 24 horas. Esta matriz se multiplica por la primera fila de la matriz  $V$  dando como resultado un vector  $X$  que representa el horario de suministro del sector:

Tabla 10.39. Matriz U del sector S01-05, para m=24 y h=5

Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	X <sub>i</sub>
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
21	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
22	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
23	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
24	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Como puede apreciarse, el vector binario resultante muestra que el valor 1 se repite 5 veces, el total de horas de suministro del sector; también se observa que el periodo comienza a la hora que indica la matriz de variables. De esta forma se tienen los vectores X para cada uno de los sectores; estos valores son utilizados como base de la función objetivo:

Tabla 10.40. Vector X de cada sector.

Hora	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>	Total
	S01-05	S01-06	S01-07	S01-08	S01-10	S01-11	S01-09	S01-13	S01-14	S01-15	S01-16	S02	M02	S01-12	S01-18	
1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	8
2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	7
3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	7
4	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	7
5	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	12
6	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	12
7	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	12
8	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	8
9	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	8
10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	4

<b>22</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	6
<b>23</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	6
<b>24</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	

La suma total de sectores trabajando a una hora determinada debe ser inferior a la restricción definida en el problema de optimización, en este caso  $SS = 15$ .

Es necesario calcular los bloques de suministro, por lo tanto a partir del volumen diario suministrado al sector y el número de horas de suministro calculamos  $V_{Sj}$  de cada sector.

Tabla 10.41. Volumen por hora que ingresa a cada sector

Sector	$Vd_j$ (m <sup>3</sup> /d)	$h_j$	$V_{Sj}$ (m <sup>3</sup> /h)
S01-05	75.99	5	15.20
S01-06	230.46	5	46.09
S01-07	342.86	5	68.57
S01-08	182.08	5	36.42
S01-10	139.65	5	27.93
S01-11	110.10	5	22.02
S01-09	196.03	8	24.50
S01-13	341.32	8	42.67
S01-14	91.70	8	11.46
S01-15	89.54	8	11.19
S01-16	184.46	11	16.77
S02	292.88	12	24.41
M02	142.18	14	10.16
S01-12	590.97	5	118.19
S01-18	168.62	4	42.16

Multiplicando los valores del vector  $V_s$  por cada uno de los vectores columna  $X$ , se obtienen los vectores  $M$  que permiten definir la curva de suministro.

Tabla 10.42. Vector  $M$  de cada sector

	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$M_8$	$M_9$	$M_{10}$	$M_{11}$	$M_{12}$	$M_{13}$	$M_{14}$	$M_{15}$	Total
Hora	S01-05	S01-06	S01-07	S01-08	S01-10	S01-11	S01-09	S01-13	S01-14	S01-15	S01-16	S02	M02	S01-12	S01-18	
1	0	0	0	0	0	0	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	118.19	0	259.35
2	0	0	0	0	0	0	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	0	141.16
3	0	0	0	0	0	0	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	0	141.16
4	0	0	0	0	0	0	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	0	141.16
5	15.20	46.09	0	36.42	27.93	22.02	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	0	288.81
6	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	24.50	0	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	0	314.72
7	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	24.50	0	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0	0	314.72
8	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	0	0	0	0	0	24.41	10.16	0	0	250.79
9	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	0	0	0	0	0	24.41	10.16	0	0	250.79
10	0	0	68.57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10.16	0	0	78.73
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.77	0	10.16	118.19	42.16	187.27
22	0	0	0	0	0	0	0	42.67	0	0	16.77	24.41	10.16	118.19	42.16	254.35
23	0	0	0	0	0	0	0	42.67	0	0	16.77	24.41	10.16	118.19	42.16	254.35
24	0	0	0	0	0	0	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	118.19	42.16	301.50
<b>Total:</b>	<b>75.99</b>	<b>230.46</b>	<b>342.86</b>	<b>182.08</b>	<b>139.65</b>	<b>110.1</b>	<b>196.03</b>	<b>341.32</b>	<b>91.7</b>	<b>89.54</b>	<b>184.46</b>	<b>292.88</b>	<b>142.18</b>	<b>590.97</b>	<b>168.62</b>	<b>3178.84</b>

El volumen total por hora se constituye en otra restricción del problema de optimización; en este escenario  $VS = 350 \text{ m}^3/\text{h}$ . Esta es una de las restricciones más importante en el modelo.

El horario de suministro actual es priorizado, para este fin se tiene a la matriz  $S$ , donde se representa con 1 la hora con suministro y con 0 la hora sin suministro.

Tabla 10.43. Matriz  $S$  para priorizar el horario de suministro actual

	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	$S_9$	$S_{10}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{14}$	$S_{15}$
Hora	S01-05	S01-06	S01-07	S01-08	S01-10	S01-11	S01-09	S01-13	S01-14	S01-15	S01-16	S02	M02	S01-12	S01-18
1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
8	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
9	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
24	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1

Estos elementos configuran el problema de optimización. En base a las restricciones ya definidas se establece la reorganización de los horarios de suministro.

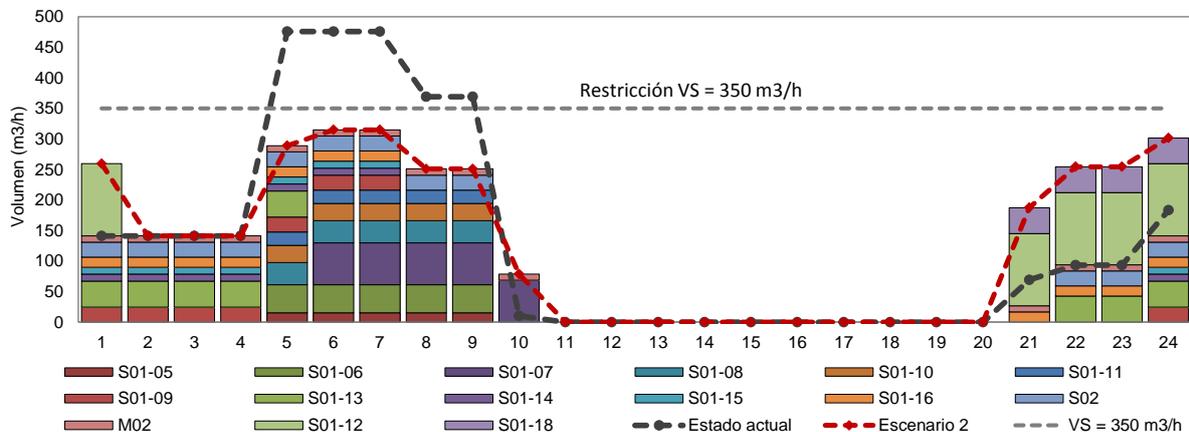


Fig. 10.41. Reorganización de horarios en base a la restricción  $VS=350 \text{ m}^3/\text{h}$

En la tabla 10.44, se muestra el nuevo horario de suministro para toda la red, donde se modificaron los horarios de tres sectores (pintados de rojo).

Tabla 10.44. Reorganización de horarios en base a la restricción  $VS=350 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $Q_{\text{máxh}}=87.42 \text{ l/s}$ )

Sector	Hora																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
S01-05																									
S01-06																									
S01-07																									
S01-08																									
S01-10																									
S01-11																									
S01-09																									
S01-13																									
S01-14																									
S01-15																									
S01-16																									
S02																									
M02																									
S01-12																									
S01-18																									

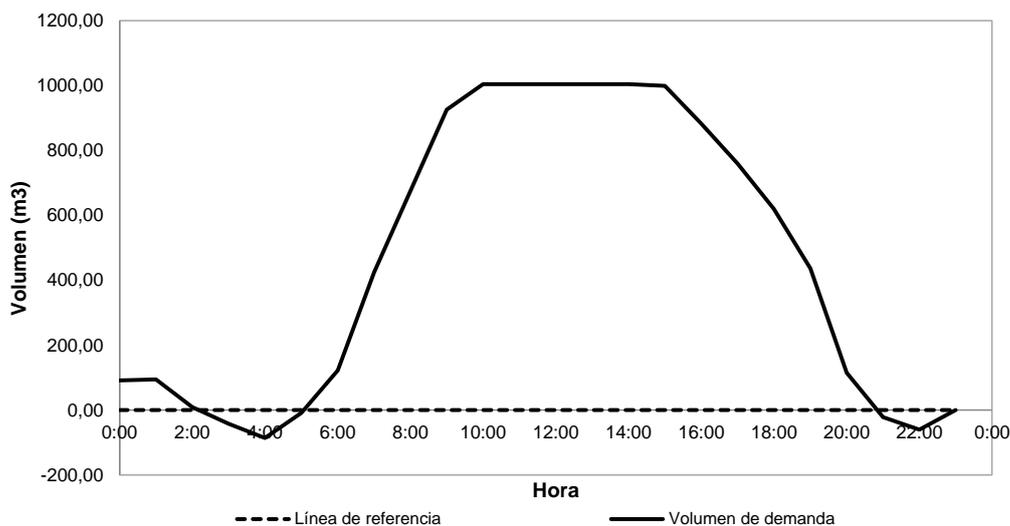


Fig. 10.42. Cálculo del volumen de regulación en el depósito para el nuevo horario de suministro

Cuanto menor sea la restricción de salida del depósito o volumen máximo de suministro, mayor es el número de sectores que modifican su horario. Esta reacomodación modifica tanto los niveles de agua como el volumen de regulación en el depósito; en este caso se alcanza a un volumen de 1090.86 m3, muy inferior a los 1800 del depósito.

De esta forma, se pueden generar varios escenarios para que la empresa de agua seleccione el más conveniente. Cada escenario es definido en función de las restricciones, en nuestro caso limitando el volumen de salida del depósito; los escenarios reducen cada vez más el caudal pico de la curva de suministro. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 10.45. Escenarios para diferentes restricciones

Esce- nario	VS (m <sup>3</sup> )	SS	VS calculado (m <sup>3</sup> )	Caudal máximo (l/s)	Volumen de regulación (m <sup>3</sup> )	SS calculado	Sectores que modifican su horario de suministro	Descripción de los sectores
Actual	500	15	475.58	132.10	1767.15	14	0	-
1	450	15	357.38	99.27	1539.18	13	1	S01-12 (20:00 a 1:00)
2	350	15	314.72	87.42	1090.86	12	3	S01-07 (5:00 a 10:00), S01-13 (21:00 a 5:00), S01-12 (20:00 a 1:00)
3	300	15	288.81	80.23	748.00	11	3	S01-07 (20:00 a 1:00), S01-13 (21:00 a 5:00), S01-12 (16:00 a 21:00)
4	250	15	246.15	68.38	1296.30	11	3	S01-07 (18:00 a 23:00), S01-13 (20:00 a 4:00), S01-12 (9:00 a 14:00)
5	200	15	183.31	55.39	816.80	9	8	S01-06 (7:00 a 12:00), S01-07 (0:00 a 5:00), S01-08 (5:00 a 10:00), S01-10 (5:00 a 10:00), S01-11 (5:00 a 10:00), S01-09 (21:00 a 5:00), S01-13 (16:00 a 0:00), S01-12 (15:00 a 20:00)
6	150	15	147.44	40.96	1196.74	7	11	S01-06 (5:00 a 10:00), S01-07 (15:00 a 20:00), S01-08 (16:00 a 21:00), S01-10 (7:00 a 12:00), S01-11 (5:00 a 10:00), S01-09 (20:00 a 4:00), S01-13 (21:00 a 5:00), S01-15 (21:00 a 5:00), S02 (22:00 a 10:00), S01-12 (10:00 a 15:00), S01-18 (18:00 a 22:00)

Se puede observar como mejora la situación restringiendo cada vez más el volumen de salida del depósito. El modelo va eligiendo los sectores que deben modificar su horario y los mueve al horario óptimo, reduciendo de esta forma el caudal pico que es característico de los sistemas de suministro intermitente.

La reorganización de los sectores lleva a la curva de suministro a una tendencia horizontal, con lo cual se tiene una mayor cantidad de sectores que modifican su horario.

### 10.5.5. Verificación hidráulica

Es recomendable realizar la verificación hidráulica tras el proceso de optimización, con el fin de cuantificar las mejoras, debido a que la reducción del caudal pico de la curva de suministro mejorará las condiciones de servicio.

Se calculan las presiones y demandas en las horas pico de cada uno de los escenarios propuestos. Se observa que tanto presiones como caudales van mejorando a medida que se reduce el caudal pico y se optimizan los horarios de suministro (ver tablas 10.46 y 10.47). Los sectores que no tienen suministro en la hora pico no son incluidos en el cálculo hidráulico, lo cual es indicado con un guión.

Tabla 10.46. Cálculo de la presión (mca) en la hora pico de los escenarios propuestos

Sector	Actual PDD	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
S01-05	40.03	39.71	40.59	43.60	45.19	46.62	48.82
S01-06	16.83	19.22	22.06	25.17	26.23	-	35.99
S01-07	19.44	19.77	20.42	-	-	-	-
S01-08	22.10	24.51	26.54	30.17	31.42	33.49	-
S01-10	20.06	23.83	26.64	30.23	31.37	33.63	-
S01-11	11.95	14.68	16.40	18.60	19.28	20.65	28.26
S01-09	30.02	29.33	29.81	31.44	33.09	-	-
S01-13	4.44	6.43	-	-	-	-	-
S01-14	15.56	19.21	21.93	25.40	26.49	28.64	41.07
S01-15	15.67	20.01	22.50	25.67	26.66	28.62	-
S01-16	0.00	0.17	2.10	4.53	5.30	6.86	15.22
S02	41.70	40.87	41.47	43.12	44.77	47.04	48.80
M02	26.12	28.94	31.31	35.50	36.74	38.81	50.21
S01-12	2.01	-	-	-	-	-	-

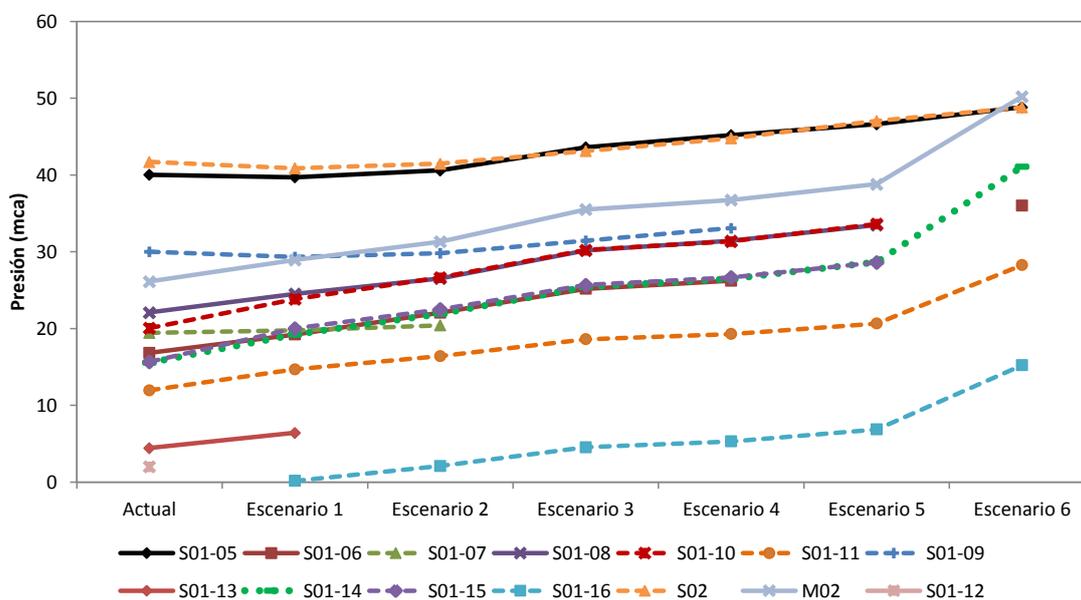


Fig. 10.43. Cálculo de la presión (mca) en la hora pico de los escenarios propuestos

Debido al uso de la demanda dependiente de la presión, el caudal suministrado por la red tenderá a incrementarse según vaya reduciendo el caudal pico de la curva de suministro.

Tabla 10.47. Cálculo de caudales de suministro (l/s) en la hora pico de los escenarios propuestos

Sector	Datos	Actual PDD	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
S01-05	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49
S01-06	16.64	12.49	13.35	14.30	15.27	15.59	-	16.64
S01-07	24.76	19.97	20.14	20.47	-	-	-	-
S01-08	13.15	11.31	11.91	12.39	13.15	13.15	13.15	-
S01-10	10.09	8.27	9.01	9.53	10.09	10.09	10.09	-
S01-11	7.95	5.03	5.57	5.89	6.27	6.39	6.61	7.73
S01-09	8.85	8.85	8.77	8.84	8.85	8.85	-	-

S01-13	15.41	5.94	7.15	-	-	-	-	-
S01-14	4.14	2.99	3.32	3.55	3.82	3.90	4.05	4.14
S01-15	4.04	2.93	3.31	3.51	3.74	3.82	3.95	-
S01-16	6.06	0.00	0.46	1.60	2.36	2.55	2.90	4.33
S02	8.81	8.81	8.81	8.81	8.81	8.81	8.81	8.81
M02	3.67	3.43	3.61	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67
S01-12	42.68	11.06	-	-	-	-	-	-
S01-18	15.22	0.00	-	-	-	-	-	-

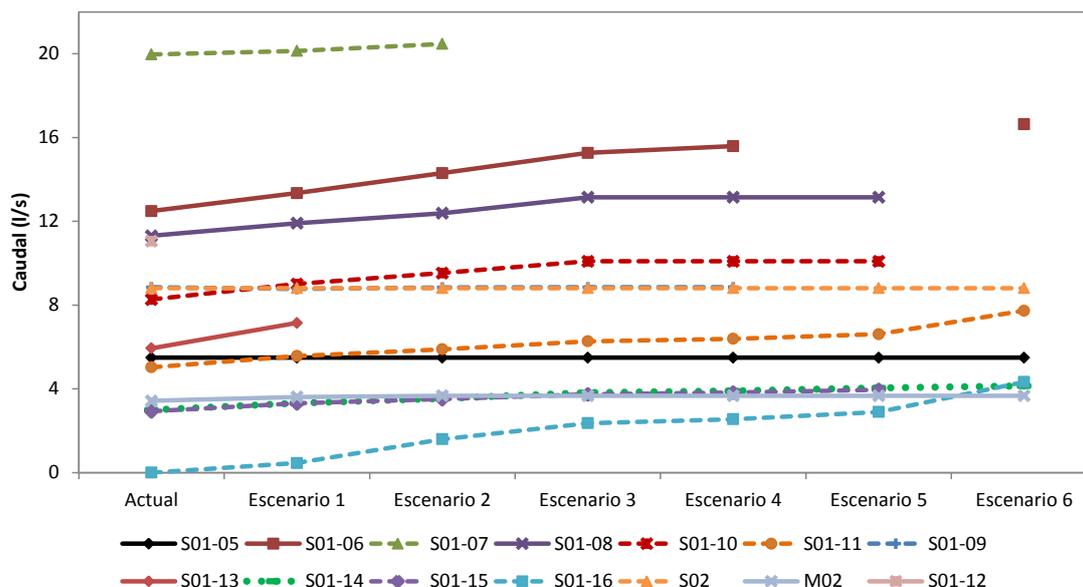


Fig. 10.44. Cálculo de caudales de suministro (l/s) en la hora pico de los escenarios propuestos

## 10.6. Ampliación de la capacidad de la red

Como se observó en anteriores acápites, la red del subsistema de la zona sur de Oruro no tiene capacidad suficiente para suministrar agua de forma continua. Por lo tanto, es necesario ampliar la capacidad de la red. Para este objetivo, se parte de una estimación del nivel de fugas que se alcanzará en suministro continuo, pues de este dependerá el nivel de presión que se conseguirá en este estado, y del presupuesto con el que cuenta la empresa de agua, tanto para las acciones de mejora de la infraestructura, como para las acciones de control activo de fugas. Con esta información es posible plantear las etapas de mejora a través del algoritmo voraz propuesto en el capítulo 8.

