

Título del Trabajo Fin de Máster:

***METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE
HORARIOS DE SUMINISTRO EN
SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO
INTERMITENTE, CASO DE ESTUDIO:
ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO
(BOLIVIA)***

Intensificación:

HIDRÁULICA URBANA

Autor:

ILAYA AYZA, AMILKAR ERNESTO

Director/es:

DR. PÉREZ GARCÍA, RAFAÉL

DR. IZQUIERDO SEBASTIÁN, JOAQUÍN

Fecha: **JULIO, 2014**

Título del Trabajo Fin de Máster:
METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE, CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO (BOLIVIA)

Autor: **ILAYA AYZA AMILKAR ERNESTO**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	RAFAÉL PÉREZ GARCÍA	Fecha de Lectura	JULIO, 2014
Codirector1	JOAQUÍN IZQUIERDO SEBASTIÁN		
Codirector2			
Tutor	RAFAÉL PÉREZ GARCÍA		

Resumen:

Actualmente, el suministro por horas es la forma de acceso al agua para millones de personas en el mundo. 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 pueden llevar a que el uso de suministro intermitente sea más frecuente.

Debido a la idea de lograr mayor control sobre la cantidad de agua que se distribuye, las empresas de agua muchas veces recurren a establecer horarios de suministro con poco criterio hidráulico, considerando solamente la cantidad de horas de suministro y caudales o volúmenes disponibles, de esta forma se tienen horarios de gran consumo con caudales mucho más grandes que los demandados en horas pico de los sistemas continuos.

Una respuesta lógica a esta problemática es reducir los caudales punta, aprovechando la posibilidad de modificación de la curva de oferta de caudal en base al cambio de horarios de suministro de cada uno de los sectores, la situación de suministro ideal en un sistema intermitente sería aquella en la que se reduzcan al mínimo los picos de consumo.

El presente trabajo aporta con una propuesta de solución para la gestión técnica de los sistemas de suministro intermitente, la cual proporcionará resultados a corto plazo y que requiere de poca inversión para su logro. No se busca perpetuar el sistema de suministro intermitente por el contrario la presente metodología puede ser una herramienta muy útil en la transición gradual de un sistema intermitente a uno continuo.

Para la selección de los sectores que modificarán sus horarios deben considerarse condiciones hidráulicas y de operaciones de la red, con este fin se utilizarán técnicas de decisión multicriterio (AHP), para posteriormente realizar la optimización de los horarios de suministro utilizando programación lineal. El cálculo hidráulico fue realizado con un análisis de demanda dependiente de la presión.

Resum:

Actualment, el subministrament per hores és la forma d'accés a l'aigua per a milions de persones en el món. Alguns investigadors suggereixen que la creixent escassetat d'aigua a causa del canvi climàtic i l'augment de la demanda per l'increment de la població pot portar que l'ús de subministrament intermitent siga més freqüent.

A causa de la idea d'aconseguir major control sobre la quantitat d'aigua que es distribueix, les empreses d'aigua moltes vegades recorren a establir horaris de subministrament amb poc criteri hidràulic, considerant només la quantitat d'hores de subministrament i cabals o volums disponibles, d'esta manera es tenen horaris de gran consum, amb cabals molt més grans que els demandats en hores pic dels sistemes continus.

Una resposta lògica a esta problemàtica és reduir els cabals punta, aprofitant la possibilitat de modificació de la corba d'oferta de cabal basant-se en el canvi d'horaris de subministrament

de cada un dels sectors, la situació de subministrament ideal en un sistema intermitent seria aquella en què es reduïsquen al mínim els pics de consum.

El present treball aporta amb una proposta de solució per a la gestió tècnica dels sistemes de subministrament intermitent, la qual proporcionarà resultats a curt termini i que requereix de poca inversió per al seu èxit. No es busca perpetuar el sistema de subministrament intermitent, al contrari, la present metodologia pot ser una ferramenta molt útil en la transició gradual d'un sistema intermitent a un continu.

Per a la selecció dels sectors que modificaran els seus horaris han de considerar-se condicions hidràuliques i d'operacions de la xarxa, amb este fi s'utilitzaran tècniques de decisió multicriteri (AHP) , per a posteriorment realitzar l'optimització dels horaris de subministrament utilitzant programació lineal. El càlcul hidràulic va ser realitzat amb una anàlisi de demanda dependent de la pressió.

Abstract:

Currently, intermittent supply is how millions of people get access to water worldwide. Some researchers suggest that the increasing water scarcity due to climate change and the enlarged demand by the growing number of people can lead to the more frequently use of intermittent supply.

Because of having more control over the amount of water distributed, water service companies often resort to establish water supply schedules neglecting hydraulic criteria and considering only the number of supply hours and flows or water volume available. Thus, the system is demanded by high consumption hours with much larger flows than peaking demand in a continuous system.

A logical answer to this problem is to reduce peak flows being able to modify the flow-supply curve based on the change of water supply schedules of each sector. The ideal situation in an intermittent supply system would be the one in which peak consumption minimizes.

This study proposes an alternative solution for the technical management of intermittent supply systems. It provides short-term results and requires little investment to be achieved. Nevertheless, to perpetuate the intermittent supply system is not the goal but this methodology can be a useful tool in a gradual transition from an intermittent supply to a continuous supply.

For the selection of the sectors that will change their schedules to be considered hydraulic conditions and network operations. For this purpose, multicriteria decision techniques (AHP) will be used, so that optimization of supply schedules using linear programming can be achieved. The hydraulic calculation is performed with an analysis of Pressure Dependent Demand.

Palabras clave:

Horario de suministro/ suministro intermitente/ análisis multicriterio/ programación lineal / Demanda dependiente de la presión

Dedicatoria.

*A la memoria de mi madre, Juana Ayza, a un
año de su partida. A Wandita Sanjinés, mi
esposa, por su apoyo de siempre.*

Agradecimientos

A Dios, por permitirme estar aquí alcanzando esta meta.

A Wanda, mi esposa, por su amor y comprensión.

A mis padres, Segundino y Juana, quienes hicieron lo que soy; a mis suegros, Julio y Dora, por su cariño y apoyo; a mis hermanos Melina, Ximena, Pamela y José Antonio; a mis cuñados Vivian, Jeannine, Julio y Christopher; a mis abuelitos Ernesto, Teófila y Felipe y al abuelito de mi esposa Benedicto por sus sabios consejos.

A los Directores del presente trabajo, Rafael Pérez y Joaquín Izquierdo, por su amistad y su apoyo técnico y moral.

A todos los profesores del Master en ingeniería hidráulica y medio ambiente, de quienes aprendí mucho. A mis profesores de grado en la Universidad Técnica de Oruro, con quienes me introduje en el campo del agua.

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.

A todos mis amigos, los que tengo en Bolivia y los que hice aquí.

Contenido

CAPÍTULO 1. INTRODUCCION.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos	4
CAPÍTULO 2. PROBLEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE.....	6
2.1. Introducción.....	6
2.2. Sistema de abastecimiento intermitente.....	6
2.2.1. Inconvenientes de los sistemas de suministro intermitente.....	8
2.2.2. Ventajas de los sistemas de suministro intermitente.....	10
2.3. Clasificación de los sistemas intermitentes	11
2.3.1. Categorización de la escasez de agua.....	11
2.3.2. Categorización para el origen de los problemas	12
2.3.3. Medidas adecuadas	13
2.4. Estructura de un sistema de abastecimiento de agua	13
2.4.1. Tipos de redes de abastecimiento.....	14
2.5. Características del consumo de agua	14
2.5.1. Consumo domestico	15
2.5.2. Consumo público.....	15
2.5.3. Consumo industrial.....	15
2.5.4. Consumo comercial.....	15
2.5.5. Fugas y desperdicios	16
2.5.6. Dotación media	16
2.6. Factor pico	17
2.6.1. Factor pico en un sistema intermitente	18
2.7. Curva de modulación.....	19
2.7.1. Curva de modulación en un sistema intermitente.....	20
2.8. Balance hídrico	23
2.8.1. Volumen de ingreso al sistema	25
2.8.2. Consumo autorizado	25
2.8.3. Agua facturada	25
2.8.4. Agua no facturada.....	25
2.8.5. Pérdidas de agua.....	26
2.9. Pérdidas de agua en el sistema de abastecimiento.....	26
2.9.1. Pérdidas de agua en la red de distribución	27

2.9.2. Pérdidas reales.....	28
2.9.3. Pérdidas aparentes	30
2.9.4. Pérdidas en sistemas de suministro intermitente.	31
2.9.5. Hidráulica de fugas.....	32
2.9.6. Sectorización y Distritos Hidrométricos DMA.....	34
2.10. Principios hidráulicos en conducciones a presión	37
2.10.1. Ecuación de continuidad.....	37
2.10.2. Ecuación de Bernoulli	38
2.10.3. Pérdidas de carga.....	39
2.11. Hidráulica de redes	41
2.12. Características hidráulicas de un sistema intermitente	42
2.12.1. Demanda dependiente de la presión.....	42
2.12.2. Presencia de aire en el suministro intermitente.....	47
2.13. Simulación y modelado de redes.....	47
2.13.1. Modelos de análisis estático.....	49
2.13.2. Modelos de análisis dinámico.....	49
2.13.3. El proceso de modelado	49
2.13.4. Calibración del modelo	51
2.13.5. Simulación y modelado en sistemas de suministro intermitente	52
2.14. Optimización	54
2.14.1. Algoritmos de optimización	55
2.14.2. Programación lineal.....	55
2.15. Decisión multicriterio	58
2.15.1. Variables explicativas.....	58
2.15.2. Normalización de variables	59
2.15.3. Proceso Analítico Jerárquico (AHP).....	59
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO.....	64
3.1. Introducción.....	64
3.2. Conocimiento del sistema de suministro	64
3.3. Descripción general de la metodología.....	64
3.4. Categorización del sistema de suministro intermitente.....	67
3.5. Recolección de información, datos mensuales durante una gestión	67
3.5.1. Base de Datos de Clientes.....	68
3.5.2. Base de Datos de la Red	68
3.6. Volumen de consumo facturado medido y no medido.....	68
3.7. Balance Hídrico anual	68
3.8. Reparto del volumen no facturado o pérdidas en cada sector	69
3.8.1. Corrección de la demanda mediante el porcentaje de pérdidas.....	69

3.8.2. Representación de las fugas como consumos dependientes de la presión.....	69
3.8.3. Asignación del caudal de fugas mediante un caudal medio constante	69
3.9. Elección del mes de condiciones más desfavorables.	70
3.10. Balance Hídrico mensual	70
3.11. Caudal medio del periodo de suministro.....	70
3.12. Curva de oferta y curva de suministro.....	72
3.13. Volumen de regulación del depósito	73
3.14. Ajuste del modelo con niveles del depósito	73
3.15. Cálculo hidráulico escenario actual	74
3.15.1. Demanda en función de la presión.....	75
3.15.2. Presión en función del caudal demandado.....	75
3.15.3. Análisis del incremento de la presión y su incidencia en la demanda en un sistema intermitente.....	76
3.16. Diagnóstico del sistema actual	77
3.17. Escenario propuesto, elección de criterios para el cambio de horario de los sectores	78
3.17.1. Cuantificación de los factores que inciden en la selección del sector para su cambio de horario	79
3.17.2. Optimización del horario de suministro	83
3.18. Cálculo hidráulico de los escenarios propuestos.....	87
3.19. Elección del escenario.....	87
CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO	88
4.1. Introducción.....	88
4.2. Descripción del área de estudio	89
4.2.1. Localización geográfica	89
4.2.2. Clima.....	90
4.2.3. Topografía.....	91
4.2.4. Población.....	91
4.2.5. Características socioeconómicas	93
4.3. Características del abastecimiento de agua	93
4.3.1. Características de la conexión domiciliaria.....	97
4.3.2. SeLA – Oruro	98
4.3.3. Descripción de la zona sur	100
4.4. Modelo inicial del sistema – Escenario actual.....	101
4.4.1. Categorización del sistema de suministro intermitente	102
4.4.2. Recolección de información – volumen de entrada al sistema en forma mensual.....	102
4.4.3. Recolección de información – volumen de consumo facturado medido.....	106
4.4.4. Volumen de consumo facturado no medido	108
4.4.5. Balance hídrico	109
4.4.6. Reparto del volumen no facturado por sectores en un año	112