### 10.6.1. Información disponible del suministro intermitente y presupuesto

Tras el diagnóstico del sistema intermitente, se conoce que el caudal máximo requerido ( $Q_{máx}$ ) actual es de 91.98 l/s, el porcentaje de fugas alcanzado ( $f_i$ ) es de 11.95%, la presión ponderada en suministro intermitente ( $P_i$ ) es de 15.39 mca, y el sistema entrega agua a los usuarios por un tiempo ( $h_{int}$ ) de 7.32 horas al día.

El monto disponible por año para la ejecución del proceso de ampliación de la capacidad de la red es de Bs. 600,000.00 (seiscientos mil bolivianos) (76,739.50 €). Como se sabe, el proceso de transición es generador de pérdidas de agua potencial; por lo tanto, la empresa de agua debe

comprometer un presupuesto anual para destinar al control activo de fugas; este presupuesto es Bs. 350 000.00 (trescientos cincuenta mil bolivianos).

Con relación a la información necesaria para realizar el control activo de fugas, se conoce que el coste medio de agua (*CMA*) es de Bs. 5, y la empresa de agua dispone de Bs 30.11 por acometida como coste por inspección por acometida; por lo tanto, el coste de inspección (*CI*) asciende a Bs. 227,037.42.

### 10.6.2. Costes unitarios para sustitución de tramos

Los costes unitarios que incluyen todos los elementos necesarios para la sustitución de tramos en función del diámetro de instalación, para el proceso de selección y ampliación de tramos de la red son los de la tabla 10.48 y figura 10.45.

Tabla 10.48. Costes unitarios de los tramos a sustituir, por diámetro

Diámetro (mm)	Coste unitario Bs./m
75	385.02
100	399.66
150	442.46
200	502.93
250	608.39
300	703.17
350	832.61
400	1030.54
500	1371.51

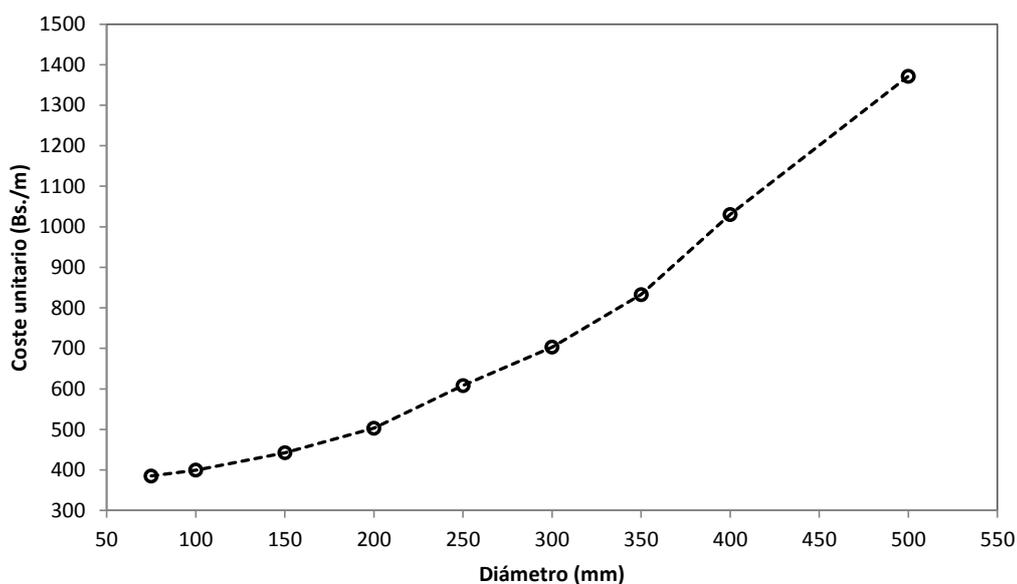


Fig. 10.45. Costes unitarios de los tramos a sustituirse, por diámetro.

### 10.6.3. Cálculo de la presión en suministro continuo

Se busca reducir el porcentaje de fugas en suministro continuo, tras la transición, por lo menos al nivel actual del suministro intermitente (11.95%). Es necesario asumir el tiempo que durará el proceso de transición ( $T_t$ ); para el presente caso de estudio se asumen 3 años; en caso de tener dificultades o necesitar mayor cantidad de años para el proceso de ampliación de la capacidad de la red este valor puede ser replanteado.

En base a la información del sistema trabajando en intermitencia y los recursos disponibles para realizar las inspecciones anuales que el control activo de fugas requiere, utilizando la ecuación 6.34 es posible calcular el porcentaje de fugas que se producirá en suministro continuo.

$$V_{maxri} = 91.98 \frac{l}{s} \cdot \frac{86400 s}{1 día} \cdot \frac{1 m^3}{1000 l} = 7947.07 \frac{m^3}{día}, \quad (10.14)$$

$$V_{di} = \frac{7947.07}{1+0.1195} = 7098.77 \frac{m^3}{día}, \quad (10.15)$$

$$f_c = f_0 + \frac{0.789 \cdot CAI^2 \cdot T_t}{144 \cdot CI \cdot CMA \cdot D_{ic} \cdot V_{di}}, \quad (10.16)$$

$$f_c = 0.1195 + \frac{0.789 \cdot 350000^2 \cdot 3}{144 \cdot 227032.42 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 7098.77} = 0.3694. \quad (10.17)$$

Con los recursos dispuestos por la empresa de agua se pueden controlar niveles de fugas de hasta 36.94%; este porcentaje no puede ser superado; por lo tanto, el nivel de mejora en la presión debe estar relacionado con este nivel de fugas. El porcentaje hallado es inferior al 40%, nivel frecuente en sistemas con suministro continuo (Araujo et al., 2006). Para el cálculo de la presión en suministro continuo se utiliza la relación definida en el capítulo 8:

$$\bar{P}_c \approx D_{ic} \cdot \frac{f_c}{f_i} \cdot \left( \frac{1-f_i}{1-f_c} \right) \cdot \frac{\bar{P}_i \cdot h_{int}}{24}, \quad (10.18)$$

$$\bar{P}_c \approx 1 \cdot \frac{0.3694}{0.1195} \cdot \left( \frac{1-0.1195}{1-0.3694} \right) \cdot \frac{15.39 \cdot 7.32}{24} = 20.26 mca. \quad (10.19)$$

El incremento del nivel de fugas permite incrementar la presión tras el proceso de transición, de 15.37 mca en suministro intermitente a 20.26 mca.

Se adopta una presión de servicio en suministro continuo de 20 mca. La determinación de esta presión es muy importante para el proceso de ampliación de la capacidad de la red y el proceso de transición a suministro continuo, pues es una referencia para el cálculo de la curva de consigna. Es importante también porque garantiza un buen servicio a la población, además de limitar las pérdidas de agua a un nivel que puede ser controlado por la empresa de agua.

### 10.6.4. Identificación de cuellos de botella en la red

En base a la información del subsistema y los criterios de diseño ya definidos, se procede con la definición de las etapas de ampliación de la capacidad de la red. Uno de los primeros aspectos a destacar del método propuesto es la posibilidad de identificar los cuellos de botella en la red.

Cuando se realiza el cambio por tramos de mayor diámetro, el caudal máximo teórico de la red se va incrementando; este incremento es más notorio en algunos tramos como en P-1, P-2, P-3, P-4, P-11, P-13, lo es aún más en las tuberías P-12 y P-17; estos tramos son los más representativos de la red e indican posibles “cuellos de botella”, que puede tener la red para la ampliación, por lo que cualquier acción de ampliación de la misma debe pasar por ellos. En los tramos restantes, la ampliación de su diámetro produce incrementos mínimos a la capacidad de la red, por lo que su importancia en el incremento de la capacidad de la red es mínima. Asimismo, en los tramos representativos de la red, con las primeras modificaciones del diámetro, se produce un incremento considerable de la capacidad de la red; los incrementos de diámetro siguientes no producen el mismo efecto; por el contrario, la curva tiende a un comportamiento asintótico (Fig. 10.46).

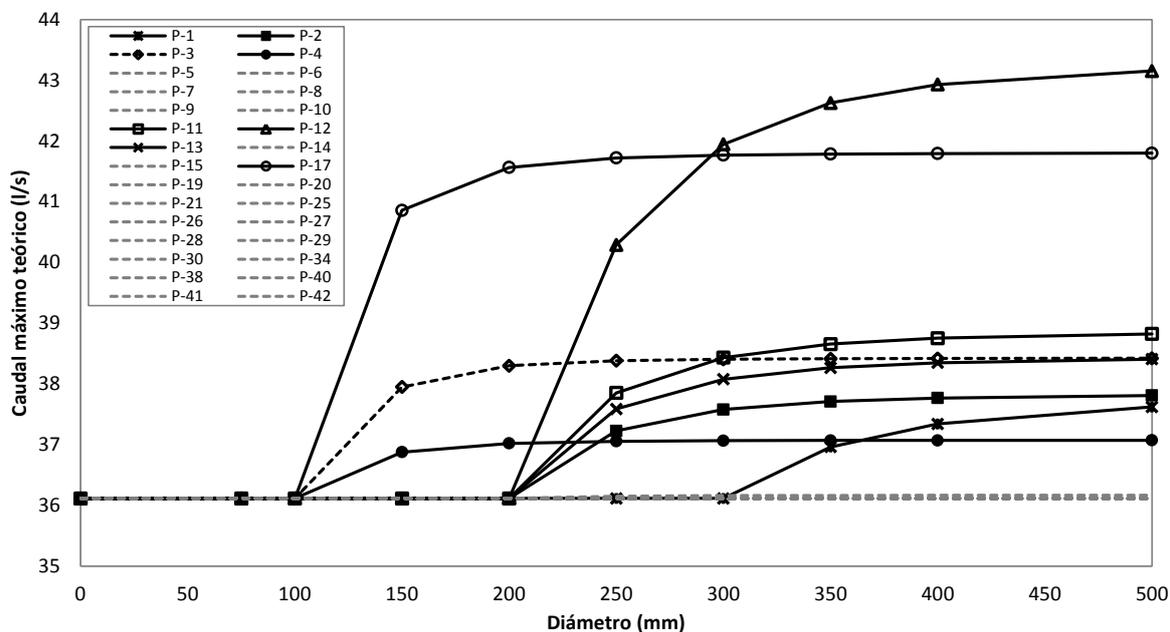


Fig. 10.46. Incremento de la capacidad de la red en base a la modificación del diámetro en los tramos

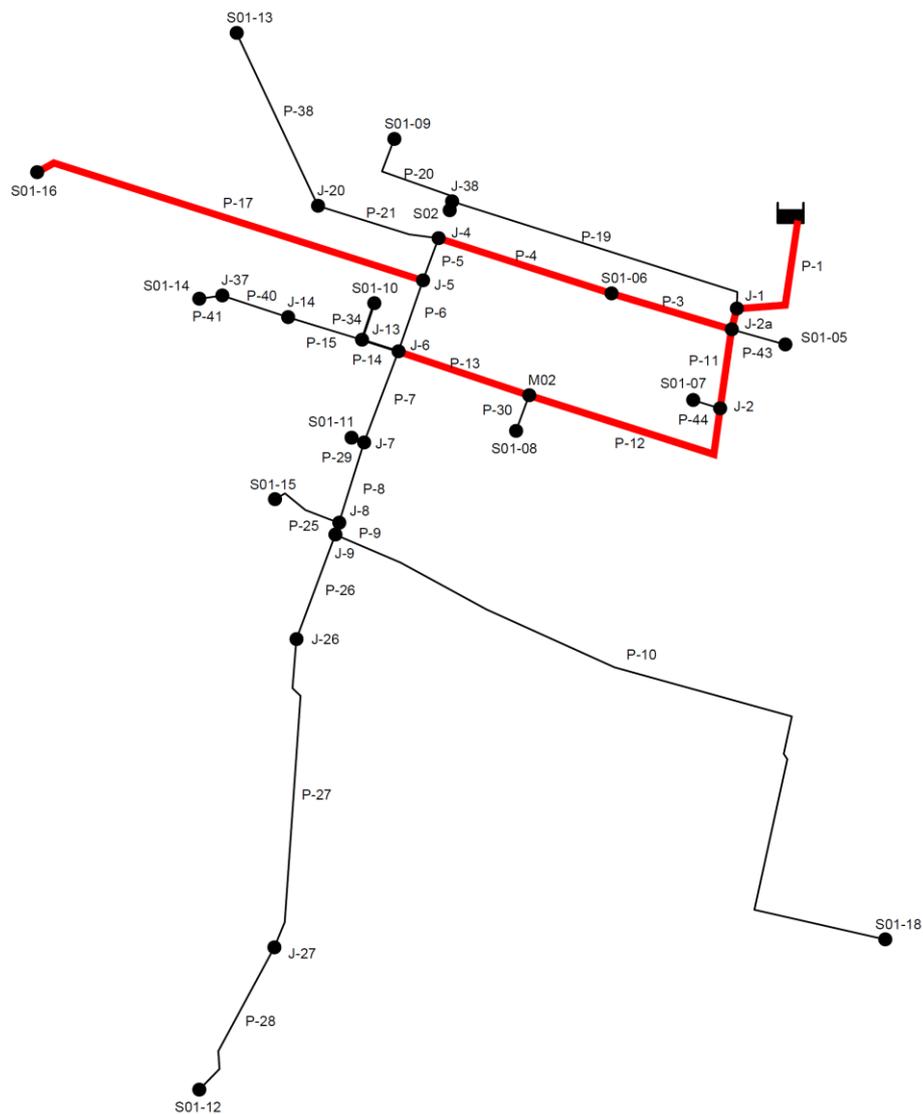


Fig. 10.47. Identificación de tramos cuello de botella de la red actual

### 10.6.5. Etapas para la ampliación de la capacidad de la red

El algoritmo propuesto para el proceso de ampliación de la capacidad de la red permite obtener un conjunto de tramos, seleccionados en base a un índice de ampliación  $q$ , con el cual se establece un orden de prioridades en el reemplazo de tuberías, definiendo de esta forma cada una de las etapas de ampliación.

Para la selección del tramo con el diámetro respectivo, se requiere incorporar el coste del reemplazo o renovación del tramo, por lo que se necesita el coste unitario por cada diámetro y la longitud de cada tramo; de esta forma, se calcula el índice de ampliación de cada una de las posibilidades, eligiendo el de mayor valor. En la tabla 10.49, para  $n = 2$ , se observa que el tramo que presenta el mayor incremento de la capacidad de la red al menor coste es el tramo P-12, reemplazado por un tramo de diámetro de 350 mm.

Tabla 10.49. Valores de  $q \cdot 10^3$  ( $n=2$ ), para la selección del tramo y el diámetro

Tubería	Diámetro								
	75 mm	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm	300 mm	350 mm	400 mm	500 mm
P-1							0.00205	0.00348	0.00395
P-2					0.02470	0.03706	0.03724	0.03227	0.02549
P-3			0.02146	0.02678	0.02383	0.02108	0.01794	0.01455	0.01095
P-4			0.00256	0.00319	0.00284	0.00251	0.00213	0.00173	0.00130
P-5				0	0	0	0	0	0
P-6					0	0	0	0	0
P-7					0	0	0	0	0
P-8					0	0	0	0	0
P-9					0	0	0	0	0
P-10				0	0	0	0	0	0
P-11					0.02167	0.03340	0.03389	0.02950	0.02336
P-12					0.04241	0.07163	<b>0.07540</b>	0.06674	0.05349
P-13					0.00915	0.01408	0.01428	0.01243	0.00984
P-14					0	0	0	0	0
P-15					0	0	0	0	0
P-17			0.04401	0.05108	0.04469	0.03933	0.03342	0.02707	0.02038
P-19					0	0	0	0	0
P-20			0	0	0	0	0	0	0
P-21			0	0	0	0	0	0	0
P-25		0	0	0	0	0	0	0	0
P-26					0	0	0	0	0
P-27				0	0	0	0	0	0
P-28				0	0	0	0	0	0
P-29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P-30			0	0	0	0	0	0	0
P-34				0	0	0	0	0	0
P-38							0	0	0
P-40					0	0	0	0	0
P-41		0	0	0	0	0	0	0	0
P-42					0	0	0	0	0
P-43			0	0	0	0	0	0	0
P-44		0	0	0	0	0	0	0	0

La curva de consigna del sistema se va modificando hasta alcanzar y superar al caudal máximo requerido; ésta reduce su pendiente y, en consecuencia, la red gana mayor capacidad. Usando  $q$  con  $n=2$ , para lograr el coste mínimo de inversión total se requiere de la sustitución de cinco tramos de la red, priorizados según un orden para llegar gradualmente a un suministro continuo.

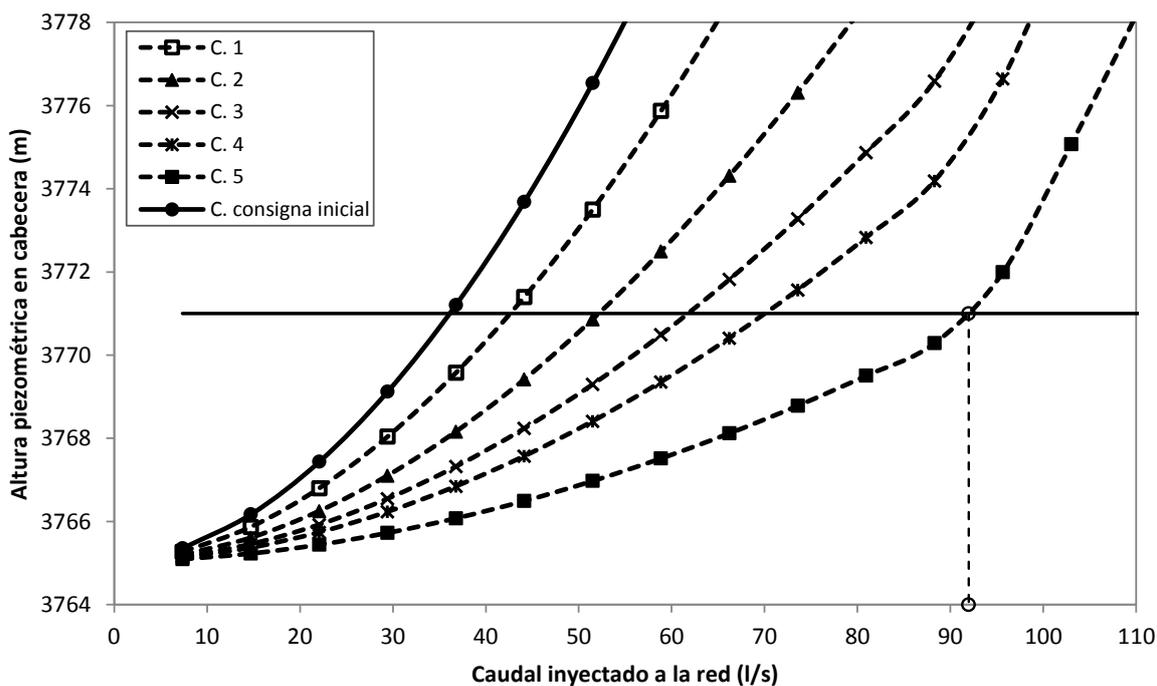


Fig. 10.48. Evolución de la curva de consigna en el proceso de ampliación

El orden de priorización en la sustitución de tramos es el siguiente:

Tabla 10.50. Orden de priorización de tramos a sustituir

Nº	$q_{m\acute{a}x}$ ( $n=2$ )	Tramo sustituido	Diámetro nuevo (mm)	$Q_{m\acute{a}x}$ (l/s)	Longitud (m)	Coste unitario (Bs/m)	Coste tramo (Bs)	Coste acumulado (Bs)
1	0.07540	P-12	350	42.63	675.35	832.61	562303.90	562303.90
2	0.15582	P-17	200	52.14	1155.76	502.93	581264.92	1143568.83
3	0.48497	P-11	350	61.76	229.08	832.61	190736.95	1334305.77
4	1.00235	P-2	350	70.04	82.07	832.61	68333.76	1402639.54
5	1.95625	P-13	300	93.18	389.39	703.17	273805.24	1676444.78

Se comprobó el proceso de ampliación para  $n=1$ ,  $n=2$  y  $n=3$ . Dependiendo del caudal máximo requerido al que se quiera llegar, conviene el uso de uno u otro indicador (Tabla 10.51 y Fig. 10.49). El uso del indicador con un exponente superior a 1 permite llegar a costes menores cuando el caudal de ampliación es mayor; sin embargo, cuando el caudal máximo requerido es menor, puede usarse  $n = 1$ . De todas formas, es bueno realizar la comparación entre indicadores.

Tabla 10.51. Comparación del coste acumulado en función del índice de ampliación

Nº	$Q_{m\acute{a}x}$ (l/s)	Coste acumulado, en base a $q$ , $n = 1$ (Bs)	$Q_{m\acute{a}x}$ (l/s)	Coste acumulado, en base a $q$ , $n = 2$ (Bs)	$Q_{m\acute{a}x}$ (l/s)	Coste acumulado, en base a $q$ , $n = 3$ (Bs)
1	37.58	57710.40	42.63	562303.90	42.63	562303.90
2	40.19	218794.82	52.14	1143568.83	52.14	1143568.83

3	49.23	693681.30	61.76	1334305.77	61.76	1334305.77
4	65.27	1274946.22	70.04	1402639.54	79.26	1658513.27
5	83.22	1548751.47	93.18	<b>1676444.78</b>	93.73	1716223.66
6	92.80	1897857.67	-	-	-	-

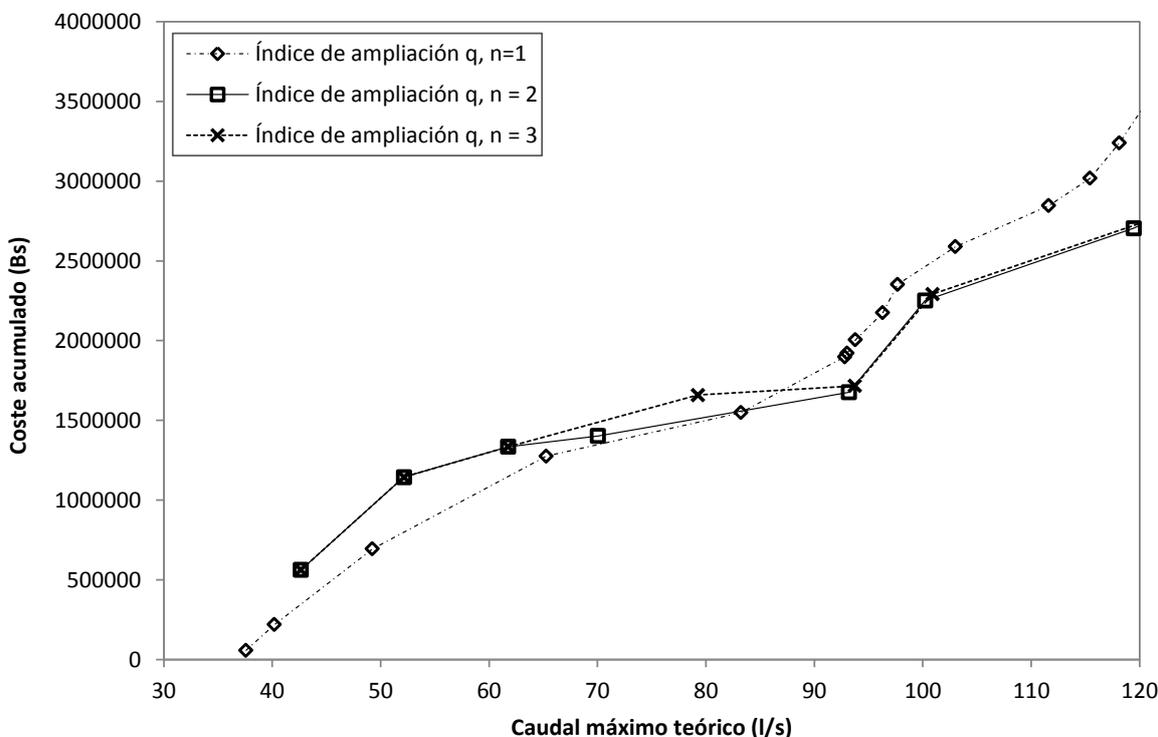


Fig. 10.49. Comparación del coste acumulado en función del índice de ampliación

El uso de  $n$  superior a 1 permite que el proceso empiece con la sustitución usando diámetros grandes, generando un mayor coste inicial; lo cual es compensado en etapas posteriores debido a que existen mayores posibilidades de aumentar el caudal con el reemplazo de tramos de menor diámetro.

Para llegar al caudal máximo requerido de 91.98 l/s, el menor coste es el que produce el indicador  $q$  para  $n = 2$ . Definida la priorización, se constituyen tres etapas de inversión (Tabla 10.52 y Fig. 10.50), limitadas por el presupuesto disponible.

Tabla 10.52. Etapas del proceso de ampliación de la capacidad de la red

Nº	$q_{máx}$ ( $n=2$ )	Tramo sustituido	Coste tramo (Bs)	Coste etapa (Bs)	$Q_{máx}$ incrementado (l/s)
1	0.07540	P-12	562303.90	562303.90	6.51
2	0.15582	P-17	581264.92	581264.92	9.52
3	0.48497	P-11	190736.95	532875.95	41.04
	1.00235	P-2	68333.76		
	1.95625	P-13	273805.24		
Total:				1676444.78	57.07

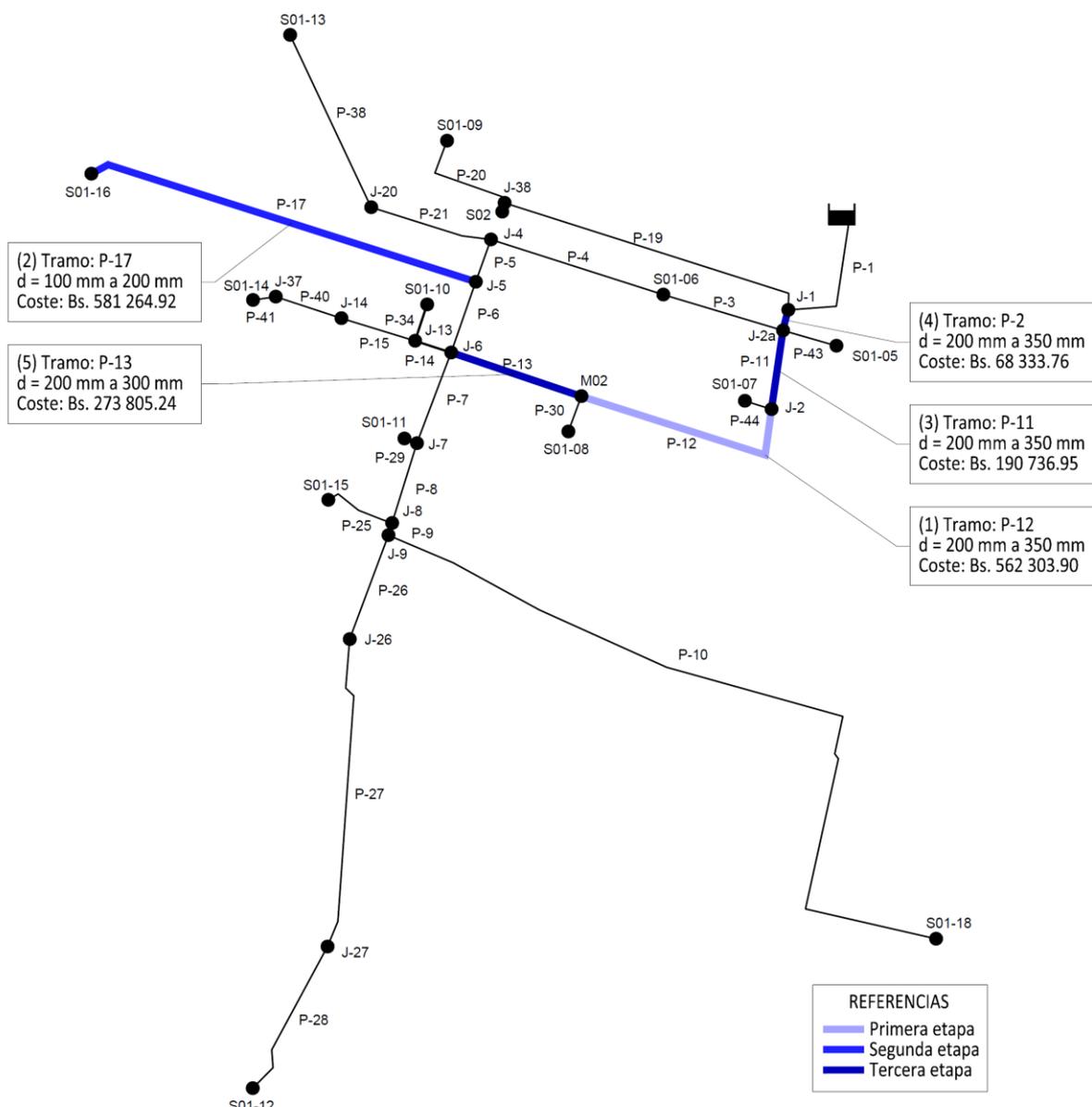


Fig. 10.50. Etapas del proceso de ampliación de la capacidad de la red

Las tres etapas definidas son fundamentales en el proceso de transición a suministro continuo; cada una de ellas se ejecutará en un año; por lo tanto, la tarea simultánea de control activo de fugas puede realizarse en cada una de estas etapas, porque se asumió inicialmente un tiempo de transición de tres años para el cálculo de las fugas tras la transición. Cuando estos tiempos no coinciden, se puede modificar el tiempo de transición ( $T_i$ ), tomando en cuenta no generar fugas excesivas para el suministro continuo.

## 10.7. Selección de los sectores que tendrán suministro continuo tras cada etapa de ampliación

Definidas ya las tres etapas de ampliación de la capacidad de la red, ahora corresponde seleccionar en cada una de ellas a los sectores que pueden cambiar de suministro intermitente a continuo. A continuación, se evalúan cada uno de los criterios de selección y se establece el conjunto de sectores que se modifican en cada etapa del proceso de transición gradual a suministro continuo.

### 10.7.1. Evaluación de la equidad en los sectores.

La equidad de suministro depende de dos elementos fundamentales, la capacidad de suministro y el coeficiente de uniformidad.

Se analizarán dos sectores con características diferentes para ilustrar el proceso de la evaluación de la equidad.

El sector S01-05 es el más cercano al depósito y actualmente es uno de los que tiene mayor presión de suministro (40 mca). Sin embargo, el ingreso al sector es por uno de los nudos de menor elevación por lo que debe alimentar a nudos más elevados.

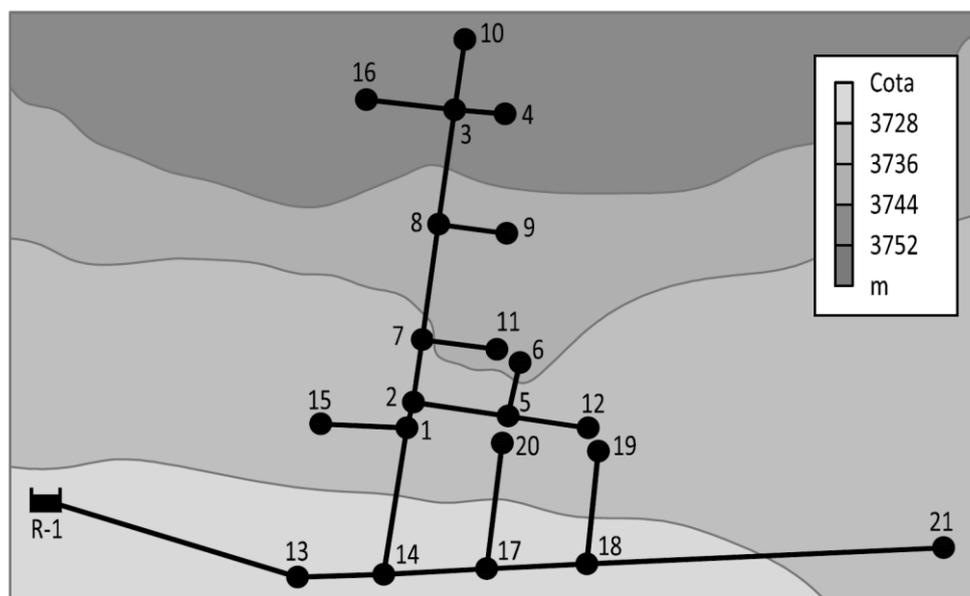


Fig. 10.51. Topografía y configuración del sector S01-05

La capacidad del sector es evaluada mediante el cálculo de la curva de consigna y el caudal máximo teórico, para lo cual se usa el modelo matemático del sector. El caudal máximo teórico es calculado en base a una presión mínima de 5 mca; se considera una menor presión debido a que se trata del suministro directo a las viviendas. En este caso, el sector tiene la suficiente capacidad tanto para suministro intermitente como para una futura transición a suministro continuo (ver Fig. 10.52).

La relación entre el caudal máximo teórico y cualquiera de los caudales demandados (continuo o intermitente) da como resultado valores superiores a 1. Para la evaluación, la relación con el caudal medio en suministro intermitente es 1.42.

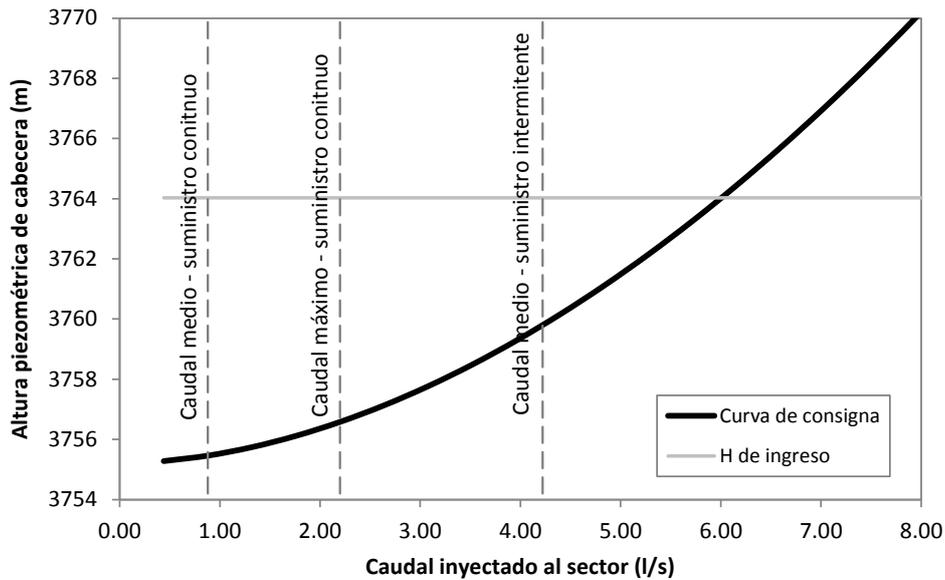


Fig. 10.52. Situación de los caudales demandados con relación al caudal máximo teórico en el sector S01-05

El cálculo de la curva de consigna, también permite evaluar la posibilidad de realizar gestión de presión en el sector. Tras la transición a suministro continuo, el sector requerirá mucha menos presión de ingreso que la actual, una reducción de 10.27 mca, con la cual se garantizará un suministro con las presiones requeridas. Incluso, de continuar con el suministro intermitente, es posible reducir la presión de ingreso al sector.

El coeficiente de uniformidad estará condicionado por la configuración y topografía del sector.

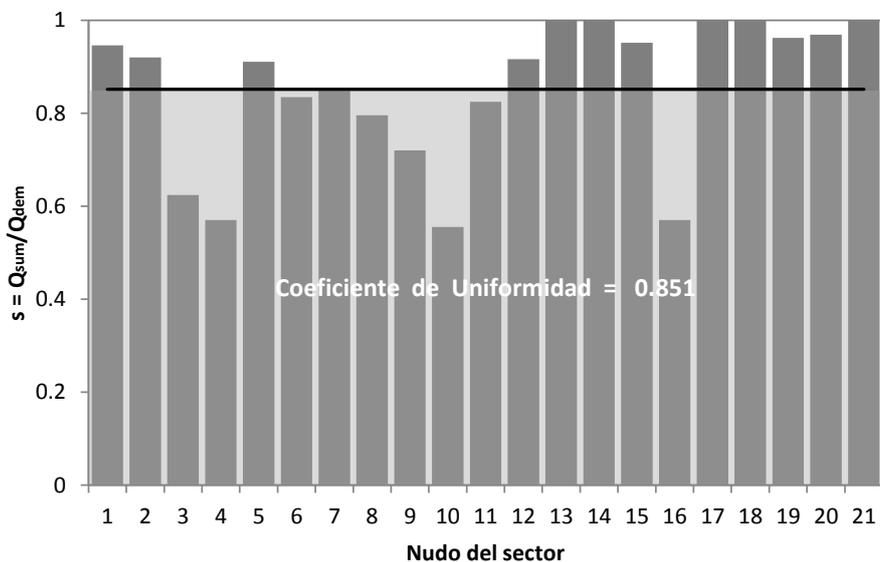


Fig. 10.53. Uniformidad en el suministro del sector S01-05

Tabla 10.53. Cálculo del coeficiente de uniformidad en el sector S01-05

Nudo	$Q_{sum}$ (l/s)	$Q_{dem}$ (l/s)	$s$	$ s-s_m $
1	0.229	0.242	0.946	0.092
2	0.158	0.172	0.920	0.067
3	0.188	0.302	0.624	0.230
4	0.026	0.046	0.570	0.283
5	0.194	0.213	0.911	0.057
6	0.042	0.051	0.834	0.019
7	0.201	0.236	0.853	0.001
8	0.221	0.278	0.795	0.058
9	0.045	0.063	0.720	0.134
10	0.037	0.066	0.555	0.298
11	0.057	0.069	0.825	0.029
12	0.067	0.074	0.916	0.063
13	0.552	0.552	1.000	0.147
14	0.311	0.311	1.000	0.147
15	0.076	0.080	0.952	0.098
16	0.047	0.082	0.570	0.283
17	0.305	0.305	1.000	0.147
18	0.528	0.528	1.000	0.147
19	0.102	0.106	0.962	0.109
20	0.114	0.118	0.969	0.115
21	0.329	0.329	1.000	0.147
<b>Suma =</b>			<b>2.668</b>	

$$CU = 1 - \frac{\sum |s_k - s_m|}{s_m \cdot n_e} = 1 - \frac{2.668}{0.853 \cdot 21} = 0.851. \quad (10.20)$$

Existen muchos nudos que tienen limitado su suministro por debajo del 65% de su demanda y los nudos favorables logran cubrir el volumen total demandado. El sector alcanza un coeficiente de uniformidad de 0.851.