4.4.7. Elección del mes de condiciones más desfavorables	113
4.4.8. Reparto del volumen no facturado por sectores en el mes más desfavorable	115
4.4.9. Caudal medio del periodo de suministro por sector	116
4.4.10. Horarios de suministro.....	117
4.4.11. Cálculo de la curva de suministro por horas.....	118
4.4.12. Recolección de información – volumen de entrada al sistema en forma diaria.....	121
4.5. Volumen de regulación tanque Agua de Castilla.....	123
4.5.1. Ajuste del modelo con niveles del depósito Agua de Castilla.....	125
4.6. Escenario propuesto.....	127
4.6.1. Elección de criterios para la selección del sector que modificará su horario.....	128
4.6.2. Cuantificación de los factores que inciden en la selección del sector para su cambio de horario	128
4.6.3. Ponderación de criterios	132
4.6.4. Cálculo de los factores por criterio para la optimización.	133
4.6.5. Elección del sector que modificará su horario.	134
4.7. Cálculo hidráulico	152
4.7.1. Situación actual.....	154
4.7.2. Cálculo hidráulico en los escenarios propuestos.....	156
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	160
5.1. Conclusiones y recomendaciones.....	160
5.2. Bibliografía	164
ANEXO 1. PLANOS	

Figuras

Figura 1.1.1. Proporción de la población que usa fuentes mejoradas de agua potable (redes de suministro de agua potable) en 2011 (World Health Organization & UNICEF, 2013)	1
Figura 1.1.2. Distribución de la escasez de agua física y económica (International Water Management Institute, 2007).....	2
Figura 2.4.3. Redes mixtas, con red cerrada y red abierta para tuberías principales	14
Figura 2.7.1. Curva de modulación diaria para un sistema de suministro continuo	19
Figura 2.7.2. Mediciones de presión y caudal realizadas en zonas de Judayta (Jordania), segundo día (Battermann & Macke, 2001)	21
Figura 2.7.3. Presión y caudal durante las 10 últimas horas de medición, Judayta (Jordania) (Battermann & Macke, 2001)	21
Figura 2.7.4. Representación del suministro, adaptado de datos de (Battermann & Macke, 2001) ..	22
Figura 2.7.5. Representación simplificada del suministro en sistemas intermitentes, adaptado de datos de (Battermann & Macke, 2001)	22
Figura 2.9.1. Características del caudal y del tiempo en diferentes tipos de fugas	30
Figura 2.9.2. Variación del caudal de fuga en función de la presión y el exponente de fuga.....	34
Figura 2.9.3. Clasificación de los DMA (Farley, 2001)	35
Figura 2.10.1. Representación gráfica de las líneas de energía, piezométrica y de posición.....	39
Figura 2.12.1. Curva típica de la Demanda Dependiente de la Presión (PDD), adaptado de (Wu, y otros, 2006)	44
Figura 2.12.2. Esquema simplificado de la variación de la presión y su relación con el caudal suministrado	45
Figura 2.12.3. Incremento del caudal ofertado o suministrado con relación a la presión de servicio ..	47
Figura 2.13.1. Esquema de los modelos de análisis para sistemas de suministro de agua.....	48
Figura 2.13.2. Diagrama de flujo del proceso de modelado (Walski, y otros, 2003)	50
Figura 2.14.1. Máximos locales y máximo global en una función objetivo.	54
Figura 2.15.1. Esquema jerárquico, (Aznar & Guijarro, 2012)	61
Figura 3.3.1. Primera parte, metodología para el escenario actual o inicial	65
Figura 3.3.2. Segunda parte, metodología para el escenario propuesto	66
Figura 3.11.1. Medición de presiones y caudales en el punto Centro de convenciones, ingreso al sector E08-02, sistema intermitente de la ciudad de Oruro, 04/02/2013. Fuente: SeLA – Oruro.....	71
Figura 3.11.2. Representación de la variación del caudal de suministro, ingreso al sector E08-02, sistema intermitente de la ciudad de Oruro, 04/02/2013.....	71
Figura 3.11.3. Simplificación del caudal de suministro, ingreso al sector E08-02, 04/02/2013.....	72
Figura 3.15.1. Simplificación del caudal o volumen de suministro en un sistema intermitente.....	74
Figura 3.15.2. Decremento de la presión con relación al caudal demandado	76
Figura 3.15.3. Comparación del caudal ofertado y demandado y su variación con la presión.	77

Figura 4.2.1. Ubicación geográfica del Departamento de Oruro.....	89
Figura 4.2.2. Imagen satelital de la ciudad de Oruro.....	90
Figura 4.2.3. Precipitación total - Gestión 2012.....	91
Figura 4.3.1. Hogares por continuidad diaria en la provisión de agua (2000 – 2002), (INE - Bolivia, 2014).....	93
Figura 4.3.2. Esquema isométrico del sistema de agua potable de la ciudad de Oruro.....	95
Figura 4.3.3. Abonados por categoría, ciudad de Oruro.....	96
Figura 4.3.4. Consumo por categoría de abonado, ciudad de Oruro.....	97
Figura 4.3.5. Sistema de conexión directa, sin tanque elevado.....	97
Figura 4.3.6. Sistema de conexión indirecta, sin bombeo.....	98
Figura 4.3.7. Sistema de conexión indirecto, con bombeo.....	98
Figura 4.3.8. Esquema isométrico del subsistema de abastecimiento de agua potable de la zona sur de la ciudad de Oruro.....	100
Figura 4.4.1. Volumen Mensual – Bomba B-4 – Gestión 2012.....	103
Figura 4.4.2. Volumen mensual (m3) – Contador Santa Bárbara I – Gestión 2012.....	104
Figura 4.4.3. Volumen de entrada al sistema (m3) – Gestión 2012.....	105
Figura 4.4.4. Volumen mensual consumido facturado por sector (m3) – Gestión 2012.....	107
Figura 4.4.5. Volumen mensual medio consumido por clientes con medición – Gestión 2012.....	108
Figura 4.4.6. Porcentajes representativos del Balance Hídrico IWA.....	112
Figura 4.4.7. Volumen de consumo medido mensualmente – zona sur Oruro – Gestión 2012.....	114
Figura 4.4.8. Curva de suministro – zona sud de Oruro – Gestión 2012.....	119
Figura 4.4.9. Curva de modulación - zona sud de Oruro – Gestión 2012.....	120
Figura 4.4.10. Curva de volumen de entrada al sistema – zona sur de Oruro – Gestión 2012.....	123
Figura 4.5.1. Volúmenes de ingreso y salida – Depósito agua de Castilla.....	124
Figura 4.5.2. Volúmenes acumulados de ingreso y salida – Depósito agua de Castilla.....	125
Figura 4.5.3. Altura de agua medida y calculada en el tanque Agua de Castilla.....	127
Figura 4.6.1. Escenario actual, $Q_{maxh}=132.10$ l/s.....	143
Figura 4.6.2. Escenario 1, $VS=450$ m3/h, $Q_{maxh}= 99.27$ l/s.....	143
Figura 4.6.3. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 1.....	144
Figura 4.6.4. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 1, $V = 1176.19$ m3.....	145
Figura 4.6.5. Escenario 2, $VS=350$ m3/h, $Q_{maxh}=87.42$ l/s.....	145
Figura 4.6.6. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 2.....	146
Figura 4.6.7. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 2.....	146
Figura 4.6.8. Escenario 3, $VS=300$ m3/h, $Q_{maxh}=80.23$ l/s.....	147
Figura 4.6.9. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 3.....	147
Figura 4.6.10. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 3.....	148
Figura 4.6.11. Escenario 4, $VS=250$ m3/h, $Q_{maxh}= 68.38$ l/s.....	148
Figura 4.6.12. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 4.....	149
Figura 4.6.13. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 4.....	149

Figura 4.6.14. Escenario 5, VS=200 m ³ /h, Q _{maxh} =55.39 l/s	150
Figura 4.6.15. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 5	150
Figura 4.6.16. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 5	151
Figura 4.6.17. Escenario 6, VS=150 m ³ /h, Q _{maxh} =40.96 l/s	151
Figura 4.6.18. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 6	152
Figura 4.6.19. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 6	152
Figura 4.7.1. Ventana de introducción de parámetros de análisis PDD en WATERCAD	153
Figura 4.7.3. Ajuste de las presiones medidas y calculadas del modelo hidráulico.	156
Figura 4.7.4. Cálculo de la presión (mca) en la hora pico de los escenarios propuestos	157
Figura 4.7.5. Cálculo de caudales de demanda (l/s) en la hora pico de los escenarios propuestos.	158
Figura 4.7.6. Variación de la presión y el caudal en el sector S01-05, en la hora pico de los escenarios propuestos.....	158
Figura 4.7.7. Variación de la presión y el caudal en el sector S01-08, en la hora pico de los escenarios propuestos.....	159
Figura 4.7.8. Variación de la presión y el caudal en el sector S01-11, en la hora pico de los escenarios propuestos.....	159

Tablas

Tabla 2.3.1. Categorización de los sistemas de abastecimiento intermitente	13
Tabla 2.5.1. Dotación media diaria según normativa boliviana NB 689 (l/hab-d).....	16
Tabla 2.8.1. Terminología estándar para el balance hídrico de acuerdo con la IWA (International Water Association).....	24
Tabla 2.10.1. Ecuaciones de pérdidas de carga	40
Tabla 2.12.1. Condiciones de variación de la demanda en función de la presión	46
Tabla 2.15.1. Escala fundamental de comparación por pares (Saaty & Vargas, 2012).....	61
Tabla 2.15.2. Valores del índice de consistencia aleatoria (RI) en función del tamaño de la matriz (Saaty & Vargas, 2012).....	63
Tabla 2.15.3. Porcentajes máximos del ratio de consistencia.....	63
Tabla 4.2.1. Precipitación total - Gestión 2012.....	90
Tabla 4.2.2. Temperatura media - Gestión 2012	91
Tabla 4.2.3. Temperatura máxima absoluta - Gestión 2012.....	91
Tabla 4.2.4. Temperatura mínima absoluta - Gestión 2012	91
Tabla 4.2.5. Número de usuarios y población - zona sur de Oruro.....	92
Tabla 4.4.1. Volumen mensual (m3) – Bomba B-4 – Mediciones realizadas en la planta JKW – Gestión 2012.....	102
Tabla 4.4.2. Volumen mensual (m3) – Contador Santa Bárbara I – Mediciones realizadas en el tanque Santa Bárbara I – Gestión 2012	103
Tabla 4.4.3. Volumen de entrada al sistema (m3) – Gestión 2012	104
Tabla 4.4.4. Volumen de consumo facturado medido (m3) – Gestión 2012.....	106
Tabla 4.4.5. Volumen mensual medio consumido por clientes con medición – Gestión 2012.....	108
Tabla 4.4.6. Volumen de consumo facturado no medido (m3) – Gestión 2012.....	109
Tabla 4.4.7. Balance hídrico del subsistema en formato del IWA – Gestión 2012.....	111
Tabla 4.4.8. Porcentajes representativos del Balance Hídrico IWA.....	112
Tabla 4.4.9. Cálculo del caudal medio de entrada a cada sector	113
Tabla 4.4.10. Cálculo del volumen de entrada a cada sector – noviembre de 2012.....	115
Tabla 4.4.11. Caudal medio por periodo de suministro por sector – noviembre de 2012.....	116
Tabla 4.4.12. Horarios de distribución de los sectores alimentados por el depósito Agua de Castilla	117
Tabla 4.4.13. Cálculo del caudal de suministro por horas	118
Tabla 4.4.14. Volumen promedio de bombeo B-4, medido por horas.....	121
Tabla 4.4.15. Volumen por horas de ingreso a cada tanque (Agua de Castilla y Santa Bárbara I) ...	122
Tabla 4.5.1. Cálculo del volumen de regulación tanque Agua de Castilla	123
Tabla 4.5.2. Cálculo de la altura teórica en el tanque Agua de Castilla	126