El índice de equidad del sector es:

$$I_{eq,S01-05} = \frac{Q_{máx,S01-05}}{Q_{máxri,S01-05}} \cdot CU_{S01-05} = 1.423 \cdot 0.851 = 1.211. \quad (10.21)$$

Aunque tiene una uniformidad baja, la capacidad del sector permite que éste adopte un índice de equidad superior a 1.

Otro sector evaluado es el sector S01-10, que tiene una topografía más homogénea; la presión con la que se llega al mismo es de 20 mca; también el nudo de ingreso se encuentra ubicado en la zona baja del sector.

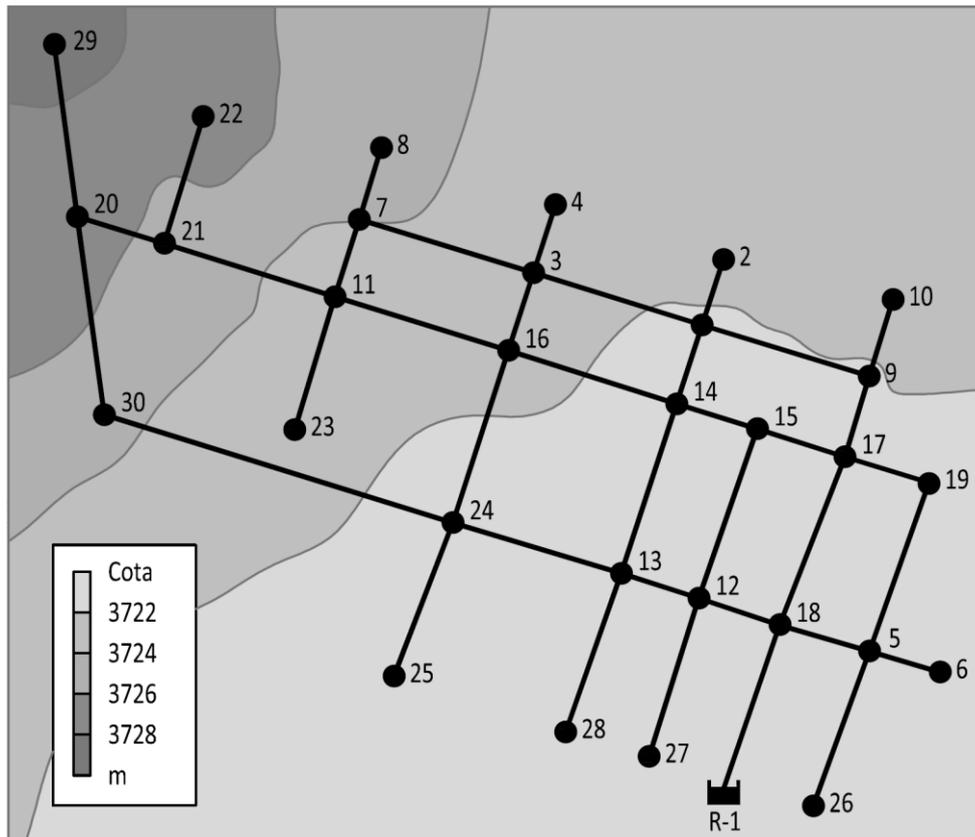


Fig. 10.54. Topografía y configuración del sector S01-10

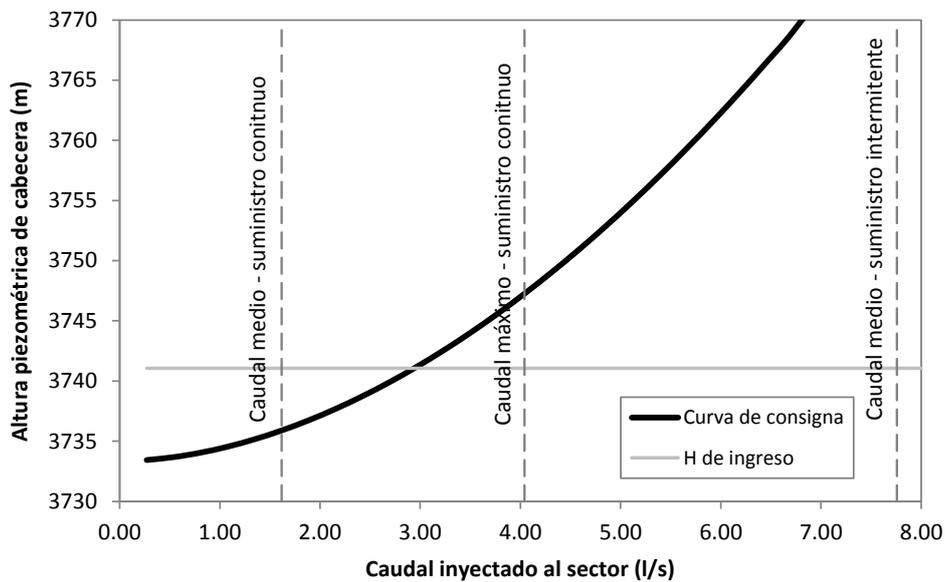


Fig. 10.55. Situación de los caudales demandados con relación al caudal máximo teórico en el sector S01-10

El caudal máximo teórico es superado por la demanda de los usuarios en suministro intermitente; en este sentido, las condiciones de suministro son deficientes. Si se mantiene el suministro intermitente será necesario ampliar la capacidad del sector con modificaciones en la red,

porque será muy difícil elevar la altura piezométrica por encima de los 3770 m, que es el nivel del agua en el depósito que alimenta a la red (Agua de Castilla). La situación puede ser diferente si el sector trabaja con suministro continuo; la configuración del sector se mantiene y se requiere elevar la presión de ingreso al sector con el fin de cumplir con la demanda de la población (ver Fig. 10.55).

El sector, limitado por la condición de presión de ingreso, no tiene capacidad para cubrir la demanda en suministro intermitente. Si no mejora esta presión, tampoco tiene capacidad para el suministro continuo ya que la relación de caudal demandado y caudal máximo teórico es inferior a 1.

La topografía del sector puede aportar un mayor grado de uniformidad; sin embargo las bajas presiones harán que la uniformidad también se reduzca (ver Fig. 10.56). Entre los nudos, en promedio se alcanza a cubrir la demanda en un 50%; en el caso más crítico, el nudo 29 llegar a no tener suministro de agua con esta presión de ingreso al sector.

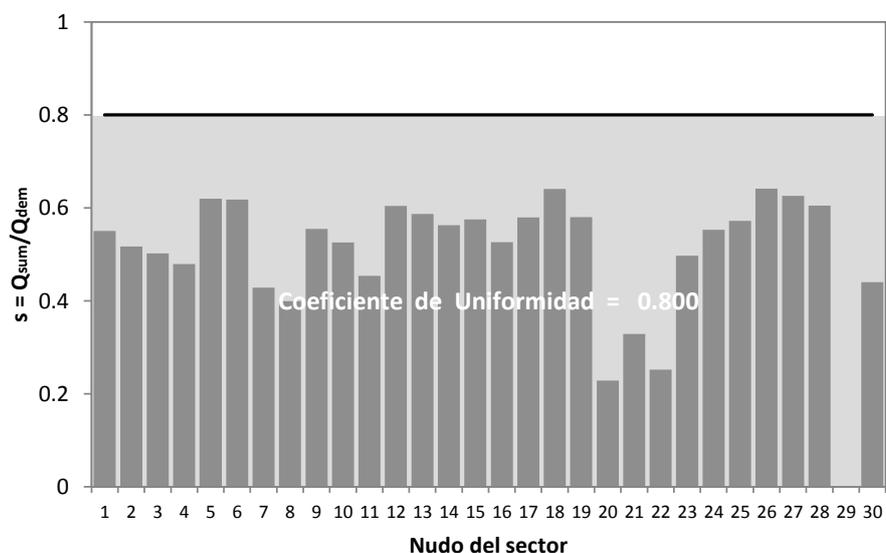


Fig. 10.56. Coeficiente de uniformidad del sector S01-10

El coeficiente de uniformidad se reduce a 0.800, con lo cual se logra un índice de equidad en el suministro en el sector de:

$$I_{eq,S01-10} = \frac{Q_{máx,S01-10}}{Q_{máxi,S01-10}} \cdot CU_{S01-10} = 0.379 \cdot 0.800 = 0.303. \quad (10.22)$$

En la tabla 10.54, se resumen los índices de equidad calculados para cada uno de los sectores de la red.

Tabla 10.54. Cálculo del índice de equidad para cada sector de la red

Sector	Q <sub>int</sub> (l/s)	Q <sub>máx</sub> (l/s)	Q <sub>máx</sub> /Q <sub>int</sub>	CU	I <sub>eq</sub>
S01-05	4.222	6.007	1.423	0.851	1.211
S01-06	12.803	4.694	0.367	0.723	0.265
S01-07	19.048	10.779	0.566	0.895	0.506
S01-08	10.116	14.715	1.455	0.959	1.395
S01-10	7.758	2.939	0.379	0.800	0.303

S01-11	6.117	2.494	0.408	0.761	0.311
S01-09	6.807	5.458	0.802	0.830	0.665
S01-13	11.851	-	0	-	0
S01-14	3.184	-	0	-	0
S01-15	3.109	-	0	-	0
S01-16	4.658	-	0	-	0
S02	6.780	9.740	1.437	0.910	1.307
M02	2.821	4.230	1.499	0.890	1.335
S01-12	32.832	-	0	-	0
S01-18	11.710	9.942	0.849	0.912	0.775

Cuando no existe intersección entre la curva de consigna y la curva motriz de la fuente de suministro, se asume una capacidad del sector igual a cero; en consecuencia, la relación de caudales hará que el índice de equidad se vuelva cero. En estas condiciones el coeficiente de uniformidad adopta valores muy bajos, pues varios nudos del sector se quedan sin suministro.

Aquellos sectores cuyo ingreso se encuentra ubicado en las zonas elevadas presentan un mayor grado de uniformidad con relación a los que tienen el ingreso en las zonas bajas de cada sector. La presión de ingreso al sector se convierte en un elemento fundamental para garantizar la capacidad del sector; la mayoría de los sectores no tiene capacidad para tener suministro intermitente.

Ya sea con suministro continuo o con suministro intermitente, a través de esta evaluación se conocen las deficiencias de los sectores. Asimismo, el desglose del indicador de equidad del suministro permite plantear soluciones de incremento de capacidad o incremento de la presión, lo cual puede dar lugar a la modificación de los horarios de suministro si el sistema no tiene las posibilidades de tener suministro continuo.

El diagnóstico de los sectores también permite evaluar la posibilidad de su transición a suministro continuo. Algunos sectores requerirán de menos presión para cubrir la demanda de la población en suministro continuo.

En base al índice de equidad de cada uno de los sectores, se calcula el peso de esta variable para el proceso de optimización.

Tabla 10.55. Normalización del criterio equidad

Sector	$I_{eq}$	$e'$	$e$
S01-05	1.211	0.183	0.0143
S01-06	0.265	1.129	0.0879
S01-07	0.506	0.888	0.0691
S01-08	1.395	0	0
S01-10	0.303	1.092	0.0850
S01-11	0.311	1.084	0.0844
S01-09	0.665	0.729	0.0568
S01-13	0	1.395	0.1086
S01-14	0	1.395	0.1086
S01-15	0	1.395	0.1086
S01-16	0	1.395	0.1086
S02	1.307	0.087	0.0068
M02	1.335	0.060	0.0047

S01-12	0	1.395	0.1086
S01-18	0.775	0.620	0.0483
<b>Suma =</b>		<b>12.845</b>	<b>1</b>

### 10.7.2. Dificultad de operación del sector.

Al ser un criterio cualitativo, es necesario entrevistar a los tres expertos de la empresa de agua. Tras este proceso, se establecen las matrices de comparación pareada de los sectores en base a la percepción de la dificultad en su operación.

Tabla 10.56. Matriz de comparación pareada de los sectores para el criterio dificultad de operación del sector

	S01-05	S01-06	S01-07	S01-08	S01-10	S01-11	S01-09	S01-13	S01-14	S01-15	S01-16	S02	M02	S01-12	S01-18	Vector propio
S01-05	1	1/5	1/3	1	1/3	1	1	1	1	1	1	1/3	1/7	1	1	0.0310
S01-06	5	1	3	3	3	3	5	3	3	3	3	1/5	1/5	3	3	0.1125
S01-07	3	1/3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1/7	3	3	0.1033
S01-08	1	1/3	1/3	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/7	1	1	0.0337
S01-10	3	1/3	1/3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	0.0415
S01-11	1	1/3	1/3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/7	1	1	0.0377
S01-09	1	1/5	1/3	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/7	1/3	1	0.0304
S01-13	1	1/3	1/3	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3	1/7	1/3	1	0.0292
S01-14	1	1/3	1/3	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3	1/7	1/3	1	0.0292
S01-15	1	1/3	1/3	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3	1/7	1/3	1	0.0292
S01-16	1	1/3	1/3	1	1	1	1	3	3	3	1	1	1/5	1	3	0.0531
S02	3	5	1/3	3	1	1	3	3	3	3	1	1	1/5	1	3	0.0972
M02	7	5	7	7	7	7	7	7	7	7	5	5	1	5	7	0.2863
S01-12	1	1/3	1/3	1	1	1	3	3	3	3	1	1	1/5	1	3	0.0568
S01-18	1	1/3	1/3	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3	1/7	1/3	1	0.0292
CR	5.7%															

El ratio de consistencia (CR) de las matrices es inferior a 10%. Los vectores propios de las matrices de comparación pareada de cada experto, representan el peso otorgado a cada sector en base al criterio de dificultad en la operación del sector. La media geométrica para cada sector es posteriormente normalizada para establecer el peso que se utilizará en el proceso de optimización.

Tabla 10.57. Normalización del criterio dificultad de operación del sector

Sector	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Media geométrica	Peso
S01-05	0.0310	0.0310	0.0332	0.0317	0.0318
S01-06	0.1125	0.1013	0.1132	0.1089	0.1089
S01-07	0.1033	0.1026	0.1058	0.1039	0.1040
S01-08	0.0337	0.0335	0.0349	0.0340	0.0341
S01-10	0.0415	0.0412	0.0426	0.0418	0.0418
S01-11	0.0377	0.0374	0.0385	0.0378	0.0379
S01-09	0.0304	0.0314	0.0318	0.0312	0.0312
S01-13	0.0292	0.0291	0.0299	0.0294	0.0294
S01-14	0.0292	0.0291	0.0290	0.0291	0.0291

S01-15	0.0292	0.0291	0.0299	0.0294	0.0294
S01-16	0.0531	0.0561	0.0589	0.0560	0.0560
S02	0.0972	0.0929	0.0854	0.0917	0.0918
M02	0.2863	0.3011	0.2749	0.2872	0.2874
S01-12	0.0568	0.0530	0.0621	0.0572	0.0572
S01-18	0.0292	0.0312	0.0299	0.0301	0.0301
<b>Total:</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>0.999</b>	<b>1.000</b>

### 10.7.3. Cantidad de usuarios del sector

Este criterio cuantitativo es calculado en base a la información recopilada en la empresa de agua. También es necesario normalizar los valores.

Tabla 10.58. Normalización del criterio número de usuarios

Sector	Número de usuarios	Normalización
S01-05	147	0.019
S01-06	467	0.062
S01-07	593	0.079
S01-08	437	0.058
S01-10	385	0.051
S01-11	244	0.032
S01-09	515	0.068
S01-13	1065	0.141
S01-14	276	0.037
S01-15	211	0.028
S01-16	918	0.122
S02	575	0.076
M02	237	0.031
S01-12	1085	0.144
S01-18	385	0.051
<b>Total:</b>	<b>7540</b>	<b>1.000</b>

### 10.7.4. Presión de servicio

Para el proceso de selección de sectores que cambiarán de tipo de suministro, la presión de servicio es una variable inversa. Por lo tanto, es necesario convertirla en variables directa y posteriormente normalizar estos valores.

Tabla 10.59. Normalización del criterio presión de servicio

Sector	Presión (mca)	$p'_i$	$p_i$
S01-05	40.03	1.67	0.005
S01-06	16.83	24.87	0.075
S01-07	19.44	22.26	0.067
S01-08	22.10	19.60	0.059

S01-10	20.06	21.64	0.065
S01-11	11.95	29.75	0.089
S01-09	30.02	11.68	0.035
S01-13	4.44	37.26	0.112
S01-14	15.56	26.14	0.079
S01-15	15.67	26.03	0.078
S01-16	0.00	41.70	0.125
S02	41.70	0.00	0.000
M02	26.12	15.58	0.047
S01-12	2.01	39.69	0.119
S01-18	26.77	14.93	0.045
<b>Total:</b>		<b>332.80</b>	<b>1.000</b>

### 10.7.5. Distancia a la fuente de suministro

La distancia a la fuente de suministro también debe ser convertida a variable directa; y, al igual que se realiza en los otros criterios, es necesaria la normalización.

Tabla 10.60. Normalización del criterio distancia a la fuente de suministro

Sector	Distancia (m)	$d'_i$	$d_i$
S01-05	239.84	0.0042	0.2510
S01-06	436.27	0.0023	0.1380
S01-07	386.98	0.0026	0.1556
S01-08	1096.06	0.0009	0.0549
S01-10	1596.22	0.0006	0.0377
S01-11	1690.14	0.0006	0.0356
S01-09	1211.49	0.0008	0.0497
S01-13	1852.27	0.0005	0.0325
S01-14	1958.56	0.0005	0.0307
S01-15	2100.25	0.0005	0.0287
S01-16	2226.05	0.0004	0.0270
S02	902.92	0.0011	0.0667
M02	986.51	0.001	0.0610
S01-12	3618.26	0.0003	0.0166
S01-18	4284.83	0.0002	0.0141
<b>Total:</b>		<b>0.0166</b>	<b>1</b>

### 10.7.6. Topología de la red

Para introducir la topología de la red como parte del modelo utilizado para la optimización, se debe simplificar la red a un grafo dirigido, el cual toma en cuenta los caminos para el ingreso de agua a cada uno de los sectores.