Tabla 4.6.1. Normalización Criterio 1: Presión de servicio.....	128
Tabla 4.6.2. Normalización Criterio 2: Número de clientes.	129
Tabla 4.6.3. Normalización Criterio 3: horas de suministro.....	130
Tabla 4.6.4. Matriz pareada del criterio del Criterio 4: Facilidad en la operación del sector, Experto 1	131
Tabla 4.6.5. Vector propio de cada experto y ponderación de cada sector Criterio 4.....	132
Tabla 4.6.6. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 1.....	132
Tabla 4.6.7. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 2.....	133
Tabla 4.6.8. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 3.....	133
Tabla 4.6.9. Vector propio de cada experto y ponderación para cada criterio.....	133
Tabla 4.6.10. Factores o pesos de cada uno de los sectores según cada criterio.....	134
Tabla 4.6.11. Matriz de variables V.....	135
Tabla 4.6.12. Matriz U del sector S01-05, para m=24 y h=5.....	136
Tabla 4.6.13. Vector X de cada sector.	137
Tabla 4.6.14. Volumen por hora que ingresa a cada sector.	138
Tabla 4.6.15. Vector M de cada sector.	139
Tabla 4.6.16. Matriz, S, utilizada para priorizar el horario de suministro actual.....	140
Tabla 4.6.17. Función objetivo a maximizar	141
Tabla 4.6.18. Escenarios analizados para diferentes volúmenes de salida del depósito.....	142
Tabla 4.6.19. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 1, VS=450 m ³ /h, Q _{maxh} =99.27 l/s.....	144
Tabla 4.6.20. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 2, VS=350 m ³ /h, Q _{maxh} =87.42 l/s.....	145
Tabla 4.6.21. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 3, VS=300 m ³ /h, Q _{maxh} =80.23 l/s.....	147
Tabla 4.6.22. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 4, VS=250 m ³ /h, Q _{maxh} =68.38 l/s.....	148
Tabla 4.6.23. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 5, VS=200 m ³ /h, Q _{maxh} =55.39 l/s.....	150
Tabla 4.6.24. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 6, VS=150 m ³ /h, Q _{maxh} =40.96 l/s.....	151
Tabla 4.7.1. Altura del nivel del agua en el depósito en la hora de caudal punta de cada escenario.....	154
Tabla 4.7.2. Cálculo del caudal máximo del periodo en cada sector	154
Tabla 4.7.3. Comparación de las demandas y presiones calculadas con el criterio DDA y PDD.....	155
Tabla 4.7.4. Ajuste de las presiones calculadas con las presiones medidas	155
Tabla 4.7.5. Cálculo de la presión (mca) en la hora pico de los escenarios propuestos.....	156
Tabla 4.7.6. Cálculo de caudales de demanda (l/s) en la hora pico de los escenarios propuestos... ..	157

CAPÍTULO 1. INTRODUCCION

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 un suministro intermitente, el cual aumenta los riesgos asociados a la contaminación del agua (World Health Organization & UNICEF, 2013). Desde 1990, 2.1 millones de personas accedieron al suministro de agua potable, casi dos tercios (1.3 millones) viven en zonas urbanas; a finales del 2011 el 83% de la población sin acceso a una fuente mejorada de agua potable vive en las zonas rurales.

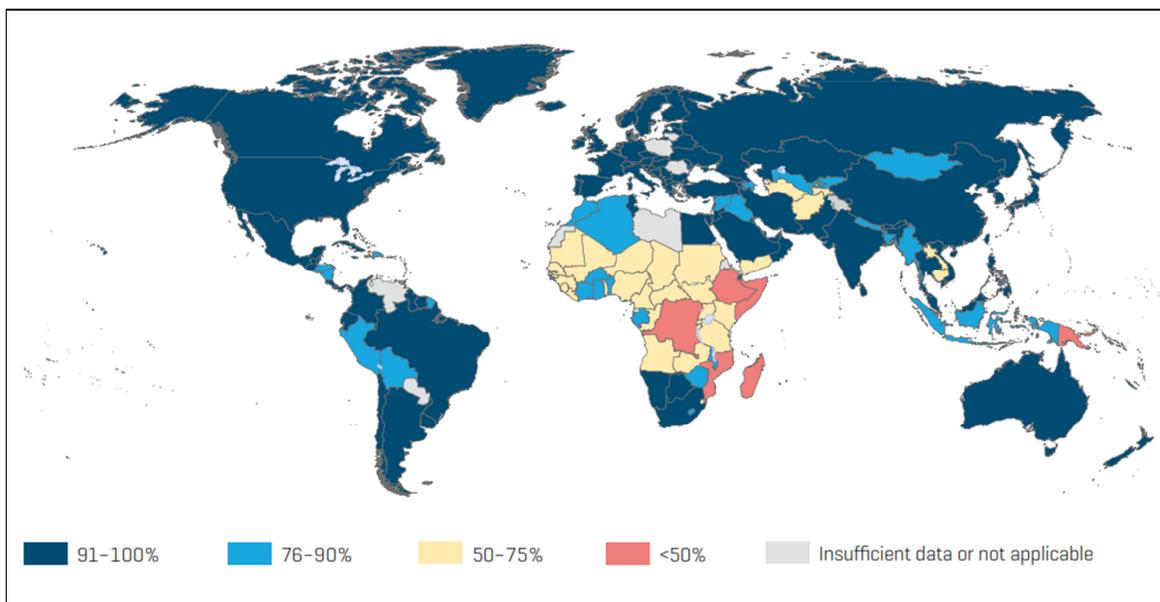


Figura 1.1.1. Proporción de la población que usa fuentes mejoradas de agua potable (redes de suministro de agua potable) en 2011 (World Health Organization & UNICEF, 2013)

El acceso al agua es limitado para millones de mujeres y hombres pobres alrededor del mundo, debido a que las razones van más allá de los recursos físicos. En algunos lugares el agua es abundante, pero debido a la falta de infraestructura, producto de los problemas políticos y socio-culturales, se dificulta el acceso para la gente. En otros lugares la demanda de agua de la población es mayor a la disponible como recurso natural.

De esta forma, se define la escasez de agua, 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 probablemente sean insuficientes 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).

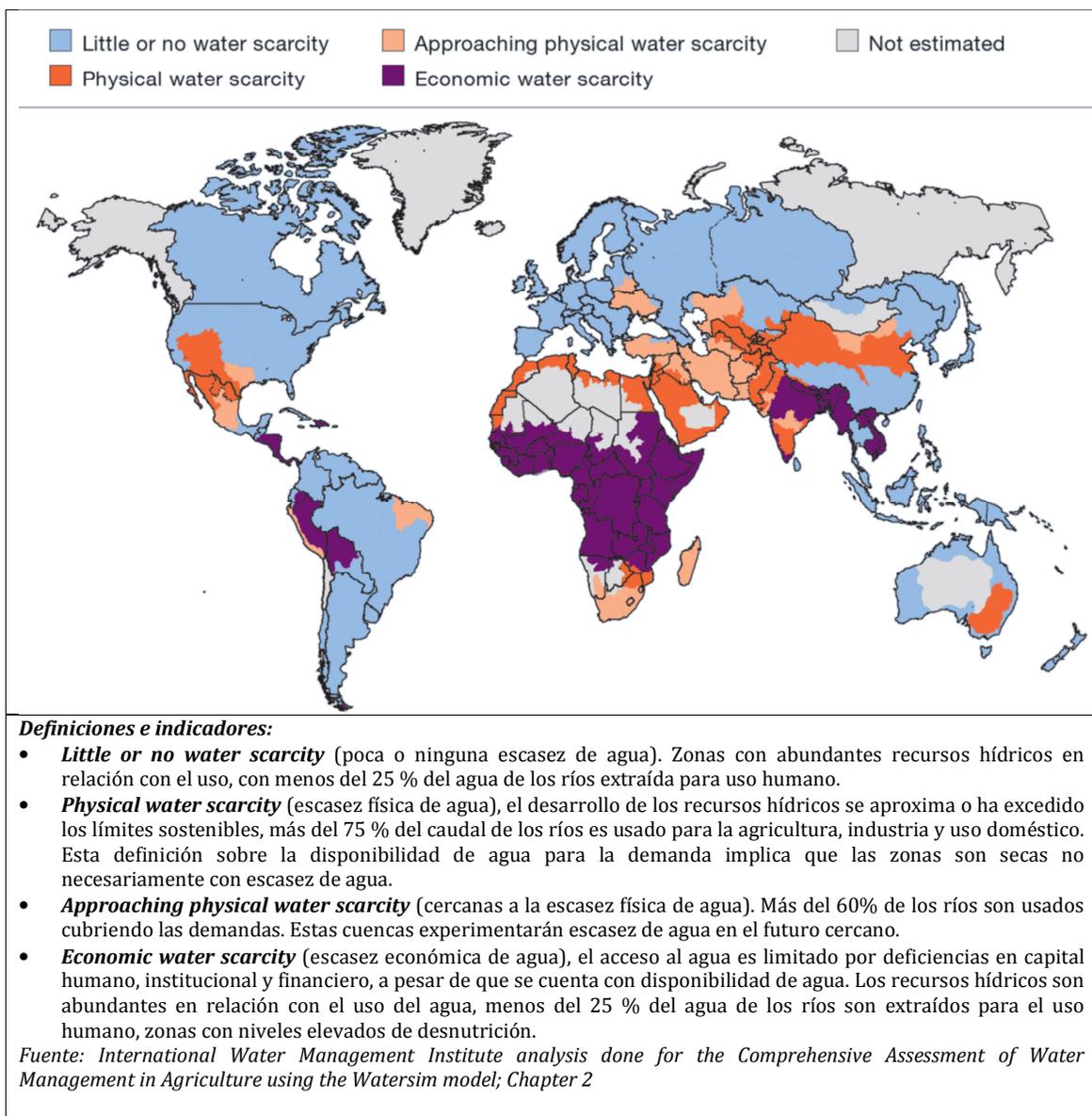


Figura 1.1.2. Distribución de la escasez de agua física y económica (International Water Management Institute, 2007).

Uno de los problemas de las ciudades en países en vías de desarrollo es el incremento de la población urbana, generada por la migración de habitantes del área rural, incrementando la demanda de servicios

básicos como el agua potable, esta situación incide en la cantidad de agua disponible para el abastecimiento; 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 las empresas de agua potable muchas veces se ven en la necesidad de reducir las horas de suministro, dando pie a un sistema de suministro intermitente.

Debido a la idea de lograr mayor control sobre la cantidad de agua que se distribuye, las empresas de agua muchas veces recurren a establecer horarios con poco criterio hidráulico, considerando solamente las horas de suministro y caudales o volúmenes, de esta forma se tienen horarios de gran consumo, con caudales mucho más grandes que los demandados en horas pico de los sistemas continuos, esta situación genera un suministro inequitativo, reduciendo la presión en las zonas más alejadas, generando disconformidad y quejas de la población. Asimismo, la distribución discontinua promueve en la población el almacenamiento de agua en depósitos domiciliarios, a nivel del suelo o elevados, los cuales reducen la eficiencia hidráulica de la distribución y generan demandas uniformes y altas, debido a que la cantidad de agua que será consumida por la población durante el día debe ser suministrada en pocas horas.

La escasez económica en la que se mueven las empresas de agua en los países en vías de desarrollo, permite que solamente recolecten información muy básica del sistema de suministro, generalmente la exigida por entes reguladores; para que la presente metodología sea práctica y viable deberá trabajarse con esta información y adecuarse a estas condiciones.

Estas razones exigen estudiar y proponer una metodología que permita gestionar los horarios de suministro, para mejorar las condiciones del servicio de agua potable en un sistema intermitente, tomando en cuenta criterios cualitativos y cuantitativos, como la capacidad de las tuberías principales, la existencia de sectores trabajando en simultaneo, la presión de servicio, la cantidad de agua disponible, la incidencia del incremento o decremento de la presión sobre la curva de consumo del sector a abastecer, la cantidad de usuarios, las horas de suministro, las facilidades de operación de los sectores, entre otros.

Se utilizará como caso de estudio uno de los subsistemas del abastecimiento de agua de la ciudad de Oruro, la cual está ubicada en el altiplano boliviano, es una de las ciudades más importantes del país que cuenta con un sistema de suministro intermitente; asimismo, constituye una ventaja para el estudio que el sistema de agua potable este compuesto por subsistemas y dividido en 72 sectores (2012), por estas razones para el presente estudio se utilizará el subsistema ubicado en la parte sur de la ciudad constituido por 15 sectores alimentados por un solo depósito. Esta metodología podrá ser replicada en otras ciudades de Bolivia y en otros países con escasez económica de agua.

El estudio empieza con la categorización del tipo de sistema intermitente, en base a la cual posteriormente se realizará un análisis y diagnóstico del sistema de agua potable, de esta forma se establecen las causas de la deficiencia de presión, se identificarán los sectores con bajas presiones y se estudiará su origen; esta primera aproximación permitirá generar un modelo analizando la simultaneidad de horario de distribución en varios sectores; posteriormente, tras el análisis inicial, se procederá con la selección del

sector o sectores para su cambio de horario, para la selección de los sectores que deben cambiar de horarios deben considerarse condiciones de la hidráulica del sistema y condiciones de operaciones de la red, con este fin se utilizarán técnicas de decisión multicriterio, asignando pesos en función de las características locales del sistema de suministro, para posteriormente realizar la optimización de los horarios de suministro. El análisis permitirá también conocer las variaciones que se producen en el depósito que alimenta al subsistema.

El presente trabajo aporta con una propuesta de solución para la gestión técnica de los sistemas de suministro intermitente, la cual proporcionará resultados a corto plazo y que requerirá de poca inversión para su logro; de esta forma mejorarán las condiciones del servicio para la población, en consecuencia su calidad de vida, la infraestructura será utilizada más eficientemente y mejorará la imagen de la empresa operadora del servicio. No se busca perpetuar el sistema de suministro intermitente por el contrario la presente metodología puede ser una herramienta muy útil en la transición gradual de un sistema intermitente a uno continuo.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es proponer una metodología para la gestión de los horarios de suministro en sistemas de abastecimiento intermitentes, la cual permita mejorar las condiciones de servicio y en consecuencia la calidad de vida de la población.

Como objetivos específicos:

- Establecer una metodología para la gestión técnica de sistemas de suministro intermitentes.
- Utilizar técnicas de decisión multicriterio para incluir en la mejora del servicio criterios cualitativos y establecer la ponderación de los elementos que intervienen en la selección de horarios.
- Optimizar la ubicación de los periodos de suministro en base a una función objetivo y las restricciones que permitan determinar el horario de suministro más adecuado para el sistema intermitente.
- Estudiar el consumo de cada sector y con esta base analizar la variación del suministro en el depósito principal.
- Analizar la variación del consumo o suministro en función de la presión debido a la presencia de depósitos domiciliarios.
- Establecer una modificación de los periodos de suministro de cada sector en forma de bloque de horas.
- Plantear diferentes escenarios de mejora del suministro.
- Analizar hidráulicamente la red del sistema intermitente utilizando el criterio de la demanda dependiente de la presión

- Recolectar y procesar los datos de la empresa de agua de la ciudad de Oruro (Bolivia), el Servicio Local de Acueductos y alcantarillado (SeLA – Oruro), que será el caso estudiado.
- Realizar un diagnóstico del sistema de suministro intermitente de la ciudad de Oruro y plantear escenarios de mejora.

CAPÍTULO 2. PROBLEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE

2.1. INTRODUCCIÓN

La población mundial va aumentando a un ritmo acelerado, los recursos hídricos disponibles se reducen debido a la contaminación y a efectos del cambio climático, por lo que la brecha entre la oferta y la demanda es cada vez más grande, la escasez de agua obliga a los operadores de los sistemas de abastecimiento de agua a tener suministros intermitentes (Charalambous, 2012), Asimismo, en varios países el crecimiento urbano ha superado y continua superando el crecimiento de la infraestructura de abastecimiento (Islam & Alekal, 2009).

En el informe Benchmarking Internacional de redes de agua y saneamiento del Banco Mundial, se recogen datos sobre los servicios de agua potable, el cual indica que en los países en vías de desarrollo solamente el 16% de las empresas operadoras del suministro de agua cumplieron con el abastecimiento de 24 horas y en promedio se tiene un servicio por 16 horas al día (Van den Berg & Danilenko, 2011).

En los países en vías de desarrollo, 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, Eckart, & Vairavamoorthy, 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. SISTEMA DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE

Se considera suministro de agua intermitente cuando el abastecimiento del servicio 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 continuos, debido a los niveles altos de desperdicio (Faure & Pandit, 2010).

Generalmente, este tipo de sistemas están diseñados y construidos para trabajar como sistemas continuos, veinticuatro horas los siete días de la semana, sin embargo son varias las causas para que el suministro se realice de forma intermitente y que en varias horas del día la tubería se encuentre vacía con presencia de aire. En muchas ciudades pequeñas con sistema intermitente el servicio es por horas para toda la red

simultáneamente, en ciudades más grandes el abastecimiento es con rotación de horas de servicio diferenciados por sectores.

Existen muchas razones por las que existen los sistemas abastecimiento intermitente. Muchos autores sugieren tres tipos de problemas que pueden provocar o perpetuar el suministro intermitente de agua: la mala gestión técnica (Milanes & Álvarez, 2006), la escasez económica y la escasez absoluta del recurso hídrico (Totsuka, Trifunovic, & Vairavamoorthy, 2004). Por ejemplo, si se requiere electricidad para hacer funcionar a las bombas que captan agua de un lago o río, esta situación puede ser interrumpida con frecuencia lo cual interrumpirá el servicio o 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 millones de litros de agua que se pierden en el suelo; en algunos casos puede que no haya suficiente cantidad de agua en la fuente o escasez (Charalambous, 2012), en todos estos casos las empresas de agua pueden recurrir como respuesta a corto plazo con el abastecimiento de forma intermitente

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 (Totsuka, Trifunovic, & Vairavamoorthy, 2004). Los síntomas de carencia del sistema son niveles de presión en la red muy bajos y la insuficiencia en el suministro en los puntos más alejados y elevados (Milanes & Álvarez, 2006),

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 de suministro intermitente sea más frecuente (Tsegaye, Eckart, & Vairavamoorthy, 2011). Aunque el suministro intermitente es quizás la última medida a tomar en condiciones de escasez de agua, sin embargo, es una situación que debe ser evitada mediante una planificación proactiva y con respuestas oportunas a las condiciones críticas (Charalambous, 2012).

Una forma de minimizar las dificultades derivadas de los sistemas de abastecimiento intermitente es potenciar 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, Días, & Aguirre, 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, 2012), a causa de un periodo extenso de sequía. Asimismo, en Sevilla (España), debido al periodo bastante seco de 1975-1976, precedido por

escasas precipitaciones en los dos años anteriores, se tuvo un abastecimiento con restricciones durante noviembre de 1975 a diciembre de 1976 (EMASESA, 2005).

2.2.1. INCONVENIENTES DE LOS SISTEMAS DE SUMINISTRO INTERMITENTE

El abastecimiento de agua intermitente genera problemas tanto a la empresa encargada del suministro de agua como a los hogares:

A la empresa:

- Se dificultan las tareas de operación, mantenimiento y se incrementa el personal que opera el sistema; las válvulas son operadas con frecuencia por lo que requiere mayor mano de obra, más que en el caso de suministro continuo; según el análisis de 45 empresas de servicios públicos en el Perú, el número de empleados por cada mil conexiones de agua se incrementa en proporción inversa a las horas de servicio (Yepes, Ringskog, & Sarkar, 2001).
- Las fallas de la infraestructura son más frecuentes que en un sistema continuo, debido a la operación del sistema (Charalambous, 2012), una de las principales falencias se produce en las válvulas, que sufren un desgaste más rápido (Sanjay & Dahasahasra, 2007).
- No importa lo bien que se opere la red de distribución de suministro intermitente, sin duda existirán efectos perjudiciales en su integridad (Charalambous, 2012).
- Se dificulta la localización de fugas en el sistema, se genera una mayor cantidad de fugas de fondo.
- Es ineficiente desde el punto de vista energético (Milanes & Álvarez, 2006), la demanda de los consumidores llega a tanques o depósitos sometidos a presión atmosférica por lo que el sistema de la vivienda trabajará con menor presión. Muchas veces los tanques domiciliarios no cuentan con válvulas flotador, lo que puede incrementar el desperdicio en las viviendas (Cabrera-Bejar, Palma, Cerón, & De Jesús, 2009)
- El volumen de almacenamiento en los depósitos principales del sistema es insuficiente, el sistema intermitente exige cantidades grandes de almacenamiento (Sanjay & Dahasahasra, 2007).
- Debido a las horas de suministro limitadas, el factor de pico se incrementa a valores de 4 a 6 en la mayoría de los sistemas (Sanjay & Dahasahasra, 2007); esta situación exige grandes diámetros en la red para satisfacer los requisitos hidráulicos y de demanda, según estudios realizados en el sur de la India, los sistemas intermitentes producen presiones insuficientes, en varios sectores del área de estudio se midieron presiones cero (Vairavamoorthy, Akinpelu, Lin, & Ali, 2001).
- Los consumidores pueden estar descontentos con el servicio lo cual puede dificultar las tareas de cobro.
- Debido a que en algunos periodos la tubería se encuentra vacía o con presiones bajas, puede ocurrir contaminación por el ingreso de agua del nivel freático o aguas residuales por fisuras o uniones en las tuberías (Sanjay & Dahasahasra, 2007) (Totsuka, Trifunovic, & Vairavamoorthy, 2004).

- La presencia de aire en las tuberías puede causar inexactitud en las lecturas del contador, debido a que al inicio del suministro primero empieza a salir aire de la red, midiéndose este volumen adicional para el cliente, aunque cuando se tienen condiciones de vacío en la tubería puede darse el caso contrario si no se tienen válvulas de retención; asimismo, bajo condiciones secas y húmedas repetidas, el deterioro del rendimiento del contador se acelera. Esta situación trae consigo dificultades en el control del consumo y en el cobro de tarifas, puede generar también escepticismo entre los consumidores sobre la exactitud de sus facturas de agua (Indian Water Works Association (IWWA), 2000).
- Debido a que las tuberías están expuestas alternadamente al aire y agua, se corroen más rápidamente, de esta forma tienen que ser reparadas y cambiadas con mayor frecuencia que en los sistemas continuos (Faure & Pandit, 2010).
- La presencia de aire atrapado entre dos columnas de agua sometidas a presión, puede provocar importantes sobrepresiones (Fuertes, Izquierdo, Iglesias, Cabrera, & García-Serra, 1997), situación común en sistemas intermitentes cuando comienza el horario de suministro, lo que puede causar daño a la tubería, juntas y accesorios, generando posteriormente fugas.
- 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, Ringskog, & Sarkar, 2001).
- La incertidumbre del suministro entre los consumidores hace que almacenen agua en los periodos de servicio (Sanjay & Dahasahasra, 2007), en algunos casos, mayor cantidad de agua que la requerida, también es muy probable que los consumidores mantengan sus grifos abiertos (Indian Water Works Association (IWWA), 2000), incrementando las cantidades de demanda y generando desperdicio.
- 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 en la tubería, por lo que el efecto residual del cloro puede reducirse.
- Se incrementa el número de acometidas clandestinas debido a que realizan estas conexiones en periodos en los cuales no hay agua en la red.
- Debido a las presiones bajas en los puntos más desfavorables del sistema, se tendrán caudales de consumo mínimos, los cuales pueden no ser medidos de forma correcta por los contadores o medidores, debido al error que tienen para medir caudales bajos.