El grafo dirigido de la red del subsistema sur de la ciudad de Oruro es:

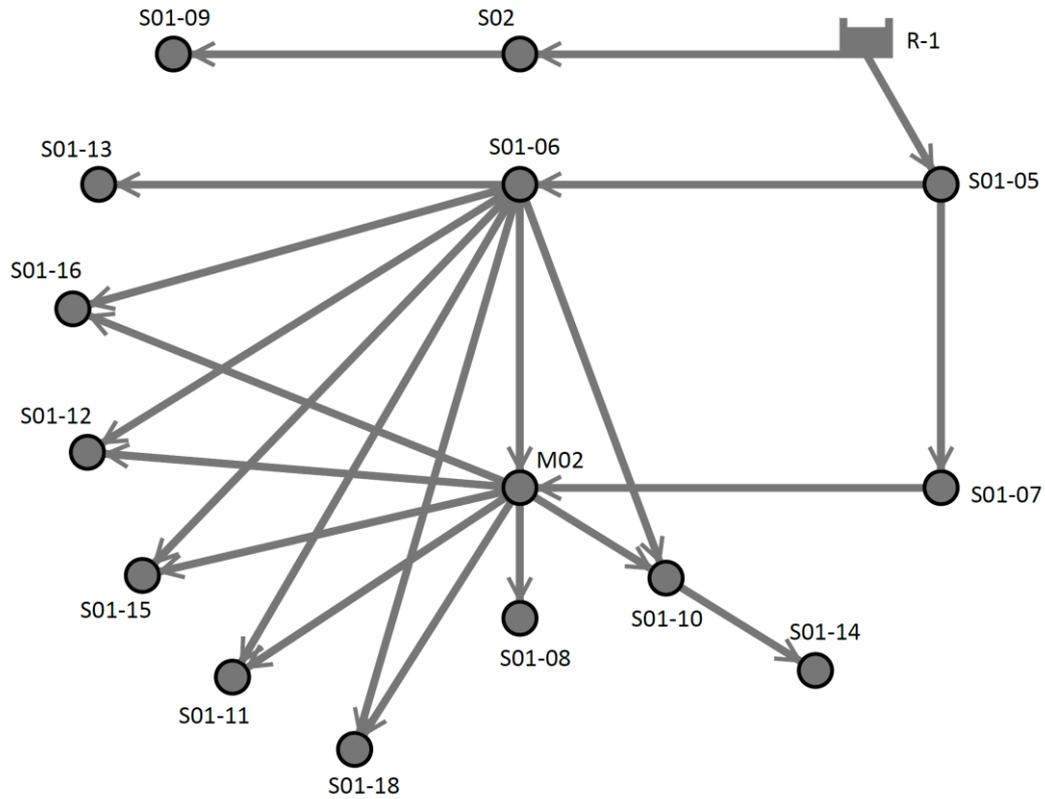


Fig. 10.57. Grafo dirigido de la red del subsistema sur de la ciudad de Oruro

El grafo dirigido tiene la siguiente matriz de adyacencia:

$$A = \begin{pmatrix} & R-1 & 05 & 06 & 07 & 08 & 10 & 11 & 09 & 13 & 14 & 15 & 16 & S02 & M02 & 12 & 18 \\ R-1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ S01-05 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-06 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ S01-07 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ S01-08 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-09 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-16 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ S01-12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

( 10.23 )

La traspuesta de la matriz de adyacencia es:

$$A^T = \begin{pmatrix} & R-1 & 05 & 06 & 07 & 08 & 10 & 11 & 09 & 13 & 14 & 15 & 16 & S02 & M02 & 12 & 18 \\ R-1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-05 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-06 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-07 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-08 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ S01-10 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ S01-11 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ S01-09 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ S01-13 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-15 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ S01-16 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ S02 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M02 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S01-12 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ S01-18 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (10.24)$$

### 10.7.7. Ponderación de criterios

Es necesario definir el peso de cada uno de los criterios para su inclusión en el proceso de optimización. Para este fin, se vuelve a consultar a los expertos sobre su percepción con relación a la importancia de cada criterio para el proceso de selección de sectores.

Tabla 10.61. Ponderación de criterios, Experto 1

	Usuarios	Presión	Distancia	Equidad	Operación	Vector propio
Usuarios	1	1	5	1	3	0.2931
Presión	1	1	3	1	1	0.2164
Distancia	1/5	1/3	1	1/5	1/3	0.0569
Equidad	1	1	5	1	3	0.2931
Operación	1/3	1	3	1/3	1	0.1405

CR 4.3%

Tabla 10.62. Ponderación de criterios, Experto 2

	Usuarios	Presión	Distancia	Equidad	Operación	Vector propio
Usuarios	1	1	5	1	3	0.2754
Presión	1	1	5	1	1	0.2278
Distancia	1/5	1/5	1	1/5	1/3	0.0487
Equidad	1	1	5	1	5	0.3231
Operación	1/3	1	3	1/5	1	0.1249

CR 7.3%

Tabla 10.63. Ponderación de criterios, Experto 3

	Usuarios	Presión	Distancia	Equidad	Operación	Vector propio
<b>Usuarios</b>	1	3	3	1	3	0.3228
<b>Presión</b>	1/3	1	3	1/3	1	0.1326
<b>Distancia</b>	1/3	1/3	1	1/5	1/3	0.0642
<b>Equidad</b>	1	3	5	1	3	0.3478
<b>Operación</b>	1/3	1	3	1/3	1	0.1326

CR 3.9%

El peso de cada uno de los criterios es calculado a través de la media geométrica y la normalización (ver tabla 40.64).

Tabla 10.64. Peso normalizado de cada criterio

Criterio	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Media geométrica	Peso normalizado
<b>Usuarios</b>	0.2931	0.2754	0.3228	0.2965	0.2986
<b>Presión</b>	0.2164	0.2278	0.1326	0.1870	0.1883
<b>Distancia</b>	0.0569	0.0487	0.0642	0.0563	0.0567
<b>Equidad</b>	0.2931	0.3231	0.3478	0.3205	0.3229
<b>Operación</b>	0.1405	0.1249	0.1326	0.1325	0.1335
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>0.875</b>	<b>0.867</b>	<b>0.993</b>	<b>1</b>

### 10.7.8. Cálculo de factores por cada criterio

El peso de cada sector, según cada criterio para el proceso de selección, es calculado mediante el producto del peso del criterio y el peso del sector relacionado con el mismo.

Tabla 10.65. Cálculo de factores por cada criterio

Sector	Usuarios	Presión	Distancia	Equidad	Operación
S01-05	0.0058	0.0009	0.0142	0.0046	0.0042
S01-06	0.0185	0.0141	0.0078	0.0284	0.0145
S01-07	0.0235	0.0126	0.0088	0.0223	0.0139
S01-08	0.0173	0.0111	0.0031	0	0.0045
S01-10	0.0152	0.0122	0.0021	0.0274	0.0056
S01-11	0.0097	0.0168	0.0020	0.0272	0.0051
S01-09	0.0204	0.0066	0.0028	0.0183	0.0042
S01-13	0.0422	0.0211	0.0018	0.0351	0.0039
S01-14	0.0109	0.0148	0.0017	0.0351	0.0039
S01-15	0.0084	0.0147	0.0016	0.0351	0.0039
S01-16	0.0364	0.0236	0.0015	0.0351	0.0075
S02	0.0228	0	0.0038	0.0022	0.0122
M02	0.0094	0.0088	0.0035	0.0015	0.0384
S01-12	0.0430	0.0225	0.0009	0.0351	0.0076
S01-18	0.0152	0.0084	0.0008	0.0156	0.0040

Estos pesos son los elementos que ingresan en la función objetivo del problema de optimización para la selección de los sectores que se convertirán a suministro continuo.

### 10.7.9. Cambio de patrón de suministro

El patrón en suministro intermitente debe cambiar a un patrón en suministro continuo. Ya se conoce la configuración de la curva de suministro intermitente y para poder realizar el proceso de transición es necesario tener un patrón de consumo en suministro continuo. Esta curva puede ser adoptada de otras zonas de la ciudad que cuentan con el servicio de agua potable durante las veinticuatro horas.

Tabla 10.66. Patrón de consumo en suministro continuo

Hr	Factores de consumo
0	
1	0.06
2	0.17
3	0.22
4	0.53
5	1.38
6	2.28
7	2.50
8	1.98
9	1.41
10	1.42
11	1.34
12	1.41
13	1.50
14	1.51
15	0.83
16	0.75
17	0.93
18	1.24
19	1.10
20	0.58
21	0.39
22	0.32
23	0.12
24	0.04

### 10.7.10. Selección de sectores en cada etapa de mejora

Una de las restricciones más importantes para la selección de sectores es la presión de referencia, la cual debe ser superada para considerar que el escenario configurado por sectores trabajando en continuo y otros en suministro intermitente es viable. El valor considerado como presión de referencia ( $P_{ref}$ ) para todas las etapas del proceso es 10 mca.

Tras realizar el proceso de optimización en cada una de las tres etapas del proceso de transición a suministro continuo, se tienen los resultados detallados a continuación.

En la primera etapa del proceso de transición no es posible seleccionar ningún sector, debido a que ninguno cumple con las restricciones establecidas en el problema de optimización. Las presiones

calculadas en DDA son muy bajas y no permiten el suministro por veinticuatro horas. Resulta muy arriesgado adoptar el suministro continuo en estas condiciones. En esta etapa es recomendable mantener el suministro intermitente y la presencia de los depósitos domiciliarios, los cuales permiten a los usuarios recolectar agua a bajas presiones. El incremento de la capacidad de la red mejora las presiones; sin embargo, no es lo suficiente como para que algunos sectores puedan tener suministro continuo.

En la segunda etapa, la capacidad de la red se incrementa más, lo cual genera mejores condiciones para el servicio. En este contexto es posible seleccionar algunos sectores para tener suministro continuo. El proceso de optimización establece que 13 de los 15 sectores pueden tener suministro continuo (Tabla 10.67) a presiones superiores a la restricción de 10 mca.

Tabla 10.67. Resultado del proceso de selección de sectores para tener suministro continuo, segunda etapa

Sector	Suministro intermitente	Suministro continuo
S01-05	0	1
S01-06	0	1
S01-07	0	1
S01-08	0	1
S01-10	0	1
S01-11	0	1
S01-09	0	1
S01-13	0	1
S01-14	0	1
S01-15	0	1
S01-16	1	0
S02	0	1
M02	0	1
S01-12	0	1
S01-18	1	0

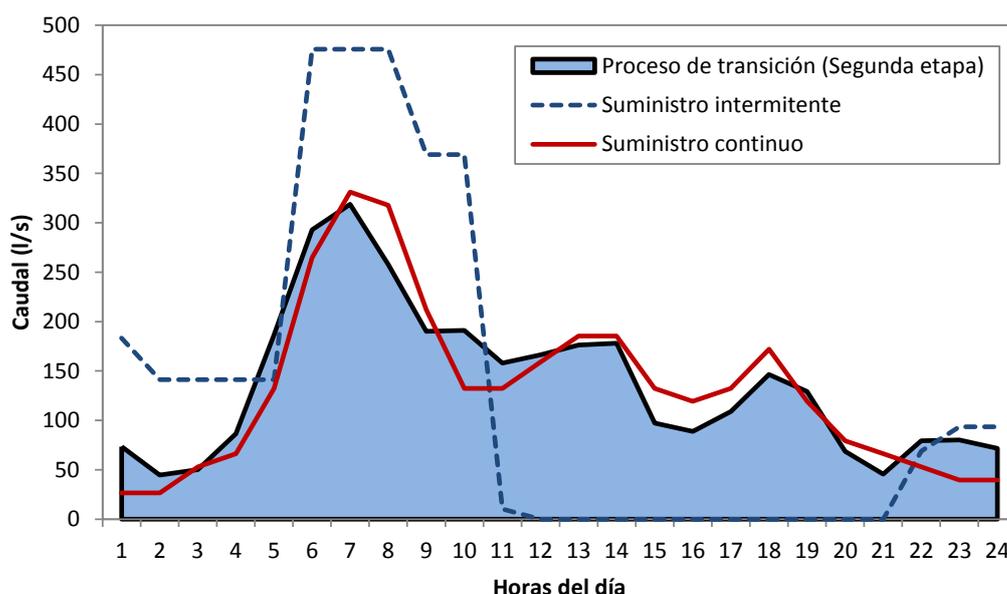


Fig. 10.58. Cambio de la curva de suministro en el proceso de selección de sectores, segunda etapa

En cada una de las iteraciones del proceso de optimización se verifican las presiones en la red en función de que la demanda de cada sector, tenga suministro continuo o intermitente. Este cálculo permite establecer la posibilidad de cambiar algunos sectores a suministro intermitente. El cálculo hidráulico se realiza en DDA y se asume que los usuarios retirarán sus depósitos domiciliarios una vez que cuenten con el suministro continuo. Esta situación puede convertirse también en una condición entre los usuarios para empezar con el proceso de transición a suministro continuo.

Tabla 10.68. Presiones mínimas calculadas en la segunda etapa del proceso de transición

Hora	Presión (mca)	Nudo
1	23.73	S01-16
2	24.91	S01-16
3	24.80	S01-16
4	23.88	S01-16
5	19.59	S01-16
6	12.38	S01-16
7	10.24	S01-16
8	15.03	S01-16
9	19.38	S01-16
10	19.32	S01-16
11	22.05	S01-16
12	21.66	S01-16
13	21.17	S01-16
14	21.08	S01-16
15	24.36	S01-16
16	24.60	S01-16
17	23.99	S01-16
18	22.56	S01-16
19	23.26	S01-16
20	25.11	S01-16
21	25.56	S01-16
22	24.36	S01-16
23	23.51	S01-16
24	23.78	S01-16

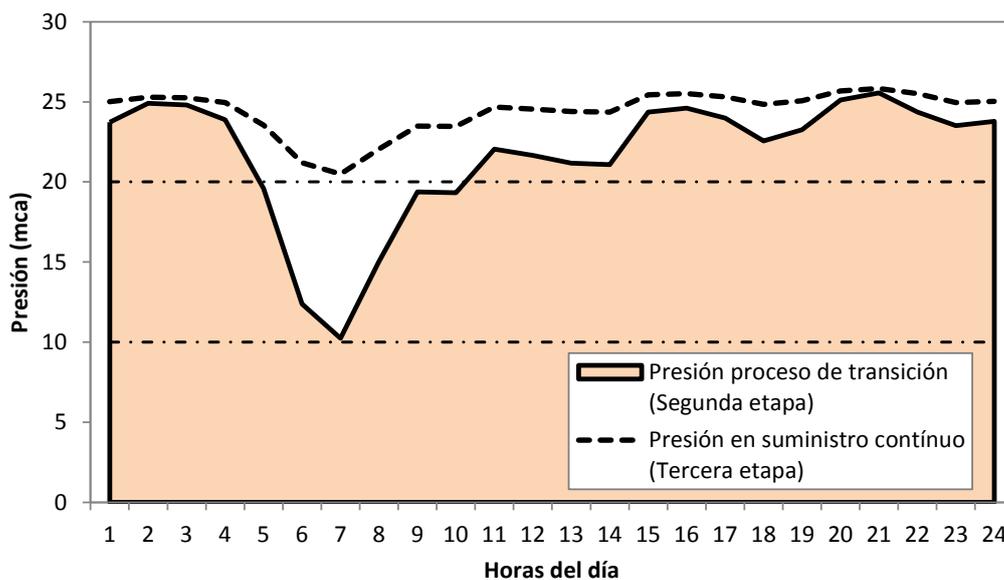


Fig. 10.59. Presiones mínimas de suministro en la segunda etapa del proceso de transición

En todas las horas de suministro la presión mínima fue calculada en el sector S01-16, obteniéndose las mínimas en horas de la mañana. En esta segunda etapa el proceso de transición puede realizarse gradualmente con presiones superiores a 10 mca; en la tercera etapa es cuando se logran presiones superiores a 20 mca (Fig. 10.59).

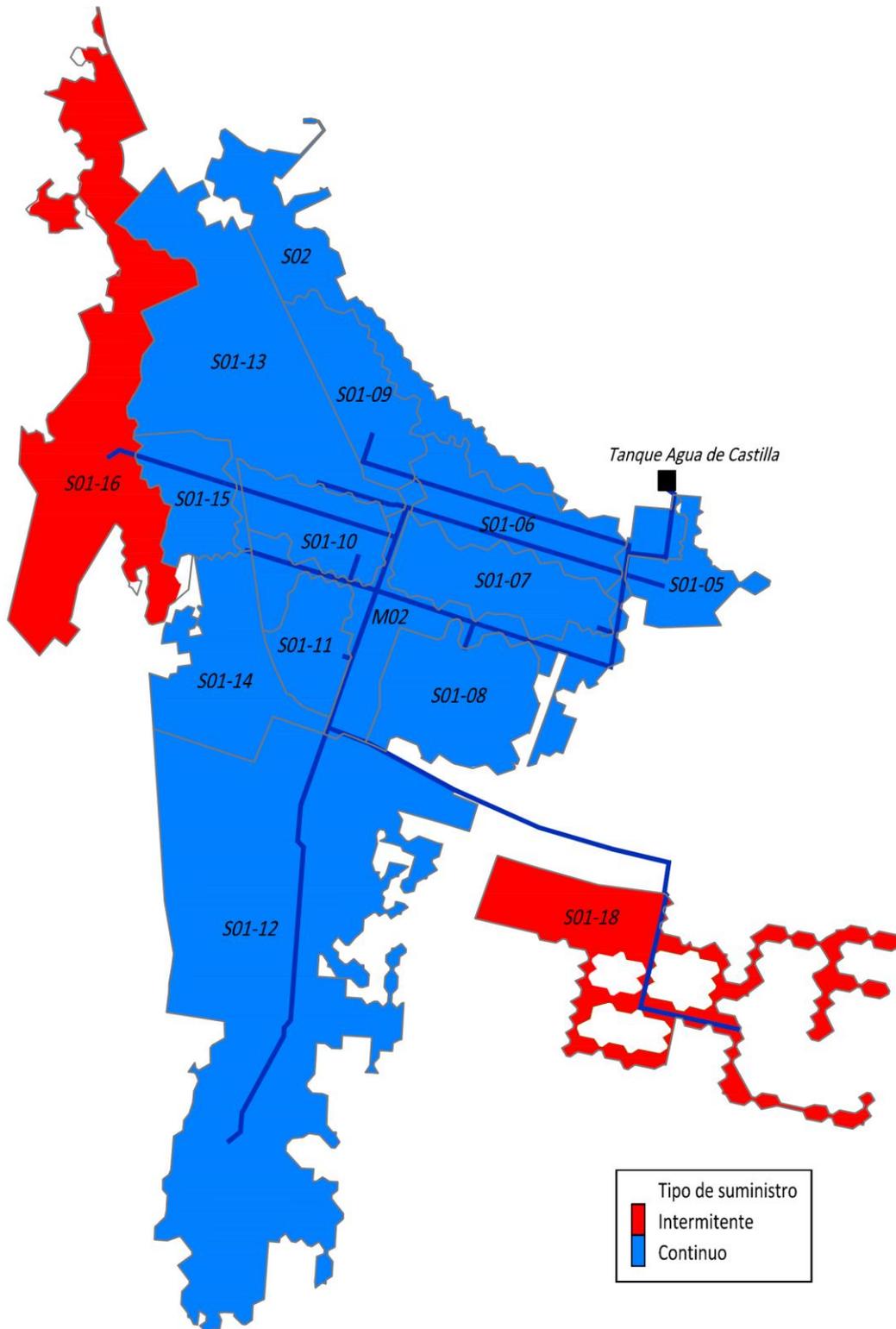


Fig. 10.60. Sectores seleccionados para tener suministro continuo, segunda etapa

En la figura 10.60 se muestra el grupo de sectores que puede tener suministro continuo en la segunda etapa.

En la tercera etapa se seleccionan los sectores faltantes; finalmente todos los sectores logran tener suministro continuo con presiones de ingreso a los sectores superiores a 20 mca, lo cual garantiza un buen servicio. Además, permite a los usuarios quitar los depósitos domiciliarios, lo cual evita la distorsión del patrón de suministro.

En la tabla 10.69 se resumen todas las etapas del proceso de transición a suministro continuo y se detalla el número de sectores seleccionados en cada una de ellas.

Tabla 10.69. Resumen de la selección de sectores que pasan a tener suministro continuo por etapa

Etapa	Número de sectores con suministro intermitente	Número de sectores con suministro continuo	Observaciones
Primera	15	0	Ninguna configuración permite superar las restricciones del proceso de optimización.
Segunda	2	13	Con una presión de referencia de 10 mca se logra tener varios sectores con suministro continuo.
Tercera	0	15	Todos los sectores tienen suministro continuo.

## 10.8. Gestión de presión en suministro continuo

La determinación de la curva de consigna en cada uno de los sectores y el nuevo estado de las presiones tras la transición a suministro continuo permiten plantear una mejor gestión del sistema de agua potable, lo que repercutirá en la reducción de las pérdidas reales.

La ampliación de la capacidad de la red genera un incremento en las presiones de servicio al ingreso de los sectores; esta presión debe ser regulada en búsqueda de dos objetivos básicos: satisfacer las necesidades del sector y reducir las fugas. Por lo tanto, es recomendable ajustarse a las necesidades de presión de cada uno de los sectores, definidas por la curva de consigna.

En la tabla 10.69, se muestra la presión actual en el ingreso de los sectores con suministro intermitente ( $P_{int}$ ) y la presión tras el proceso de transición ( $P_{cont}$ ). A partir de la altura piezométrica necesaria en suministro continuo ( $H_{mín\_cont}$ ), calculada con la curva de consigna de cada sector, y la cota, es posible calcular la presión mínima necesaria para el suministro del sector ( $P_{mín\_cont}$ ). Por lo tanto, con esta información se calcula la reducción de la presión de ingreso a cada sector, lo cual es necesario para gestionar las presiones y reducir el nivel de fugas en la red.

Tabla 10.70. Reducción de la presión en cada sector tras el proceso de transición a suministro continuo

Sector	$P_{int}$ (mca)	$P_{cont}$ (mca)	$H_{mín\_cont}$ (mca)	Cota (m)	$P_{mín\_cont}$ (mca)	Reducción de presión (mca)
S01-05	40.03	43.84	3756.58	3724.06	32.52	11.32
S01-06	16.83	39.04	3744.88	3726.11	18.77	20.27
S01-07	19.44	43.94	3735.39	3716.97	18.42	25.52
S01-08	22.1	46.98	3726.56	3719.25	7.31	39.67
S01-10	20.06	44.81	3747.26	3721.08	26.18	18.63

S01-11	11.95	41.73	3734.56	3719.87	14.69	27.04
S01-09	30.02	34.44	3760.18	3730.14	30.04	4.4
S01-13	4.44	24.43	3747.78	3724.92	22.86	1.57
S01-14	15.56	40.39	3753.7	3725.02	28.68	11.71
S01-15	15.67	40.07	3746.98	3722.14	24.84	15.23
S01-16	0	20.30	3765.14	3745.21	19.93	0.37
S02	41.7	40.96	3747.32	3725.89	21.43	19.53
M02	26.12	47.72	3754.41	3719.04	35.37	12.35
S01-12	2.01	20.48	3751.41	3731.17	20.24	0.24
S01-18	26.77	45.52	3726.83	3715.95	10.88	34.64

Es recomendable también, gestionar la presión de los sectores que pasan a tener suministro continuo en cada una de las etapas del proceso de transición.

De esta forma, se concluye el proceso de transición gradual a suministro continuo, en base a un conjunto de medidas de gestión e inversión, que logran mejorar la calidad del servicio.

# CAPÍTULO 11. Conclusiones y desarrollos futuros

---

## 11.1. Introducción

Aunque el suministro intermitente debe ser la última medida a tomar en condiciones de escasez de agua, principalmente por los daños que causa a la infraestructura del sistema (World Health Organization, 2003), (Central Public Health and Environmental Engineering Organisation, 2005), (Dahasahasra, 2007), (Faure & Pandit, 2010), (Charalambous, 2012a), y por el riesgo a la salud que conlleva (Knobelsdorf & Mujeriego, 1997), (Semenza et al., 1998), (Mermin et al., 1999), (Tokajian & Hashwa, 2003), (Tokajian & Hashwa, 2004), (Lee & Schwab, 2005), (Kumpel & Nelson, 2013), (Kumpel & Nelson, 2014), (Ercumen et al., 2015), aún continúa siendo la forma de acceso al agua para millones de personas alrededor del mundo. Una medida que permite evitar este tipo de inconvenientes es garantizando un suministro de agua con presiones positivas y continuas en toda la red (Geldreich, 1996), (Kumpel & Nelson, 2014), lo cual implica un suministro continuo. Esta tarea sigue siendo uno de los principales retos relacionados al agua y la salud en los países en vías de desarrollo (Mohapatra et al., 2014).

La metodología propuesta en la presente tesis doctoral ha perseguido investigar y analizar las causas del suministro intermitente, a partir de lo cual se construyeron un conjunto de herramientas que permiten gestionar y afrontar el suministro intermitente de una forma técnicamente viable, ajustándose a las necesidades y limitaciones de las empresas que gestionan este tipo de sistemas de agua. Asimismo, se constituyen en instrumentos para la planificación y la toma de decisiones tanto de expertos como de responsables políticos.

El desarrollo de la metodología y su aplicación en el caso de estudio permiten llegar a las conclusiones expuestas en este capítulo, donde se destacan las aportaciones generales de este trabajo, las aportaciones específicas, y también se plantean posibles desarrollos futuros.

## 11.2. Aportaciones de carácter general

Generalmente, la bibliografía relacionada con la gestión, planificación, diseño, operación y mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua está basada en el suministro continuo. Existen pocas referencias relacionadas con el suministro intermitente, por lo que el diseño y gestión de estos sistemas tiene una base fuertemente empírica, establecida sobre la experiencia del personal de la empresa de agua. Por lo tanto, la presente tesis y el conjunto de herramientas propuestas, son un aporte

importante para la búsqueda de una gestión y planificación proactiva de los sistemas con suministro intermitente.

Asimismo, la tesis permite visibilizar, en un ámbito académico, los problemas de los sistemas de agua potable en los países en vías de desarrollo.

Se propone una metodología que permite el proceso de transición de un sistema con suministro intermitente a suministro continuo, la cual se adapta al tipo de escasez en el que se encuentra la empresa de agua. En un estado de escasez económica, se logra el suministro continuo por medio de medidas que se ajustan a la disponibilidad de recursos económicos de la empresa. Para afrontar la mala gestión, se plantean herramientas que permiten gestionar mejor los sistemas con suministro intermitente. En el caso de los sistemas con escasez física de agua, aunque es más difícil lograr el suministro continuo, se proponen medidas que permiten mejorar el servicio en este estado. Se formulan medidas de mejora a corto y a largo plazo.

Es importante hacer objetiva la experiencia acumulada de los expertos de la empresa de agua e incorporarla en el proceso de toma de decisiones. Por lo tanto, se incorporan al proceso criterios cualitativos que son extraídos de la opinión de los técnicos; el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) resulta muy útil para este fin.

El proceso de transición permite tener suministro continuo, el cual convierte los actuales costes de adaptación de los hogares en recursos económicos para la empresa de agua. Los costes de afrontamiento de los usuarios se reducen y es posible que puedan pagar por un mejor servicio.

Se presenta el uso del caudal máximo teórico, que permite cuantificar la capacidad de la red. De esta forma, se otorga a la capacidad de la red su verdadera dimensión, el carácter cuantitativo necesario para la toma de decisiones en la evaluación, gestión, mantenimiento, explotación y diseño de una red de agua potable, con suministro intermitente o continuo.

Se analizan las propiedades de la curva de consigna, entre las cuales destacan: dependiendo de la configuración de la red, la reducción de la presión mínima en los nudos crea curvas de consigna paralelas, a una distancia igual a la diferencia de presiones mínimas; el caudal máximo teórico cambia en función de la presión mínima adoptada, por lo que el valor de este indicador debe ir acompañado de la presión mínima utilizada; a niveles bajos y uniformes de fugas, la curva de consigna sin fugas es igual a la calculada con fugas; independientemente del caudal suministrado, cuando una red trabaja ajustada a la curva de consigna se tiene un nivel de fugas constante.

Como parte del análisis de las fugas durante y después del proceso de transición, se formula una relación que permite estimar el incremento de las fugas en suministro continuo, en base a las condiciones actuales del suministro intermitente. Asimismo, se establecen ecuaciones con las cuales es posible calcular la presión de servicio que debe alcanzar el sistema continuo, tras la transición, para tener un suministro sostenible.

Las soluciones propuestas en la presente tesis para resolver los problemas de gestión de los sistemas con suministro intermitente no buscan promover el suministro intermitente. Simplemente, se buscan soluciones para un mejor servicio en sistemas en los cuales no es realista tener un suministro por veinticuatro horas.

### **11.3. Aportaciones específicas de la tesis**

Generalmente, los sectores son elementos intrínsecos de un sistema con suministro intermitente son vitales para el suministro por horas. Como se demuestra en la presente tesis, los

mismos son muy útiles para lograr el suministro continuo, además de que existe la posibilidad de que puedan ser convertidos en Distritos Hidrométricos (DMAs) y en sectores que permitan la gestión de la presión, con el fin de reducir las pérdidas de agua.

Uno de los inconvenientes de trabajar con el caudal máximo teórico es que el mismo muestra solo la situación del nudo más desfavorable, por lo que pueden existir otros nudos que aún pueden ser mejorados; este enfoque permite tener una visión general de la red sin detalles. Sin embargo, el proceso de ampliación de la capacidad de la red permite observar la influencia de cada una de las tuberías de la red con relación a la capacidad de la red; de esta forma, se compensa el primer inconveniente.

Se establece una forma de identificación de nudos favorables y desfavorables muy útil para evaluar la equidad en el suministro. Los nudos desfavorables son aquellos que tienen dificultades para satisfacer su demanda; incluso pueden llegar a no recibir ni un poco de agua; esta situación es condicionada por la misma red y no por la falta de agua en el sistema; por otro lado, los nudos favorables logran satisfacer su demanda; además la red permite que puedan derrochar agua. La presencia de nudos desfavorables en la red puede conducir a una idea errónea de escasez física de agua, lo cual puede llevar equivocadamente a adoptar el suministro intermitente.

Tras analizar la influencia en los nudos del tipo de criterio de cálculo utilizado, DDA (*Demand Driven Analysis*) o PDD (*Pressure Dependent Demand*), se observa que es conveniente usar PDD en procesos de evaluación y diagnóstico, pues se aproxima más a la realidad de los sistemas con suministro intermitente; y es mejor utilizar DDA cuando se quiere realizar el diseño o la transición a suministro continuo. Esto es debido a que en DDA se presenta un escenario más crítico relacionado con las presiones; incluso se puede llegar a tener presiones negativas en el modelo.

Generalmente, se considera que la escasez física de agua es la única que genera el suministro intermitente; sin embargo, en el desarrollo de la tesis se demuestra que las deficiencias en la infraestructura como en la gestión del sistema pueden dar origen a este tipo de suministro. Por más que se incremente el caudal de la fuente de suministro, si la red no tiene la capacidad suficiente, no se podrá lograr el suministro continuo.

Las soluciones para producir mejoras en los sistemas con suministro intermitente no siempre deben ir por el lado de la construcción de nueva infraestructura, ni de la ampliación de los mismos, mucho menos si se trabaja en sistemas de escasez económica, donde los ingresos cubren solamente las tareas de operación y mantenimiento. En ese sentido, deben buscarse soluciones relacionadas con la gestión técnica del sistema, que permitan operar de forma más eficiente el sistema; la gestión de horarios de suministro pretende ser un aporte en este sentido, una solución baja en coste y que puede implementarse a corto plazo.

Estudiando el crecimiento desarrollado en la zona sur de la ciudad de Oruro y su sistema de abastecimiento de agua, se analiza el origen del suministro intermitente. Se evidencia cómo la mala planificación en los procesos de ampliación de la red redujo la capacidad de la red, lo cual fue percibido como escasez física de agua, llegando a un punto en el que tuvo que adoptarse una política de suministro intermitente.

Como parte del diagnóstico, se proponen indicadores para establecer la escasez física del sistema intermitente y sus posibilidades de lograr el suministro por veinticuatro horas. Se considera que una demanda per cápita superior a 50 l/hab/d y un porcentaje de fugas menor a 20% permiten la transición del suministro intermitente a continuo.

En sistemas de suministro intermitente con escasez económica puede existir falta de datos e información, debido a que la toma de datos y generación de información requieren recursos económicos y de personal; de esta forma puede ser posible solamente contar con información muy básica. En este sentido, toda la que se pueda recolectar es importante, tanto cuantitativa como cualitativa. El proceso de transición propuesto busca adaptarse a este tipo de situaciones.

Para el diagnóstico del sistema con suministro intermitente es muy importante definir la presión y las horas de servicio del sistema. Por lo tanto, se proponen dos indicadores: la presión ponderada y el número de horas de suministro ponderado. Estos elementos son fundamentales para la predicción de las fugas tras la transición, cuando el sistema esté trabajando con suministro continuo.

La metodología propuesta para la sectorización de sistemas con suministro intermitente garantiza la configuración de los sectores en base a las características de la red y a criterios de equidad. Se utiliza teoría de grafos y análisis clúster, calculando el camino más corto al nudo crítico a partir del cual se va configurando el sector. Se establece el tamaño de los sectores, además del tiempo de entrega de agua que deben tener para lograr un suministro equitativo, lo cual es muy innovador en una metodología de este tipo.

Se formulan criterios para la evaluación de los sectores de las redes con suministro intermitente. Asimismo, se definen las medidas correspondientes de mejora. Entre estas se tienen la modificación del tiempo de suministro, la ampliación de la capacidad del sector y la división del sector. Es necesario que la capacidad del sector sea superior al caudal medio diario del sector en suministro continuo, una condición ineludible para realizar las correspondientes mejoras.

La gestión de los horarios de suministro es un planteamiento novedoso que permite gestionar un sistema con suministro intermitente con sectores; este proceso es útil en sistemas que no tienen posibilidades de contar con suministro continuo; además, puede ser útil como parte de los primeros pasos del proceso de transición. Se usan bloques de suministro para cada sector, los cuales se reorganizan buscando los horarios de suministro óptimo, en función de criterios de selección cuantitativos y cualitativos.

Como parte del problema de optimización a través de programación lineal, se propone el uso de matrices circulantes de horarios, las cuales desempeñan un papel muy importante en el proceso de resolución. Estas matrices permiten modificar los horarios en bloques, por lo que su uso es de gran ayuda para este tipo de problemas.

La metodología permite definir varios escenarios en base a diferentes grados de restricción; se considera que la selección del escenario será decisión de nivel ejecutivo en las empresas de agua, para que la solución esté acorde a sus objetivos. Debe recordarse que la reducción del caudal pico implica un mayor número de sectores que modifican su horario de suministro, lo cual puede incrementar los costes de operación.

Una ventaja de la gestión de horarios es la posibilidad de ampliar la capacidad del sistema a través de la reducción del volumen de regulación del depósito de almacenamiento; de esta forma, es posible incorporar nuevas fuentes de suministro, si es necesario, sin la necesidad de construir nuevos depósitos.

Se propone un método para la ampliación de la capacidad de redes de suministro de agua, en las que se quiere establecer una sustitución estratégica de tuberías. Esta condición permite definir un cronograma o calendario de acción con el cual es posible definir las etapas de ampliación, enmarcadas en los recursos disponibles por la empresa de agua. Otra ventaja del método propuesto es la posibilidad de detectar cuellos de botella en la red, pues se conoce la influencia de cada uno de los

tramos en la capacidad total de la red. Esta metodología se constituye en una aplicación importante y novedosa de la curva de consigna, herramienta utilizada actualmente para la gestión de los sistemas de agua potable que trabajan por bombeo.

Es imprescindible que un sistema con suministro intermitente tenga niveles bajos de fugas para poder optar por el suministro continuo. Si el sistema tiene niveles elevados, las fugas en suministro continuo se incrementarían excesivamente, con lo cual no sería recomendable su transición. En este contexto, lo mejor es reducir el nivel de fugas en el actual sistema intermitente y, cuando se tengan niveles aceptables, analizar la posibilidad de la transición a suministro continuo.

La estimación de las fugas tras el proceso de transición permite a la empresa de agua conocer la situación futura que deberá afrontar; también otorga un argumento razonable para establecer una futura alza de tarifas para el control de las pérdidas, si es necesaria.

Se propone el estudio de las curvas de consigna de cada uno de los sectores, en base a las cuales es posible realizar la gestión de la presión.

Se formula un indicador que mide la equidad de suministro en función de la capacidad del sistema y la uniformidad en el suministro. Este indicador resulta muy útil para evaluar los sectores de una red con suministro intermitente.

La transición a suministro continuo exige recursos de la empresa de agua; asimismo, el compromiso necesario para reducir las pérdidas de agua que se producirán durante y después de la transición. Por lo tanto, es necesario planificar el proceso de transición con todo el cuidado posible, ya que requiere el mayor compromiso de la empresa. De no ser así, el sistema intermitente resulta ser más ventajoso en relación a la reducción de fugas, por lo que una alternativa es mantenerlo, a pesar de los problemas en la calidad del agua y el daño a la infraestructura que produce.

Se incorpora la topología de la red, mediante el uso de la matriz de adyacencia del grafo simplificado de la red, al proceso de optimización en la selección de sectores que pasan a tener suministro continuo. El fin es lograr una selección más eficiente.

Es recomendable que cada uno de los procesos de mejora del sistema con suministro intermitente sea ejecutado con una previa socialización y explicación de los beneficios a la población. De esta forma, se pueden evitar protestas u otro tipo de problemas sociales.

#### **11.4. Desarrollos futuros**

Algunas ideas para la realización de futuros desarrollos, a partir de las propuestas y los resultados alcanzados en esta tesis, son las siguientes.