A la población:

- Debe almacenar agua en cantidad suficiente para cubrir las necesidades de las horas o días en los cuales no se tenga el abastecimiento de agua. Si los hogares no pueden recibir esta cantidad recurrirán a otras fuentes de agua como pozos, los cuales pueden estar contaminados en las

grandes ciudades, o a pagando mucho más a camiones cisterna que venden el agua, al costo adicional que deben cubrir estas familias para un acceso al agua se denomina costo de afrontamiento, frecuentemente este monto es mayor a la cantidad que se paga por una tarifa en un suministro continuo. Los pobres, por su parte, pagan mucho más por el agua debido a que deben recurrir a métodos para asegurar la salubridad del agua que consumen, por ejemplo hervir el agua. Un estudio realizado en Tegucigalpa (Honduras) (Yepes, Ringskog, & Sarkar, 2001), estima que los costos de las familias más pobres que deben hacer frente al tipo de suministro intermitente alcanza a 180 % de la tarifa del agua.

- La mayoría de los consumidores 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.
- 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 en suministro continuo sería suficiente, esto implica costos de adquisición de equipos de bombeo y pago de energía para el consumidor
- Otra dificultad es que la gente en las zonas de bajos recursos económicos solamente cuenta con un grifo en la vivienda, lo cual exige que este en la hora de suministro con los recipientes necesarios. Los sistemas de distribución intermitentes resultan una inequitativa forma de distribución de caudal y presión en los sistemas de abastecimiento (Totsuka, Trifunovic, & Vairavamoorthy, 2004).
- Causa trastornos y agitación de las actividades diarias de las personas, en casa o en el trabajo (Charalambous, 2012), debido a que el momento en que se dispone de agua no siempre es conveniente para los usuarios; por otra parte, varios consumidores, de la 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, Trifunovic, & Vairavamoorthy, 2004).
- Insalubridad, debido a los problemas de contaminación que pueden causarse en los depósitos de almacenamiento domiciliario (Milanes & Álvarez, 2006),
- Los sistemas de abastecimiento intermitente no cubren los riesgos de incendio durante los períodos sin suministro, este tipo de inconvenientes durante estos períodos puede ocasionar desastres y un gran daño a la propiedad inclusive a la vida (Maurya, Bind, & Srivastava, 2008).

2.2.2. VENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE SUMINISTRO INTERMITENTE

Entre las ventajas que ofrece un sistema intermitente se tienen:

- Puede dar lugar al ahorro de agua, debido a que las pérdidas ocurren durante menos tiempo y la existencia de restricciones en el suministro de agua, por estas razones se adopta este tipo de servicios en los lugares donde hay escasez de agua en la fuente de abastecimiento (Charalambous, 2012) (Maurya, Bind, & Srivastava, 2008).
- 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 produce se dificulta cuando no existe agua en la red.
- 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 (DMA) para el monitoreo y control de las pérdidas.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS INTERMITENTES

Para una mejor comprensión de los tipos de sistemas intermitentes, se cuenta con una matriz de clasificación, que integra los tipos de escasez y los problemas causados por el tipo de sistema (Totsuka, Trifunovic, & Vairavamoorthy, 2004).

2.3.1. CATEGORIZACIÓN DE LA ESCASEZ DE AGUA.

Una de las causas comunes de sistemas de abastecimiento intermitentes está relacionada con la cantidad de agua que no es suficiente para el suministro de forma continua; en este sentido, hay tres tipos principales de escasez:

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

Los sistemas intermitentes 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.

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, desempeño financiero sólido y en última instancia llegar a las 24 horas de suministro. Esto se puede lograr dentro de la capacidad de la infraestructura de abastecimiento de agua existente.

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. En esta última etapa, la demanda también 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 escases del Tipo 1. A pesar de la mejora de la gestión del desempeño de los organismos operadores, un suministro de 24 horas no se puede lograr sin la expansión física y/o el desarrollo de la infraestructura.

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.

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. En este caso deben aplicarse medidas estrictas de conservación del agua con el fin de mitigar el problema. Tanto la empresa de agua y los consumidores deben compartir la responsabilidad en este caso.

2.3.2. CATEGORIZACIÓN PARA EL ORIGEN DE LOS PROBLEMAS

Los problemas relacionados con el suministro de agua en forma intermitente 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 24 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 medidor o 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. MEDIDAS ADECUADAS

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

Tabla 2.3.1. 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
Problemas Tipo A: Uso de sistemas de 24 horas	Categoría 1A	Categoría 2A	Categoría 3A
Problemas Tipo B: Problemas de sistemas genuinamente intermitentes	Categoría 1B	Categoría 2B	Categoría 3B

Fuente: (Totsuka, Trifunovic, & Vairavamoorthy, 2004)

Para tomar cualquier medida en un sistema de abastecimiento intermitente, es importante en primera instancia categorizar al sistema para posteriormente tomar las medidas de mejora necesarias.

2.4. ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Un sistema de abastecimiento de agua, está compuesto por varias fases o etapas claramente diferenciadas, desde la captación hasta el consumo final por parte del consumidor. Estas etapas son las siguientes:

- Etapa de captación, en la cual se establecen las obras de toma para captar el agua superficial o subterránea.
- Etapa de transporte, que comprenden las líneas de conducción, impulsión o aducciones que van desde la obra de toma hasta la planta de tratamiento, tanque, estación de bombeo u otro tipo de estructuras.
- Etapas de tratamiento. Se trata de la etapa encargada de la potabilización del agua captada para dejarla con las condiciones necesarias para el consumo humano. Sin duda es un elemento fundamental dentro del proceso de abastecimiento de agua.

- Etapa de almacenamiento y regulación, en la cual se encuentran los depósitos o tanques de almacenamiento, los cuales tendrán la función de almacenar y regular la cantidad de agua que se suministrará a la población.
- Etapa de distribución, es la que llega al usuario mediante redes de distribución, incluyendo las acometidas o conexiones domiciliarias.

2.4.1. TIPOS DE REDES DE ABASTECIMIENTO.

Debido a que son el elemento principal de análisis del presente trabajo, se describe sucintamente las topologías existentes. Las redes de distribución de agua tienen dos clasificaciones, una analizada en planta y otra establecida por las cotas (Pérez, Iglesias, & Fuertes, 2005).

Si el análisis se realiza en planta, las redes de distribución de agua pueden ser:

- Abiertas o ramificadas.
- Cerradas o malladas.
- Mixtas.

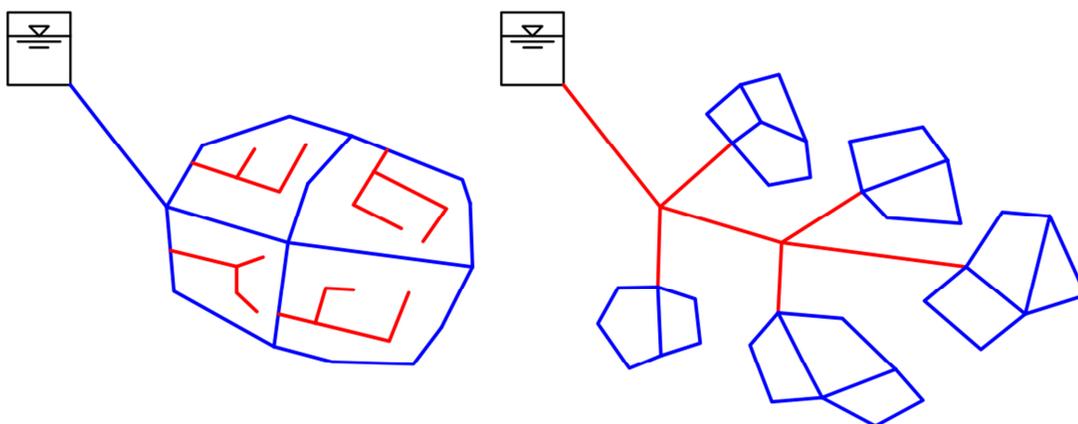


Figura 2.4.1. Redes mixtas, con red cerrada y red abierta para tuberías principales

Generalmente, la configuración de las redes es del tipo mixto, optándose por realizar tramos cerrados en las tuberías principales y tramos de red abierta en tramos de distribución de menor importancia. Otra configuración es con los tramos principales conformados por una red abierta y las redes malladas se encuentran en los puntos extremos de la red ramificada; esta última configuración puede ser frecuente en sistemas de suministro intermitente, debido a la sectorización que se necesita para el suministro por horas.

2.5. CARACTERÍSTICAS DEL CONSUMO DE AGUA

Cuando se planifica, diseña o gestiona un sistema de suministro, debe conocerse básicamente donde 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 será utilizada para planificar la extensión del sistema existente y determinar las mejoras necesarias para proporcionar agua suficiente a una presión apropiada.

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).

2.5.1. CONSUMO DOMESTICO

El consumo doméstico varía según los hábitos higiénicos de la población, nivel de vida, grado de desarrollo, abundancia y calidad de agua disponible, condiciones climáticas, usos, costumbres y otros factores. Para la estimación del consumo residencial o doméstico, es importante conocer la cantidad de agua consumida por persona y día en la casa (cocina, baño, aseo y lavandería) y el uso externo como riego de jardines de las viviendas (en caso de existir).

2.5.2. CONSUMO PÚBLICO

Este consumo se refiere al que realizan los edificios e instalaciones públicas tales como: escuelas, hospitales, cuarteles, riego de jardines públicos, servicio contra incendios, lavado de calles. El consumo público normalmente es excesivo debido a descuidos, porque el desperdicio en tales usos se debe a daños en tuberías, válvulas o accesorios.

2.5.3. CONSUMO INDUSTRIAL

Depende del grado de industrialización y del tipo de industrias, grandes o pequeñas. Las zonas industriales en muchos casos conducen a un desarrollo urbanístico que trae como consecuencia un aumento en el consumo del agua. En el consumo industrial del agua, influye la cantidad disponible, precio y calidad. Algunas industrias se abastecen en forma particular de sus propios sistemas sin afectar al sistema general de la población.

2.5.4. CONSUMO COMERCIAL

Depende del tipo y cantidad de comercios y mercados de la localidad. Las instalaciones industriales y comerciales varían su demanda enormemente, esta puede estimar en base a datos históricos del mismo sistema o por comparaciones con usuarios de características similares. Asimismo, son de gran ayuda las directrices de planificación y diseño proporcionadas por los organismos o agencias reguladoras competentes.

2.5.5. FUGAS Y DESPERDICIOS

Aunque las fugas y las pérdidas no constituyen un consumo, es un factor que debe ser considerado. En la vivienda influye en el consumo doméstico, pues es corriente encontrar filtraciones o fugas permanentes debido a desperfectos en las instalaciones domiciliarias. Estas pérdidas aunadas al mal uso del consumo público y al irracional uso doméstico, conducen a agravar el consumo general de agua.

La estimación de las pérdidas del sistema es una tarea difícil, debido a que depende de una serie de factores, entre ellos: la edad del sistema de suministro, la presión mínima y la presión máxima en la red, entre otros (Swamee & Sharma, 2008). Son de gran ayuda para la evaluación de las pérdidas los datos históricos del sistema.