Para establecer la viabilidad económica de un proceso de transición a suministro continuo es conveniente realizar una evaluación económica que considere los efectos adversos del suministro intermitente y las ventajas del mismo, en base a los criterios definidos en la presente tesis. Asimismo, puede corresponder realizar una evaluación energética que compare el suministro intermitente con el suministro continuo.

Debido al potencial que presenta, puede resultar interesante evaluar las posibilidades del caudal máximo teórico de convertirse en un indicador de desempeño de la red. Asimismo, puede evaluarse la presión ponderada y las horas de suministro ponderadas, en el entendido de que un sistema con suministro intermitente no tiene un solo periodo de entrega de agua.

En los procesos de mejora del sistema puede incluirse la participación social de los usuarios. Con el fin de lograr acciones que sean aceptadas y respaldadas por la población, esta condición puede reducir los posibles problemas sociales que puedan surgir relacionados con las intervenciones en el sistema de agua. Asimismo, es conveniente incluir en estos procesos a los responsables políticos, que muchas veces son responsables de las decisiones y la financiación de la infraestructura.

El concepto de la capacidad de la red, cuantificada a través del caudal máximo teórico, puede tener aplicaciones en la sectorización de los sistemas con suministro continuo. Considérese que generalmente la sectorización reduce la capacidad de la red, debido al cierre de tuberías, por lo que puede plantearse una metodología cuyo objetivo sea minimizar la reducción de la capacidad de la red.

El algoritmo utilizado para el proceso de sectorización del suministro intermitente puede ser adaptado para la sectorización de sistemas con suministro continuo.

## Referencias

---

- Abreu, J., Guarga, R. & Izquierdo, J. (1995). *Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión*. Universitat Politècnica de València.
- Abreu, M. M. & Lucas, J. A. (2002). *Terminologia geral sobre patologia da construção*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Aguarón, J. & Moreno-Jiménez, J. M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 137-145.
- Akinpelu, E. O. (2001). Development of appropriate demand modelling procedure for water distribution systems in developing countries. *Tesis doctoral*. South Bank University.
- Alegre, H. (2004). Performance indicators as a management support tool. En L. W. Mays, *Urban water supply Handbook* (págs. 9.3-9.74). McGraw-Hill.
- Alegre, H. & Covas, D. (2010). *Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água. Uma abordagem centrada na reabilitação*. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico.
- Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera Jr., E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Parena, R. (2006). *Performance indicators for water supply services*. IWA publishing.
- Alhassan, H., Naser, G., Milani, A. S. & Nunoo, S. (2015). Decision Making for Capacity Expansion of Water Supply Systems. *Journal of Water Resource and Protection*, 7(16), 1280-1290.
- Almandoz, J., Cabrera, E., Arregui, F., Cabrera Jr, E. & Cobacho, R. (2005). Leakage assessment through water distribution network simulation. *Journal of water resources planning and management*, 458-466.
- Alvisi, S. & Franchini, M. (2014). A heuristic procedure for the automatic creation of district metered areas in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 11(2), 137-159.
- Andey, S. P. & Kelkar, P. S. (2009). Influence of Intermittent and Continuous Modes of Water Supply on Domestic Water Consumption. *Water Resources Management*, 2555-2566.
- Andreu, J. (1993). *Conceptos y métodos para la planificación hidrológica*. CINME.
- ANESAPA. (2014). *SeLA – Oruro 50 Años de Servicio*. Recuperado el 18 de Marzo de 2015, de ANESAPA (Asociación Nacional de Empresas de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado): <http://www.anesapa.org/noticias/sela-oruro-50-anos-de-servicio/>

- Araujo, L. S., Ramos, H. & Coelho, S. T. (2006). Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, 20(1), 133-149.
- Arnell, N. W. (2006). Climate Change and Water Resources: A Global Perspective. En H. J. Schellnhuber, *Avoiding Dangerous Climate Change* (págs. 167-176). Cambridge University Press.
- Arregui, F., Cabrera Jr, E. & Cobacho, R. (2006). *Integrated Water Meter Management*. IWA Publishing.
- Aznar, J. & Guijarro, F. (2012). *Nuevos métodos de valoración, modelos multicriterio*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Balakrishnan, R. & Ranganathan, K. (2012). *A textbook of Graph Theory*. New York: Springer Science & Business Media.
- Battermann, A. & Macke, S. (2001). A Strategy to Reduce Technical Water Losses for Intermittent Water Supply Systems. *M. Sc. Tesis*. Judayta, Jordania.
- Benítez, J., Delgado-Galván, X., Gutiérrez, J. A. & Izquierdo, J. (2011b). Balancing consistency and expert judgment in AHP. *Mathematical and computer modelling*, 54(7), 1785-1790.
- Benítez, J., Delgado-Galván, X., Izquierdo, J. & Pérez-García, R. (2010). Consistent matrices and consistency improvement in decision-making processes. *Proceedings of the Seventh International Conference on Engineering Computational Technology*, Civil-Comp Press. Stirlingshire, UK.
- Benítez, J., Delgado-Galván, X., Izquierdo, J. & Pérez-García, R. (2011a). Achieving matrix consistency in AHP through linearization. *Applied Mathematical Modelling*, 35(9), 4449-4457.
- Benítez, J., Delgado-Galván, X., Izquierdo, J. & Pérez-García, R. (2012). An approach to AHP decision in a dynamic context. *Decision Support Systems*, 53(3), 499-506.
- Benítez, J., Delgado-Galván, X., Izquierdo, J. & Pérez-García, R. (2015). Consistent completion of incomplete judgments in decision making using AHP. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 290, 412-422.
- Benítez, J., Ilaya-Ayza, A., Izquierdo, J. & Pérez-García, R. (2016). Consistent clustering of elements in large pairwise comparison matrices. *Applied Mathematical Modelling*, submitted.
- Benítez, J., Izquierdo, J., Pérez-García, R. & Ramos-Martínez, E. (2014). A simple formula to find the closest consistent matrix to a reciprocal matrix. *Applied Mathematical Modelling*, 38(15), 3968-3974.
- Bentley Systems. (2009). *Bentley Watercad V8i User's guide*. Bentley Systems.
- Borne, P., Popescu, D., Filip, F. G. & Stefanoiu, D. (2013). *Optimization in engineering sciences*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- Bosserman, B. E. (1999). Pump system hydraulic design. En L. W. Mays, *Water distribution systems handbook*. McGraw-Hill Professional Publishing.
- Brooks, N. (2007). *Imminent Water Crisis in India*. Recuperado el 20 de junio de 2015, de The Arlington Institute: <http://www.arlingtoninstitute.org/wbp/global-water-crisis/606>
- Brunone, B. & Ferrante, M. (2004). Pressure waves as a tool for leak detection in closed conduits. *Urban Water Journal*, 1(2), 145-155.

- Cabrera, E., Izquierdo, J. & Andréu, M. (1997). Introducción al análisis dinámico de redes. *Ingeniería Hidráulica Aplicada a los sistemas de distribución de agua, volumen II*.
- Cabrera-Béjar, J. A. & Tzatchkov, V. G. (2009). Inexpensive Modeling of Intermittent Service Water Distribution Networks. *World Environmental and Water Resources Congress* (págs. 295 - 303). ASCE.
- Cabrera-Béjar, J. A., Palma, J., Cerón, B. & De Jesús, M. (2009). Suministro intermitente de agua potable: caso Chilpancingo. *XXII Congreso Nacional de Hidráulica*. Acapulco.
- Campbell, E., Ilaya-Ayza, A. E., Izquierdo, J. & Pérez-García, R. (2014a). Self organizing maps and clustering techniques to sectorize water supply networks based on energy criteria. *Modelling for engineering & human behaviour*, 16-21.
- Campbell, E., Ilaya-Ayza, A. E., Izquierdo, J. & Pérez-García, R. (2014b). Aplicación del concepto de camino más corto y detección de comunidades para sectorizar redes de abastecimiento de agua potable. *Convención científica de ingeniería y arquitectura*. La Habana, Cuba.
- Campbell, E., Ilaya-Ayza, A., Izquierdo, J. & Pérez-García, R. (2014c). Detección de sectores en redes de abastecimiento de agua potable basada en características operativas y detección de comunidades en redes sociales. *XIII Simposio Iberoamericano de redes de agua, esgoto e drenagem*. Fortaleza, Brasil.
- Campbell, E., Izquierdo, J., Montalvo, I., Ilaya-Ayza, A., Pérez-García, R. & Tavera, M. (2015). A flexible methodology to sectorize water supply networks based on social network theory concepts and multi-objective optimization. *Journal of Hydroinformatics*, jh2015146.
- Canright, D., Chung, J. H. & Stănică, P. (2015). Circulant matrices and affine equivalence of monomial rotation symmetric Boolean functions. *Discrete Mathematics*, 338, 2197-2211.
- Central Public Health and Environmental Engineering Organisation. (2005). *Manual on operation and maintenance of water supply systems*. New Delhi, India: Ministry of Urban Development, World Health Organisation.
- Chandapillai, J., Sudheer, K. P. & Saseendran, S. (2012). Design of water distribution network for equitable supply. *Water resources management*, 26(2), 391-406.
- Charalambous, B. (2001). Water management under drought conditions. *European Conference on Desalination and the Environment: Water Shortage*, (págs. 28-31). Lemesos, Cyprus.
- Charalambous, B. (2012a). The Effects of Intermittent Supply on Water Distribution Networks. *Water Loss 2012*. Manila, Philippines.
- Charalambous, B. (2012b). The hidden costs of resorting to intermittent supplies. *IWA Water Loss Europe 2012 Conference, The specialist Water Loss Conference*. Ferrara, Italy.
- Cheung, P. B., Van Zyl, J. E. & Reis, L. F. (2005). Extension of EPANET for Pressure Driven Demand modeling in water distribution system. *Computer and Control in Water Industry, Water Management for the 21st Century*.
- Coelho, B. & Andrade-Campos, A. (2014). Efficiency achievement in water supply systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 59-84.
- Corcós, G. (2003). *Air in water pipes, A Manual for designers of spring-supplied gravity-driven drinking water rural delivery systems*. Berkeley, CA, U.S.A.: Agua para la Vida.

- Criminisi, A., Fontanazza, C. M., Freni, G. & La Loggia, G. (2009). Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. *Water Science and Technology*, 60(9), 2373-2382.
- Dahasahasra, S. V. (2007). A model for transforming an intermittent into a 24x7 water supply system. *Geospatial today*, 34-39.
- Dantzig, G. B., Orden, A. & Wolfe, P. (1955). The generalized simplex method for minimizing a linear form under linear inequality restraints. *Pacific Journal of Mathematics*, 5(2), 178-183.
- De Marchis, M., Fontanazza, C. M., Freni, G., La Loggia, G., Napoli, E. & Notaro, V. (2010). A model of the filling process of an intermittent distribution network. *Urban Water Journal*, 7(6), 321-333.
- Delgado-Galván, X., Izquierdo, J., Benítez, J. & Pérez-García, R. (2014). Joint Stakeholder Decision-Making on the Management of the Silao-Romita Aquifer Using AHP. *Environmental Modelling & Software*, 51, 310-322.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V. G. & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2013a). Water Network Sectorization based on genetic algorithm and minimum dissipated power paths. *Journal of Water Science and Technology: Water Supply*, 13(4), 951-957.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V. G. & Alcocer-Yamanaka, V. H. (2013b). Water network sectorization based on graph theory and energy performance indices. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(5), 620-629.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1), 269-271.
- Ehrgott, M. & Gandibleux, X. (2002). *Multiple criteria optimization: state of the art annotated bibliographic surveys*. Kluwer Academic Publishers.
- EMASESA. (2005). *Así éramos, así somos. 1975 - 2005*. Obtenido de Aguas de Sevilla: [http://www.aguasdesevilla.com/fileadmin/uploads/tx\\_user\\_embed\\_pdf/ASI\\_ERAMOS\\_ASI\\_SOMOS.pdf](http://www.aguasdesevilla.com/fileadmin/uploads/tx_user_embed_pdf/ASI_ERAMOS_ASI_SOMOS.pdf)
- Ercumen, A., Arnold, B. F., Kumpel, E., Burt, Z., Ray, I., Nelson, K. & Colford Jr., J. M. (2015). Upgrading a piped water supply from intermittent to continuous delivery and association with waterborne illness: A matched cohort study in urban India. *PLoS Medicine*, 12(10).
- Fan, L., Liu, G., Wang, F., Ritsema, C. J. & Geissen, V. (2014). Domestic water consumption under intermittent and continuous modes of water supply. *Water Resource Management*, 28, 853-865.
- Fantozzi, M. & Lambert, A. (2007). Including the effects of pressure management in calculations of Short-Run Economic Leakage Levels. *IWA Conference Water Loss*.
- Farley, M. (2001). *Leakage Management and Control, a best practice training manual*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Farley, M. (2010). Are there alternatives to DMA? *Asian Water*, 26(10), 10-16.
- Farley, M. & Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks: a practitioner's guide to assessment, monitoring and control*. IWA Publishing.

- Faure, F. & Pandit, M. (2010). *Intermittent Water Distribution*. Obtenido de Sustainable Sanitation and Water Management: <http://www.sswm.info/category/implementation-tools/water-distribution/hardware/water-distribution-networks/intermittent-w>
- Fontanazza, C. M., Freni, G., La Loggia, G., Notaro, V. & Puleo, V. (2013). Evaluation of the Water Scarcity Energy Cost for Users. *Energies*, 6, 220-234.
- Franceys, R. & Jalakam, A. (2010). *The Karnataka Urban Water Sector Improvement Project. 24x7 Water Supply is Achievable*. Obtenido de Water and Sanitation Program: [http://www.wsp.org/sites/wsp.org/files/publications/WSP\\_Karnataka-water-supply.pdf](http://www.wsp.org/sites/wsp.org/files/publications/WSP_Karnataka-water-supply.pdf)
- Fuertes, V., Izquierdo, J., Iglesias, P., Cabrera, E. & García-Serra, J. (1997). Llenado de tuberías con aire atrapado. *Ingeniería del Agua*, 4(3), 53 - 63.
- Geldreich, E. E. (1996). *Microbial quality of water supply in distribution systems*. Boca Raton, Florida: CRC Lewis Publishers.
- Gen, M., Cheng, R. & Lin, L. (2008). *Network models and optimization: Multiobjective genetic algorithm approach*. Springer Science & Business Media.
- Ghazinoory, S., Aliahmadi, A., Namdarzangeneh, S. & Ghodsypour, S. (2007). Using AHP and L.P. for choosing the best alternatives based the gap analysis. *Applied Mathematics and Computation* 184, 316-321.
- Ghodsypour, S. & O'Brien, C. (1998). A decision support system for supplier selection using an integrated analytic hierarchy process and linear programming. *International Journal Production Economics*, 199-212.
- Gleick, P. H. (1996). Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs. *Water International*, 21, 83-92.
- Golberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison wesley.
- Gomes, R., Sá Marques, A. & Sousa, J. (2012). Identification of the optimal entry points at District Metered Areas and implementation of pressure management. *Urban Water Journal*, 9(6), 365-384.
- Gottipati, P. V. & Nanduri, U. V. (2014). Equity in water supply in intermittent water distribution networks. *Water and Environment Journal*, 28(4), 509-515.
- Güler, O. (2010). *Foundations of optimization*. Springer Science & Business Media.
- Gupta, R. & Bhave, P. (1996). Comparison of methods for predicting deficient-network performance. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(3), 214-217.
- Haddad, M., Mcneil, L. & Omar, N. (2014). Model for Predicting Disinfection By-product (DBP) Formation and Occurrence in Intermittent Water Supply Systems: Palestine as a Case Study. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(8), 5883-5893.
- Hajebi, S., Temate, S., Barrett, S., Clarke, A. & Clarke, S. (2014). Water Distribution Network Sectorisation Using Structural Graph Partitioning and Multi-objective Optimization. *Procedia Engineering*, 89, 1144-1151.
- Hamilton, S., Mckenzie, R. & Seago, C. (2006). A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply. *UK House of Commons Report*.
- Han, J., Kamber, M. & Pei, J. (2012). *Data Mining: Concepts and techniques*. Morgan Kaufmann.

- Harris, J., Hirst, J. & Mossinghoff, M. (2008). *Combinatorics and Graph Theory*. New York: Springer.
- Herrera, A. M. (2011). Improving water network management by efficient division into supply clusters. *PhD Thesis*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Howard, G. & Bartram, J. (2003). *Domestic water quantity, service level, and health*. Geneva: World Health Organization.
- Hunter, P. R., Zmirou-Navier, D. & Hartemann, P. (2009). Estimating the impact on health of poor reliability of drinking water interventions in developing countries. *Science of The Total Environment*, 407, 2621-2624.
- Iglesias, P., Fuertes, V. & Pérez, R. (2010). *Fluidos incompresibles, flujo transitorio en conductos cerrados*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Iglesias, P., López, G., Martínez, F. & Fuertes, V. (2002). Determinación de esquemas de producción en abastecimientos de agua utilizando la curva de consigna. *Seminario Hispano-Brasileño sobre Planificación, Proyecto y Operación de Redes de Abastecimiento de Agua*, (págs. 267-280). Valencia, España.
- Iglesias-Rey, P. L., Oyarzún, S. A., Martínez, F. J. & Martínez, P. D. (2012). Optimización energética de las redes de abastecimiento de agua del campo de Murcia (España). *XI Seminario Iberoamericano sobre sistemas de abastecimiento y drenaje*. Coimbra, Portugal.
- Ilaya-Ayza, A.E., Ayala-Cabrera, D., Pérez-García, R. & Izquierdo, J. (2015a). Características y aplicaciones de la curva de consigna. *XIV Seminario Iberoamericano de redes de agua y drenaje*. Guanajuato, México.
- Ilaya-Ayza, A.E., Campbell, E., Pérez-García, R. & Izquierdo, J. (2014). Optimización multiobjetivo de horarios de suministro en sistemas de abastecimiento intermitente. *XIII Simpósio Iberoamericano de redes de água, esgoto e drenagem*. Fortaleza, Brasil.
- Ilaya-Ayza, A.E., Campbell, E., Pérez-García, R. & Izquierdo, J. (2015b). Análisis de la reducción de la capacidad de la red y su relación con el suministro intermitente de agua. *XIV Seminario Iberoamericano de redes de agua y drenaje*. Guanajuato, México.
- Ilaya-Ayza, A.E., Campbell, E., Pérez-García, R. & Izquierdo, J. (2015c). La problemática de los sistemas de suministro de agua intermitentes. Aspectos generales. *Revista Ingeniería de Obras Civiles*, 5, 33-41.
- Ilaya-Ayza, A.E., Izquierdo, J., Pérez-García, R. & Campbell, E. (2015e). Ampliación de la capacidad de la red como parte de la transición de suministro de agua intermitente a suministro continuo. *Seminario Euro Latinoamericano de Sistemas de Ingeniería*. Huaraz, Perú.
- Ilaya-Ayza, A.E., Campbell, E., Pérez-García, R., Izquierdo, J. (2016a). Network capacity assessment and increase in systems with intermittent water supply. *Water*, 8(4), 126.
- Ilaya-Ayza, A., Benítez, J., Izquierdo, J., Pérez-García, R. (2016b). Multi-criteria optimization of supply schedules in intermittent water supply systems. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Accepted.
- Indian Water Works Association (IWWA). (2000). International Seminar on Intermittent Drinking Water Supply System Management: Technical Papers. Proceeding for the International Seminar on Intermittent Drinking Water Supply System Management. Mumbai, India.

- INE - Bolivia. (2014). *Instituto Nacional de Estadística, Censo 2012*. Obtenido de [www.ine.gob.bo: http://datos.censosbolivia.bo/comunitaria/comunitaria/mpComunitariaVer.aspx?Depto=04&Prov=01&Seccion=01](http://datos.censosbolivia.bo/comunitaria/comunitaria/mpComunitariaVer.aspx?Depto=04&Prov=01&Seccion=01)
- INE - Bolivia. (2015). *Población por censos según departamento, área geográfica y sexo, censos de 1950 - 1976 -1992 - 2001*. Recuperado el 20 de Marzo de 2015, de Instituto Nacional de Estadística: <http://www.ine.gob.bo/indice/visualizador.aspx?ah=PC20111.HTM>
- Ingeduld, P., Svitak, Z., Pradhan, A. & Tarai, A. (2006). Modelling intermittent water supply systems with EPANET. *8th annual WD symposium*. Cincinnati.
- International Water Management Institute. (2007). *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. London: International Water Management Institute.
- Ishizaka, A. & Nemery, P. (2013). *Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software*. Wiley, Chichester.
- Islam, S. & Alekal, P. (2009). *Achieving 24x7 water and waterloss management in intermittent supply environment*. Recuperado el 15 de Oct de 2013, de [iwaterwiki.org: http://www.iwaterwiki.org/xwiki/bin/view/Articles/Achieving24x7waterandwaterlossmanagementinintermittentsupplyenvironment](http://www.iwaterwiki.org/xwiki/bin/view/Articles/Achieving24x7waterandwaterlossmanagementinintermittentsupplyenvironment)
- Izquierdo, J., Benitez, J., Ilaya-Ayza, A. E. & Pérez-García, R. (2014). Toma de decisiones con AHP ante información imperfecta, aplicación a la gestión de fugas de agua. *XIII Simposio Iberoamericano de redes de agua, esgoto e drenagem*. Fortaleza, Brasil.
- Izquierdo, J., Fuertes, V., Cabrera, E., Iglesias, P. & Garcia-Serra, J. (1999). Pipeline start-up with entrapped air. *Journal of hydraulic research*, 37(5), 579-590.
- Izquierdo, J., Herrera, M., Montalvo, I. & Pérez-García, R. (2011). Division of water supply systems into district metered areas using a multi-agent based approach. En *Software and Data Technologies* (págs. 167-180). Springer Berlin Heidelberg.
- Izquierdo, J., Pérez-García, R. & Iglesias, P. (2004). Mathematical Models and Methods in the Water Industry. *Mathematical and Computer Modelling*, 39, 1353-1374.
- Jain, A. K. (1988). *Algorithms for clustering data*. New Jersey: Englewood Cliffs: Prentice hall.
- Kingdom, B., Liemberger, R. & Marin, P. (2006). The Challenge of Reducing The Challenge of Reducing in Developing Countries, How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting. En *Water Supply and Sanitation board discussion paper series*. Washington, DC, U.S.A.: The World Bank Group.
- Knobelsdorf, J. & Mujeriego, R. (1997). Crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua potable: una revisión bibliográfica. *Ingeniería del agua*, 4(2), 17-28.
- Kumar, S. & Managi, S. (2010). Service Quality and Performance Measurement: Evidence from the Indian Water Sector. *International Journal of Water Resources Development*, 26, 173-191.
- Kumpel, E. & Nelson, K. L. (2013). Comparing microbial water quality in an intermittent and continuous piped water supply. *Water Research*, 47, 5176-5188.
- Kumpel, E. & Nelson, K. L. (2014). Mechanisms affecting water quality in an intermittent piped water supply. *Environmental science & technology*, 48(5), 2766-2775.

- Lambert, A. (2000). What do we know about pressure: Leakage relationships in distribution systems? *Proceedings of IWA Conference 'System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management'*. Brno, Czech Republic.
- Lambert, A. O. & Fantozzi, M. (2005). Recent advances in calculating economic intervention frequency for active leakage control, and implications for calculation of economic leakage levels. *Water Science & Technology: Water Supply*, 5(6), 263-271.
- Lambert, A. O. & Hirner, W. (2000). Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. *International Water Association*.
- Lambert, A. & Lalonde, A. (2005). Using practical predictions of Economic Intervention Frequency to calculate Short-run Economic Leakage Level, with or without Pressure Management. *Proceedings of IWA Specialised Conference 'Leakage'*.
- Lansey, K. E. (2002). Optimal design of water distribution systems. En L. W. Mays, *Urban water supply handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Lara, T. (2001). Matrices circulantes. *Divulgaciones Matemáticas*, 9(1), 85-102.
- Lee, E. & Schwab, K. (2005). Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of Water and Health*, 3, 109-127.
- López Ortí, J. A. (2010). *Métodos matemáticos*. Castelló de la Plana: Universitat Jaume I.
- Manohar, U. & Kumar, M. S. (2014). Modeling equitable distribution of water: Dynamic Inversion-based controller approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(5), 607-619.
- Mansoor, M. A. & Vairavamoorthy, K. (2003). Need for pressure dependent demand in analysing failure of pipe networks. En Č. Maksimović, D. Butler & F. A. Memon, *Advances in Water Supply Management* (págs. 217-225). Lisse, The Netherlands: Swets & Zeitlinger.
- Martinelly, E. (2009). *Proyecto Cábala - Procesos de integración sociocultural y económica en ciudades capitales de Bolivia*. Recuperado el 18 de Marzo de 2015, de <http://www.pieb.org/cabala/principal.html>
- Martínez, F., Vidal, R. & Andrés, M. (2009). La regulación de los sistemas hidráulicos. En E. Cabrera, V. Espert, J. García-Serra & F. Martínez, *Ingeniería Hidráulica aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua* (3ª ed., Vol. II). Valencia, España: ITA-UPV.
- Mason, A. J. & Dunning, I. (2010). OpenSolver: Open Source Optimisation for Excel. *45th Annual Conference of the ORSNZ*, (págs. 181 - 190). Auckland, New Zealand.
- Maurya, S., Bind, Y. K. & Srivastava, V. (2008). Cost Estimation and Comparative study of Intermittent & Continuous Water Supply System of Dulhi Village, Kheri. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 668 - 672.
- Mays, L. W. (2000). *Water distribution systems handbook*. New York: McGraw-Hill.
- McIntosh, A. C. (2003). *Asian water supplies. Reaching the Urban Poor*. Asian Development Bank.
- McKenzie, D. & Ray, I. (2009). Urban water supply in India: status, reform options and possible lessons. *Water Policy*, 11, 442-460.
- Meneghin, M. (1999). Fabbisogno, consumi, portate e perdite nella pratica di esercizio delle reti di distribuzione d'acqua potabile a sollevamento meccanico. *L'Acqua*, N°4, 55-65.

- Mermin, J. H., Villar, R., Carpenter, J., Roberts, L., Gasanova, L., Lomakina, S., . . . Mintz, E. (1999). A massive epidemic of multidrug-resistant typhoid fever in Tajikistan associated with consumption of municipal water. *Journal of Infectious Diseases*, 179(6), 1416-1422.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia. (2011). *Reglamento Nacional de Instalaciones Sanitarias Domiciliarias*. La Paz: Ministerio de Medio Ambiente y Agua - Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico.
- Ministerio de Servicios y Obras Públicas de Bolivia. (2004). *NB 512 - Norma Boliviana, Agua Potable - Requisitos*. La Paz: Ministerio de Servicios y Obras Públicas - Viceministerio de Servicios Básicos.
- Ministerio de Servicios y Obras Públicas de Bolivia. (2004). *NB 689 - Norma Boliviana, Instalaciones de agua - Diseño para sistemas de agua potable*. La Paz: Ministerio de Servicios y Obras Públicas de Bolivia - Viceministerio de Servicios Básicos.
- Mohapatra, S., Sargaonkar, A. & Labhasetwar, P. K. (2014). Distribution network assessment using EPANET for intermittent and continuous water supply. *Water resources management*, 28(11), 3745-3759.
- Morais, H., Kádár, P., Faria, P., Vale, Z. A. & Khodr, H. (2010). Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming. *Renewable Energy*, 151-156.
- Moreno-Jimenez, J. (1996). Metodología multicriterio en el Plan Nacional de Regadíos.
- Morrison, J., Tooms, S. & Rogers, D. (2007). District Metered Areas Guidance Notes. En *International Water Association (IWA), specialist group on efficient operation and management of urban water distribution systems, water loss task force*. London, U.K.
- Mrunalini, R. (2015). Water supply scheme to provide 24 x 7 water case study: science city area (zone-i), Ahmedabad. *Sarjan SOJET Journal of Engineering & Technology*, 12-22.
- Neelakantan, T., Rammurthy, D., Smith, S. T. & Suribabu, C. (2014). Expansion and Upgradation of Intermittent Water Supply System. *Asian Journal of Applied Sciences*, 7, 470-485.
- Nocedal, J. & Wright, S. (2006). *Numerical optimization*. Springer Science & Business Media.
- ONU. (8 de Septiembre de 2000). Declaración del Milenio. *Resolución aprobada por la Asamblea General, 8a. sesión plenaria*. New York.
- Oyarzún, S. A. (2011). Optimización energética de las redes de abastecimiento de Murcia. *Trabajo fin de Máster*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Palisade Corporation. (2010). *Guía para el uso de Evolver, solver de algoritmo genético para Microsoft Excel*. Ithaca, NY USA.
- Pardo, M. A. (2010). Influencia de los costes del agua y la energía en la renovación de tuberías. *Tesis doctoral*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Pathirana, A. (2010). EPANET2 Desktop Application for Pressure Driven Demand Modeling. *Water Distribution Systems Analysis. Water Distribution System Analysis 2010 - WDSA2010*, (págs. 65-74). Tuscon, AZ, USA.
- Pérez, R. (1993). Dimensionamiento óptimo de redes de distribución de agua ramificadas considerando los elementos de regulación. *Tesis doctoral*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València.

- Pérez, R., Iglesias, P. & Fuertes, V. (2005). *Flujo estacionario de fluidos incompresibles en tuberías*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Planells, P., Carrión, P., Ortega, J., Moreno, M. & Tarjuelo, J. (2005). Pumping Selection and Regulation for Water-Distribution Networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(3), 273-281.
- Planells, P., Tarjuelo, J. & Ortega, J. (2001). Optimización de estaciones de bombeo en riego a la demanda. *Ingeniería del agua*, 8(1), 39-51.
- Prescott, S. L., Ulanicki, B. & Shipley, N. (2003). Analysis of district metered area (DMA) performance. En C. Maksimović, D. Butler & F. A. Memon, *Advances in water supply management* (págs. 59-67). Taylor & Francis.
- Puusta, R., Kapelan, Z., Savic, D. & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25-45.
- Ramos, E. (2016). Assessing biofilm development in drinking water distribution systems by Machine Learning Methods. *Tesis doctoral*. Universitat Politècnica de València.
- Ratnayaka, D. D., Brandt, M. J. & Johnson, M. (2009). *Water Supply*. Butterworth-Heinemann.
- Rivera, J. (2014). Clustering de series de tiempo con datos categóricos. A Coruña: Universidade da Coruña.
- Rokach, L. & Maimon, O. (2005). Clustering methods. En *Data mining and knowledge discovery handbook* (págs. 321-352). Springer US.
- Rosenberg, D. E., Tarawneh, T., Abdel-Khaleq, R. & Lund, J. R. (2007). Modeling integrated water user decisions in intermittent supply systems. *Water Resources Research*, 43(7).
- Rossman, L. (1999). Computer models/EPANET. En L. W. Mays, *Water distribution systems handbook*. McGraw-Hill Professional Publishing.
- Rossman, L. (2000). *Epanet 2 - Users Manual*. Cincinnati, U.S.A.: EPA.
- Saaty, T. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European journal of operational research*, 145(1), 85-91.
- Saaty, T. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *Royal Spanish Academy of Sciences. Series A, Mathematics*, 102(2), 251-318.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281.
- Saaty, T. L. & Vargas, L. (2012). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. New York: Springer.
- Sargaonkar, A., Kamble, S. & Rao, R. (2013). Model study for rehabilitation planning of water supply network. *Computers, Environment and Urban Systems*, 39, 172-181.
- SeLA - Oruro. (Enero. de 2013). *Audiencia Pública Final - Gestión 2012*. Obtenido de Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado (SeLA - Oruro): [http://selaoruro.gob.bo/docs/audiencia\\_final\\_2012.pdf](http://selaoruro.gob.bo/docs/audiencia_final_2012.pdf)

- Selvakumar, A., Clark, R. M. & Sivaganesan, M. (2002). Costs for water supply distribution system rehabilitation. *Journal of water resources planning and management*, 128(4), 303-306.
- Semenza, J. C., Roberts, L., Henderson, A., Bogan, J. & Rubin, C. H. (1998). Water distribution system and diarrheal disease transmission: a case study in Uzbekistan. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 59(6), 941-946.
- SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia. (2013). *Datos climáticos mensuales*. Obtenido de [www.senamhi.gob.bo](http://www.senamhi.gob.bo): <http://www.senamhi.gob.bo/meteorologia/formularioboletinmensual.php>
- Shammas, N. K. & Wang, L. K. (2015). *Water Engineering: Hydraulics, Distribution and Treatment*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- Sivanandam, S. N. & Deepa, S. N. (2007). *Introduction to genetic algorithms*. Springer Science & Business Media.
- Soltanjilili, M.-J., Haddad, O. B. & Mariño, M. A. (2013). Operating Water Distribution Networks during Water Shortage Conditions Using Hedging and Intermittent Water Supply Concepts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 644-659.
- Sridhar, S. (2013). Intermittent water supplies: where and why they are currently used and why their future use should be curtailed. *Master thesis*. Toronto, Canada: University of Toronto.
- Stewart, G. (2001). *Matrix algorithms volume 2: eigensystems*. SIAM.
- Swamee, P. K. & Sharma, A. K. (2008). *Design of water supply pipe networks*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Tavera, M. (2013). Metodología para la gestión y planificación de un sistema de agua potable intermitente. *Tesis doctoral*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Thornton, J. & Lambert, A. (2005). Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships. *Proceedings of IWA Special Conference*, (págs. 12-14).
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115-122.
- Todini, E. & Pilati, S. (1988). A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. *Computer applications in water supply: vol. 1 - systems analysis and simulation*, 1-20.
- Tokajian, S. & Hashwa, F. (2003). Water quality problems associated with intermittent water supply. *Water Sci Technol.*, 47(3), 229-234.
- Tokajian, S. & Hashwa, F. (2004). Phenotypic and genotypic identification of *Aeromonas* spp. isolated from a chlorinated intermittent water distribution system in Lebanon. *Journal of Water and Health*, 2, 115-122.
- Totsuka, N., Trifunovic, N. & Vairavamoorthy, K. (2004). Intermittent urban water supply under water starving situations. *30th WEDC International Conference*, (págs. 505 - 512). Vientiane, Laos.
- Tsegaye, S., Eckart, J. & Vairavamoorthy, K. (2011). Urban water management in cities of the future: emerging areas in developing countries. *On the water front*, 42 - 48.
- Twort, A. C., Ratnayaka, D. D. & Brandt, M. J. (2000). *Water supply*. Butterworth-Heinemann.

- Tzatchkov, V. G., Alcocer-Yamanaka, V. H. & Rodriguez-Varela, J. M. (2006). Water distribution network sectorization projects in Mexican cities along the border with USA. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Transboundary Water Management*, (págs. 1-13).
- Tzatchkov, V., Alcocer, V. H. & Bourguett, V. (2008). Sectorización de redes de distribución de agua potable a través de algoritmos basados en la teoría de grafos. *Tlálloc. Asociación Mexicana de Hidráulica*, 40, 14-22.
- Ulanicki, B., AbdelMeguid, H., Bounds, P. & Patel, R. (2008). Pressure control in District Metering Areas with boundary and internal pressure reducing valves. *The 10th International Water Distribution System Analysis Conference WDSA2008*, (págs. 691-703). Kruger National Park, South Africa.
- Vaidya, O. & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169, 1-29.
- Vairavamoorthy, K. & Elango, K. (2002). Guidelines for the design and control of intermittent water distribution systems. *Waterlines*, 21(1), 19-21.
- Vairavamoorthy, K., Akinpelu, E., Lin, Z. & Ali, M. (2001). Design of sustainable water distribution systems in developing countries. *ASCE conference*, (págs. 20 - 24). Orlando, Florida.
- Vairavamoorthy, K., Ali, M. & Lin, Z. (2000). An appropriate design tool for intermittent water supply systems. *Proc. Of the international seminar on Intermittent drinking Water Supply System Management* (págs. 17 - 18). Mumbai: IWWA.
- Vairavamoorthy, K., Gorantiwar, S. D. & Pathiranaa, A. (2008). Managing urban water supplies in developing countries – Climate change and water scarcity scenarios. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 330–339.
- Van den Berg, C. & Danilenko, A. (2011). *The IBNET Water Supply and Sanitation Performance Blue Book*. Washington D.C.: The World Bank.
- Vasan, A. & Simonovic, S. P. (2010). Optimization of Water Distribution Network Design Using Differential Evolution. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 279-287.
- Vela, A., Días, J. & Aguirre, A. (1996). Gestión técnica de Sistemas de Abastecimiento. *Ingeniería Hidráulica Aplicada a los sistemas de distribución de agua, volumen II*.
- Walski, T. (2001). The Wrong Paradigm—Why Water Distribution Optimization Doesn't Work. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(4), 203–205.
- Walski, T. M. & Male, J. M. (2002). Maintenance and rehabilitation/replacement. En L. W. Mays, *Urban water supply handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Walski, T. M., Chase, D., Savic, D., Grayman, W., Beckwith, S. & Koelle, E. (2003). *Advanced water distribution modeling and management*. Haestad press.
- Woo, C. K. (1994). Managing water supply shortage: Interruption vs. pricing. *Journal of Public Economics*, 54, 145-160.
- World Health Organization & UNICEF. (2013). *Progress on sanitation and drinking-water - 2013 update*. WHO - UNICEF.

- World Health Organization. (2003). *Constraints affecting the development of the water supply and sanitation sector*. Recuperado el 20 de julio de 2015, de World Health Organization: [http://www.who.int/docstore/water\\_sanitation\\_health/wss/constraints.html](http://www.who.int/docstore/water_sanitation_health/wss/constraints.html)
- Wu, Z. Y., Wang, R. H., Walski, T. M., Yung, S. Y., Bowdler, D. & Baggett, C. C. (2006). Efficient pressure dependent demand model for large water distribution system analysis. *8<sup>o</sup> Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis*. Cincinnati, Ohio.
- Yepes, G., Ringskog, K. & Sarkar, S. (2001). The High Cost of Intermittent Water Supplies. *Journal of Indian Water Works Association*, 33.
- Ziegler, D., Sorg, F., Fallis, P., Hübschen, K., Happich, L., Baader, J., Knobloch, A. (2012). *Guidelines for water loss reduction, A focus on pressure management*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and VAG Armaturen GmbH.