2.5.6. DOTACIÓN MEDIA

Dotación media es el cociente entre el volumen de agua inyectado al sistema de agua potable, registrado o consumido, por unidad de tiempo y por unidad de consumo.

$$D = \frac{\text{volumen de agua}}{(\text{unidad de tiempo}) \cdot (\text{unidad de consumo})} \quad \text{Ecuación 2.5.1}$$

Cuando se trata del suministro a una población, la unidad de consumo suele ser un habitante, aunque algunas veces se usa como unidad la vivienda o el cliente. En el caso de zonas industriales se pueden utilizar unidades de superficie (Ha o m²) o de producción (Tm producida).

Como el caso de estudio es realizado en Bolivia es necesario conocer la normativa pertinente. La norma boliviana NB 689 (Ministerio de Servicios y Obras Públicas de Bolivia, 2004) establece criterios y valores a utilizar para el diseño y gestión de los sistemas de suministro de agua potable. La siguiente tabla muestra rangos de dotación media diaria en base la cantidad de habitantes y la región del país dónde se encuentra el sistema.

Tabla 2.5.1. Dotación media diaria según normativa boliviana NB 689 (l/hab-d)

Zona	Población (habitantes)					
	Hasta 500	De 501 a 2 000	De 2 001 a 5 000	De 5 001 a 20 000	De 20 001 a 100 000	Más de 100 000
Del Altiplano	30 - 50	30 - 70	50 - 80	80 - 100	100 - 150	150 - 200
De los Valles	50 - 70	50 - 90	70 - 100	100 - 140	150 - 200	200 - 250
De los Llanos	70 - 90	70 - 110	90 - 120	120 - 180	200 - 250	250 - 350

Fuente: (Ministerio de Servicios y Obras Públicas de Bolivia, 2004)

Los valores son muy reducidos con relación a valores de dotación que se utilizan en Europa y Estados Unidos, esto puede deberse a una tendencia de reducir costes de infraestructura, lo cual puede ser perjudicial a la larga.

Debe tenerse en cuenta que el consumo medio diario de agua per cápita varía ampliamente, dependiendo de los siguientes factores:

- Condiciones climáticas.
- Tarifa.
- La calidad del agua, para fines domésticos e industriales.
- La presión de servicio del sistema de distribución.
- La oferta de agua, considerando la capacidad de la fuente.
- Consideraciones económicas y socio-culturales.
- El tipo de servicio, por ejemplo piletas públicas, conexiones domiciliarias o uso de bombas manuales en el área rural.
- El tipo de consumo, si es medido o no.
- Horarios de distribución, si son sistemas continuos o intermitentes.
- Si la población cuenta con servicio de alcantarillado.
- La gestión del sistema, condiciones de operación y mantenimiento.
- Pérdidas y fugas en el sistema.

2.6. FACTOR PICO

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 promedio diaria, de esta forma se expresa la demanda en horas de máximo consumo (Mays, 2000). Las fluctuaciones de consumo son mayores en pequeñas comunidades y en las grandes el factor pico disminuye.

Para comprender mejor el factor de punta o factor pico, debe tomarse en cuenta previamente 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 anual; 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, puede multiplicarse el consumo de ese día por un factor (k_2) que represente este incremento (Ministerio de Servicios y Obras Públicas de Bolivia, 2004).

$$Q_{\max h} = k_2 \cdot Q_{\max d} \quad \text{Ecuación 2.6.1}$$

$Q_{\max h}$ = Caudal máximo horario

k_2 = Coeficiente de caudal máximo horario

$Q_{\max d}$ = 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).

$$Q_{\max d} = k_1 \cdot Q_{md} \quad \text{Ecuación 2.6.2}$$

$Q_{\max d}$ = Caudal máximo diario

k_1 = Coeficiente de caudal máximo diario

Q_{md} = Caudal medio diario

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

$$Q_{\max h} = k_1 \cdot k_2 \cdot Q_{md} \quad \text{Ecuación 2.6.3}$$

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

$$Q_{\max h} = k_p \cdot Q_{md} \quad \text{Ecuación 2.6.4}$$

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 PICO EN UN SISTEMA INTERMITENTE

En un sistema de suministro intermitente, se tienen dos elementos que influyen en el valor del factor pico: son la existencia de depósitos domiciliarios y las pocas horas de suministro. 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 nodos 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 este por debajo de las necesidades reales del cliente (Vairavamoorthy, Akinpelu, Lin, & Ali, 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 de suministro de agua continuos son diseñados con factores pico de 2 a 3, sin embargo cuando trabajan como sistemas intermitentes 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), mientras menos sean las horas de suministro, más grandes serán los factores pico.

2.7. CURVA DE MODULACIÓN

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 de 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.

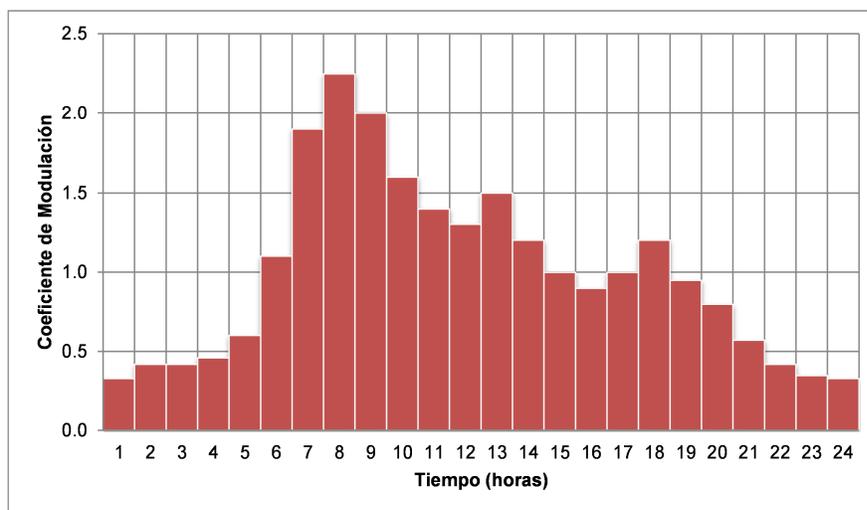


Figura 2.7.1. Curva de modulación diaria para un sistema de suministro continuo

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

$$C_t = \frac{Q_t}{Q_{md}} \quad \text{Ecuación 2.7.1}$$

Ct = Coeficiente de modulación

Qt = Caudal medio de cada hora (L³T⁻¹)

Qmd = Caudal medio diario (L³T⁻¹)

2.7.1. CURVA DE MODULACIÓN EN UN SISTEMA INTERMITENTE

El suministro intermitente produce un patrón de demanda diferente al patrón del suministro continuo. De hecho, no existe un patrón de la demanda, los depósitos domiciliarios de los usuarios se llenan cada vez que el sistema garantiza el agua (Battermann & Macke, 2001). Generalmente en los sistemas intermitentes, las demandas de los consumidores, no están en función de sus necesidades, sino que dependen de la presión disponible en la red (Cabrera, Izquierdo, & Andréu, 1997).

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; en consiguiente, los consumidores ubicados en los puntos de suministro más alejados recibirán menos agua que los más cercanos a la fuente (Totsuka, Trifunovic, & Vairavamoorthy, 2004).

Según mediciones en el sistema de suministro intermitente por bombeo de Judayta (Jordania) realizado en una campaña de registro de 12 zonas (M1 a M12) (Battermann & Macke, 2001), puede apreciarse la variación del consumo o caudal y la presión a lo largo del periodo de suministro; cuando comienza el suministro en las cuatro primeras zonas, 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 (Hrs. 40:00 o 16:00 del segundo día); con respecto al caudal, la tendencia es consumir mayores caudales al inicio y en las horas siguientes ira reduciendo, se observa el efecto de los depósitos de almacenamiento domiciliarios, no existen picos de consumo como en los sistemas de suministro continuos, la curva de consumo varía de 13 a 19 l/s, observándose que en gran parte del horario de suministro el caudal se mantuvo entre 18 y 19 l/s. La razón de la disminución en el caudal se debe a que la bomba se apaga por un periodo de tres horas, posteriormente la bomba se conecta de nuevamente, tanto la presión como el caudal aumentan hasta los niveles anteriores.

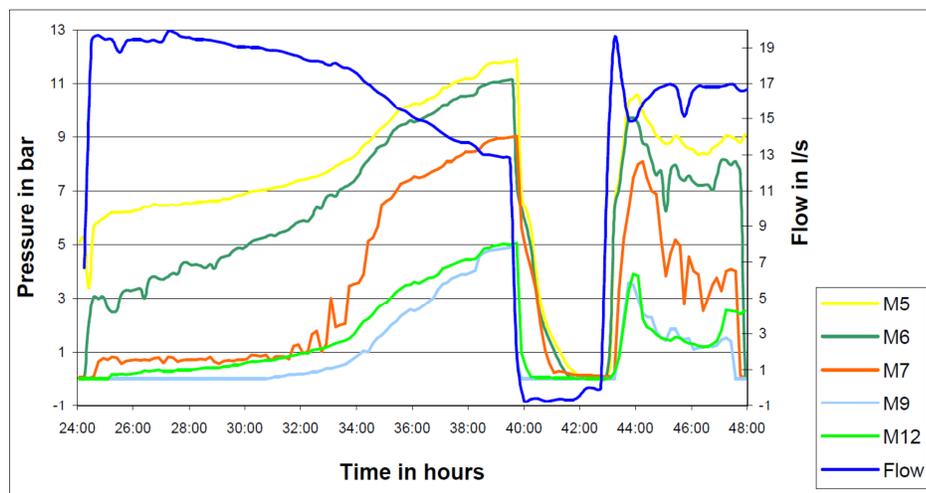


Figura 2.7.2. Mediciones de presión y caudal realizadas en zonas de Judayta (Jordania), segundo día (Battermann & Macke, 2001)

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).

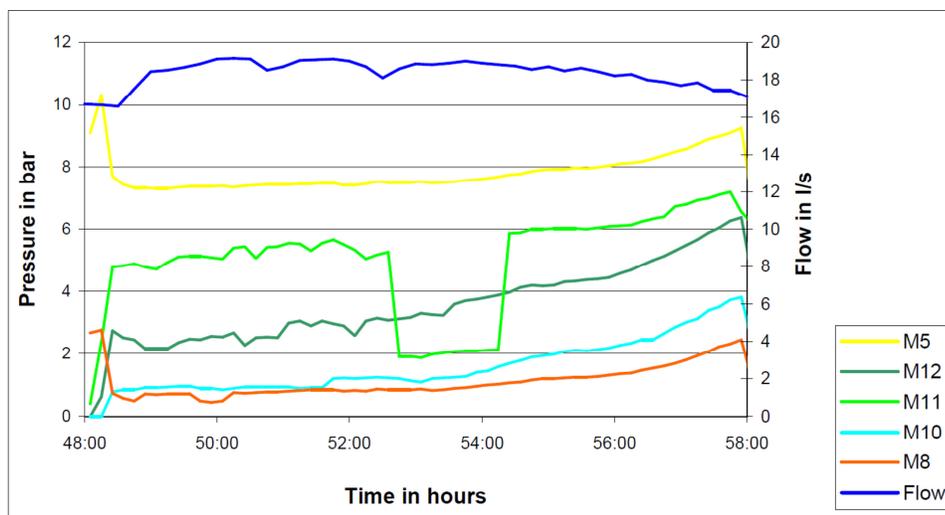


Figura 2.7.3. Presión y caudal durante las 10 últimas horas de medición, Judayta (Jordania) (Battermann & Macke, 2001)

Por lo observado, en un sistema de suministro intermitente, la curva de modulación de la demanda puede representarse como un bloque con caudales iniciales mayores y terminando en caudales pequeños (suministro en varias horas); sin embargo, puede simplificarse el consumo utilizando el valor medio del periodo de suministro, considerando que existe una variación del caudal de $\pm 20\%$ a 30% . La curva puede

ser simplificada por el efecto de laminación producida por los tanques de almacenamiento domiciliarios, tendiendo a un suministro constante u horizontal.

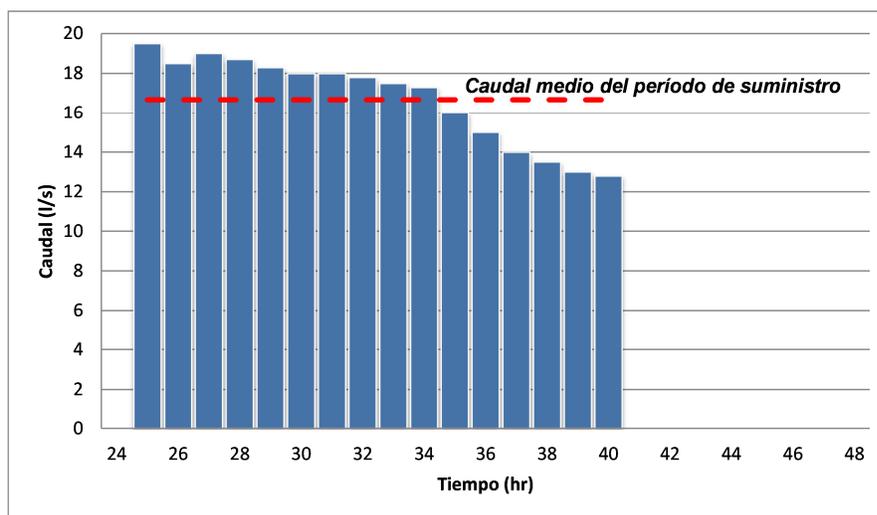


Figura 2.7.4. Representación del suministro, adaptado de datos de (Battermann & Macke, 2001)

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

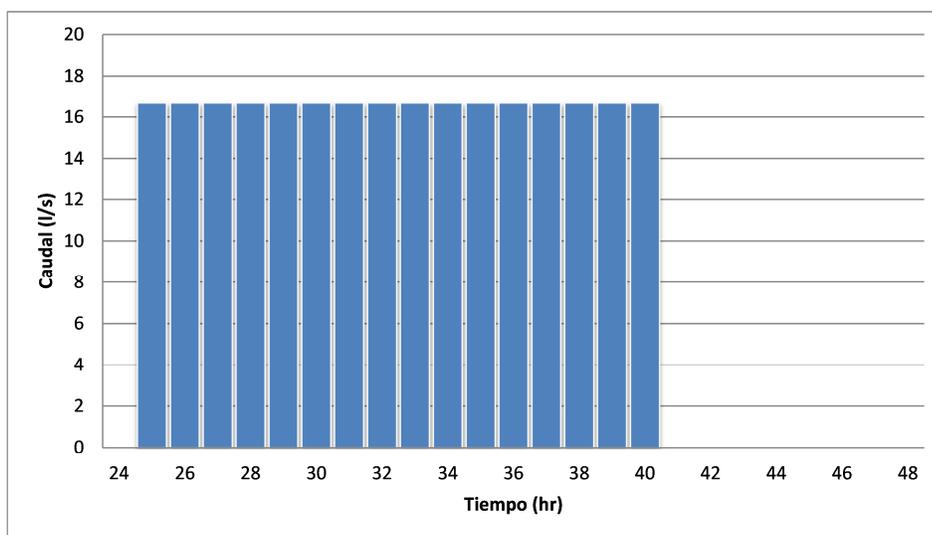


Figura 2.7.5. Representación simplificada del suministro en sistemas intermitentes, adaptado de datos de (Battermann & Macke, 2001)

Esta simplificación permitirá calcular el caudal o volumen en cada hora, que representará el valor medio del consumo en el periodo de suministro. Por lo que puede utilizarse la siguiente expresión:

$$Volumen\ por\ hora = \frac{Volumen\ diario}{Horas\ de\ suministro} \quad Ecuación\ 2.7.2$$

Algunos autores, son más categóricos al afirmar que en redes de 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-Bejar, Palma, Cerón, & De Jesús, 2009).

Simplificando la curva de modulación de un sector de suministro intermitente, puede utilizarse la siguiente relación que definiría los coeficientes de modulación o el factor pico (Cabrera-Bejar, Palma, Cerón, & De Jesús, 2009):

$$C_t = \frac{24}{Horas\ de\ suministro} \quad Ecuación\ 2.7.3$$

2.8. 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 el primer paso en evaluar el agua no facturada y en manejar las pérdidas y fugas en las redes de distribución de agua.

Cuando se realiza el balance hídrico, es importante recordar que la exactitud de los volúmenes de pérdida de agua depende de la exactitud y calidad de datos utilizados en el cálculo. Por lo que una medición confiable de todos los volúmenes de agua que ingresan y salen del sistema de abastecimiento es un requisito fundamental.

Para conocer cómo va trabajando el sistema de agua potable y establecer el nivel de pérdidas, es necesario establecer un balance hídrico a intervalos regulares (generalmente a 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 siguiente tabla:

Tabla 2.8.1. Terminología estándar para el balance hídrico de acuerdo con la IWA (International Water Association)

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	
	Pérdidas de agua Q_P	Consumo autorizado no facturado Q_{AUNF}	Consumo no facturado medido	Agua no facturada
			Consumo no facturado no medido	
		Pérdidas aparentes Q_{PA}	Consumo no autorizado	
			Inexactitudes de los contadores y errores en el manejo de datos	
			Pérdidas reales Q_{PR}	
Fugas y reboses en tanques de almacenamiento				
		Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del contador del cliente		

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 las pérdidas de agua (columna B) menos las pérdidas aparentes (columna C).

- **Paso 9:** Evaluar los componentes de las pérdidas reales (columna D), utilizar 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 a 100% (Alegre, 2004).

Una descripción más detallada de estos elementos permite establecer su importancia, a continuación se realiza la descripción de cada uno de ellos:

2.8.1. 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.

2.8.2. CONSUMO AUTORIZADO

Es el volumen de agua medida y/o no medida consumida por los usuarios registrados, el operador y otras partes autorizadas. 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 luego del punto de medición del cliente y el consumo de agua por parte de la empresa operadora del servicio, por ejemplo cuando se lavan tuberías o se lavan filtros.

2.8.3. 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.

2.8.4. 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 suma de consumo autorizado no facturado y las pérdidas de agua.

2.8.5. 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 pueden subdividir a su vez en consumo no autorizado, inexactitudes de medición y errores de manejo de datos. Las pérdidas reales están constituidas de fugas desde tuberías de conducción y distribución, fugas desde conexiones de servicio o acometidas y fugas en tanques o depósitos de almacenamiento, que incluye el rebose del depósito. Muchas veces, las pérdidas físicas que se producen después del contador del abonado son excluidas de la evaluación de las pérdidas reales, a veces puede ser muy importante evaluarlo y tomarlo en cuenta para la gestión de la demanda (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and VAG Armaturen GmbH, 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 consumido 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, en consecuencia se tendrán bajos caudales 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.

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, debería 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).

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.

Desde el punto de vista de sostenibilidad, las pérdidas de agua generan siguientes impactos negativos (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and VAG Armaturen GmbH, 2012):

- **Impactos económicos:** que implican costes adicionales producto de la captación, bombeo, tratamiento y transporte del agua que se pierde, 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.
- **Impactos técnicos:** como producto de las pérdidas reales, se reduce la cantidad de agua disponible en el sistema, lo cual incide en la reducción de la cobertura de demanda existente, si la situación se agrava puede dar paso a que el suministro ya no realice continuamente. Cuando a consecuencia de este escenario se llega a un sistema intermitente, el mismo causará los problemas técnicos, ya detallados en su momento.
- **Impactos sociales:** 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, e incluso llegar a problemas de salud por el riesgo de contaminación causado por las fisuras que producen las fugas.
- **Impactos ambientales:** la solución habitual para compensar las pérdidas de agua es aumentar el 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, causando indirectamente emisiones de dióxido de carbono, que se podrían haber evitado o reducido.

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 zonas de baja densidad de conexiones (Lambert & Hirner, 2000).

2.9.2. PÉRDIDAS REALES

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. En un sistema bien operado las pérdidas de agua deben ser observadas y controladas, registrándose cada año (Lambert & Hirner, 2000).

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:

- 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.
- 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):

- a) Las fugas en las tuberías o las juntas defectuosas se incrementará con el aumento de la presión.
- b) 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.
- c) Las presiones grandes permitirán que la fuga aumente su velocidad y por lo tanto puede ayudar temporalmente a localización de fugas, debido a que la misma aparecerá más pronto y al producirse más ruido esta será ubicada de forma más sencilla por métodos de resonancia.
Por el contrario, en los sistemas con presiones pobres y suministro intermitente, las fugas y los efectos sonoros de las mismas se reducen, por lo que su ubicación es una tarea más difícil.
- d) Los transitorios hidráulicos son causa de fugas, el aumento repentino de la presión puede hacer que las tuberías se fracturen o 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.

- e) En los sistemas de suministro intermitente se tiene una variación continua de las presiones, de valores altos a bajos o viceversa, lo cual puede producir fatiga en las tuberías y en consecuencia fugas. En tuberías de PVC, la fatiga también puede es causada debilitamiento de la tubería por malas prácticas en su almacenamiento.

Las pérdidas reales se pueden clasificar de acuerdo a su ubicación dentro del sistema y su tamaño y al tiempo durante el cual fugan.

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 abonado
- 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 estas fugas.



Fotografía 2.9.1. Reparación de una fuga reportada o visible

FUENTE: SeLA - ORURO

- 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, 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, se observan los diferentes tipos de fugas.

FUGA REPORTADA

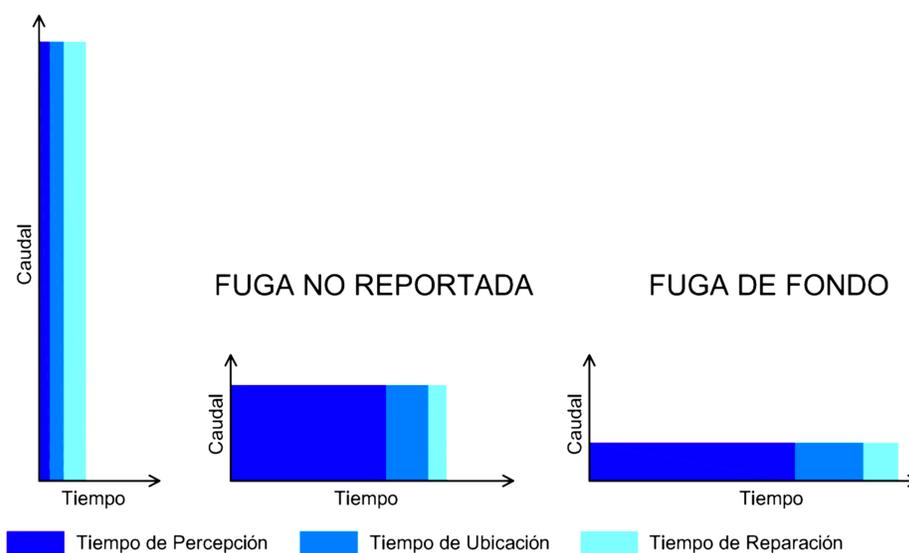


Figura 2.9.1. Características del caudal y del tiempo en diferentes tipos de fugas

FUENTE: (Morrison, Tooms, & Rogers, 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, Cabrera, Arregui, Cabrera Jr, & Cobacho, 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 DE 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, Liemberger, & Marin, 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, Tooms, & Rogers, 2007).

2.9.4.1. Métodos para estimar las fugas en sistemas de suministro intermitentes.

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).

a) Método de parar el grifo.

Este método se aplica en áreas pequeñas, aisladas que se pueden crear cerrando válvulas de aislamiento. Como paso siguiente, todas las conexiones de los clientes tienen que cerrarse para evitar el llenado de los depósitos domiciliarios. Este sistema entonces se presuriza y pueden medirse las pérdidas, este enfoque dará una idea de dónde se ubican las pérdidas pero un balance hídrico apropiado no puede desarrollarse todavía, ya que el modo de operación no está en línea con las condiciones normales. Una desventaja de este método es que se perderán volúmenes considerables de agua en el punto de fuga y todas las fugas no se pueden identificar durante el corto período de prueba. Además, los clientes se quedan sin suministro por varias horas.

b) Método de cisternas móviles

Este método se basa en una fuente de agua extra (cisterna) que se utiliza para abastecer al área durante el período de prueba. Se desarrolló para superar la dificultad de desviar el suministro a áreas pequeñas y aisladas. Adicionalmente, no se perturba la operación normal y se puede limitar la cantidad de agua perdida. Se inyecta el agua al sistema desde un camión cisterna, se mantiene la presión de prueba deseada utilizando una bomba montada. En este caso tampoco se puede abastecer a los clientes de agua durante el período de prueba.

2.9.5. HIDRÁULICA DE FUGAS

Las fugas o pérdidas reales normalmente constituyen una proporción importante de las pérdidas totales de agua. Los defectos en las tuberías, como agujeros, rajaduras longitudinales y circunferenciales, uniones que fugan, etc., son el factor principal de las pérdidas reales. Varios estudios han probado la alta sensibilidad de la fuga a la presión, esto implica que elevar la presión incrementará la fuga de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$q = c \cdot p^\alpha \quad \text{Ecuación 2.9.1}$$

Donde:

q = Caudal de fuga

c = Coeficiente de fuga

p = Presión en la tubería

α = 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 comúnmente utilizando una versión simplificada de la ecuación del orificio.

2.9.5.1. Presión y Fugas

A la técnica de la reducción de las fugas en base a una reducción de la presión, se denomina gestión de la Presión, que es la práctica de manejar presiones del sistema a niveles óptimos de servicio a la vez que se asegura un suministro suficiente y eficiente. Los efectos positivos de la gestión de la presión son el reducir las pérdidas reales de agua, disminuyendo presiones innecesarias o excesivas y eliminando la fluctuación de presiones fuertes o transitorias. Como existe una 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, donde se tienen materiales combinados el exponente de fuga general promedio está cerca de 1 (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and VAG Armaturen GmbH, 2012). La relación presión-fuga establece una la proporción de la reducción de la presión equivale aproximadamente a la proporción de reducción del flujo de fuga en las grandes redes.

De acuerdo con (Morrison, Tooms, & Rogers, 2007), la eficiencia en la gestión de la presión se puede expresar utilizando:

$$q_1 = q_0 \cdot \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^\alpha \quad \text{ó} \quad \frac{q_1}{q_0} = \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^\alpha \quad \text{Ecuación 2.9.2}$$

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

α = Exponente de fuga

Para comprender mejor esta situación se utiliza el siguiente gráfico para diferentes valores de α :

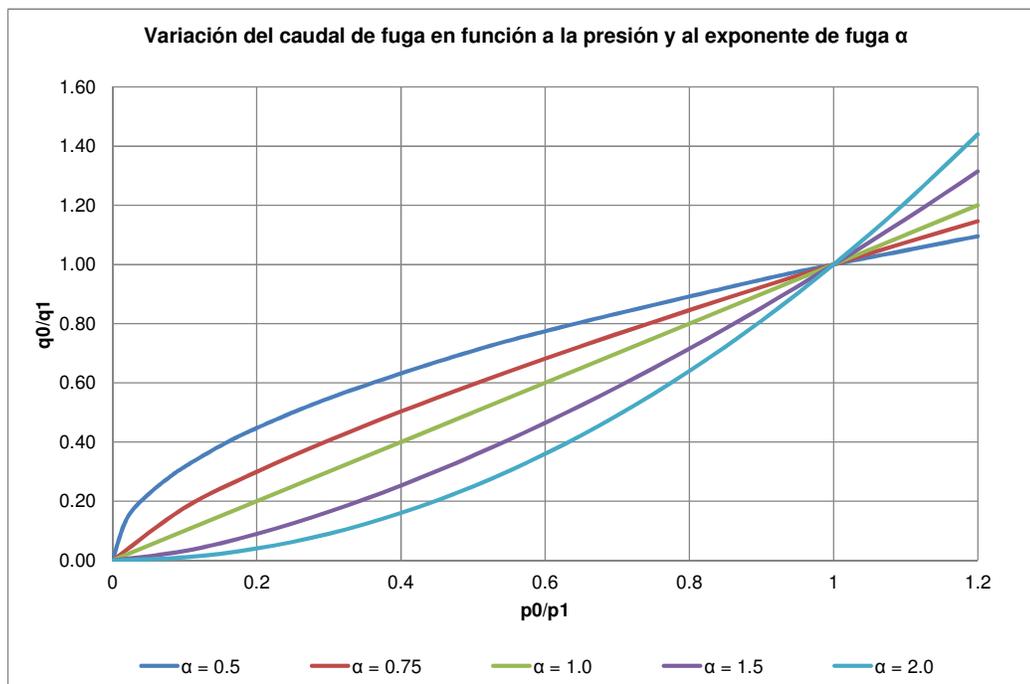


Figura 2.9.2. Variación del caudal de fuga en función de la presión y el exponente de fuga

FUENTE: (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and VAG Armaturen GmbH, 2012)

El gráfico muestra como reduciendo la presión 10% por ejemplo, se lograría reducir el caudal de fuga entre 5 a 30%, en función del exponente de fuga de la red, el mismo análisis puede seguirse de forma inversa, si se incrementa la presión también se incrementará el caudal de fugas. Será importante analizar esta situación, en el entendido de que el presente trabajo plantea mejorar la presión de servicio, lo cual sin duda incrementará las posibilidades de fugas en la red; sin embargo esta situación puede solucionarse en un sistema de suministro intermitente con la regulación de válvulas de ingreso a cada sector, o si corresponde con válvulas reguladoras de presión.

2.9.6. SECTORIZACIÓN Y DISTRITOS HIDROMÉTRICOS DMA

Un distrito hidrométrico (DMA, District Meter Area, por sus siglas en inglés) es un área discreta de una red de distribución de agua; generalmente, se crea cerrando válvulas de aislamiento de modo que sea flexible a las demandas cambiantes, también puede crearse un DMA desconectando permanentemente las tuberías de las áreas contiguas.

El uso de DMA se convirtió en una técnica común en la detección de pérdidas en los sistemas de suministro continuo, sin embargo en abastecimientos intermitentes es común la sectorización para el suministro por horas, aunque no son estrictamente DMA debido a que generalmente no se cuenta con contadores o medidores de caudal.

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 abastecimiento y de calidad; para generar los DMA debe tenerse un conocimiento detallado y profundo del funcionamiento hidráulico de la red existente.

La primera etapa de diseño de un DMA debe incluir la revisión de la infraestructura de la red de suministro, el diseño se iniciaría desde la red principal y se extenderá hacia la red de distribución, el objetivo es separar tanto como sea posible los DMA de la red principal; de esta forma, se mejora el control de la red principal sin afectar a las redes secundarias. Por consiguiente, será necesario determinar las prácticas locales o la flexibilidad de la oferta, por ejemplo la capacidad de lucha contra incendios.

El agua que fluye hacia y desde el DMA debe medirse periódicamente, se analizarán los caudales para monitorear el nivel de fuga. Según (Farley, 2001), la clasificación de los DMA es:

- DMA de ingreso único.
- DMA de ingresos múltiples.
- DMA en cascada.

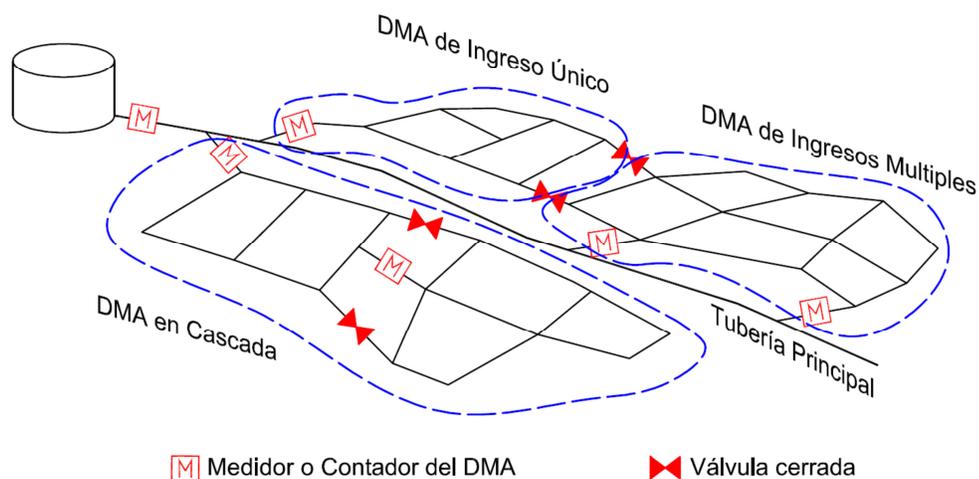


Figura 2.9.3. Clasificación de los DMA (Farley, 2001)

La subdivisión de grandes redes de distribución de agua en un número ilimitado de DMA tiene la ventaja de que se pueden ubicar fugas de forma más rápida y mucho más precisamente (tiempo reducido de ubicación). En caso de que las empresas de agua realicen mediciones simultáneas, se pueden detectar caudales repentinos, reduciendo los tiempos de percepción, ubicación y reparación de fugas. Adicionalmente, se puede cuantificar el nivel de fuga para distintas áreas, entonces se hará más eficiente la detección de fugas en sectores problemáticos.

Asimismo, los DMA 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 DMA para lograr más adelante un suministro continuo.

2.9.6.1. Diseño de DMA

El diseño de los DMA requiere un conocimiento profundo del sistema de suministro de agua, por lo que es indispensable la existencia de una red completa actualizada, registro e información topográfica. Por otro lado, se debe disponer de patrones de consumo de agua y datos operativos sobre flujos y presiones. Para las redes complejas, se puede requerir un modelo hidráulico calibrado para determinar los impactos de sectorización sobre las presiones de servicio y para detectar cuellos de botella potenciales, tubos redundantes y zonas en peligro por estancamiento.

Deben considerarse los siguientes criterios para el diseño de un DMA (Farley, 2001):

- No se debe incluir tuberías principales o depósitos de almacenamiento, en caso de ser inevitable debe instalarse medidores de flujo para controlar el ingreso y salida de agua.
- Cada DMA debe tener de preferencia un punto de suministro único medido.

Se crearán los límites del DMA cerrando válvulas o colocando tapones que corten el paso de agua hacia el DMA contiguo o la tubería principal. Los límites de un DMA están establecidos por límites naturales como ríos, o por artificiales como líneas de ferrocarril o vías principales. Se debe minimizar el número de válvulas a cerrarse para reducir las fugas.

Las variaciones de elevación del terreno deben ser mínimas en el DMA, condición importante en el momento de ejecutar un sistema de gestión de presión, de no ser posible el punto de ingreso en lo posible deberá estar en una zona elevada del DMA.

Se debe determinar los tipos de consumidores (domésticos, industriales, comerciales o clientes críticos como hospitales) y sus respectivos requerimientos de suministro de agua.

Debe respetarse las regulaciones legales que rigen las presiones mínimas, las restricciones locales debido a la topografía y altura de los edificios así como las necesidades de caudales contra incendios. Se puede dejar abierto el límite si el cerrar válvulas en un punto determinado generara problemas de presión, pero se debe instalar medidores de flujo para controlar los flujos de ingreso y los flujos de salida.

El cerrar válvulas de aislamiento para crear un DMA incrementará el número de tubos sin salida. De este modo, los DMA se deben diseñar de tal manera que se evite problemas de calidad del agua relacionados al

estancamiento. Los modelos de red hidráulica ayudan a identificar y evitar zonas potenciales de estancamiento.

Según la IWA (Morrison, Tooms, & Rogers, 2007), un DMA debe estar compuesto por 500 a 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 DMA se dividen en tres categorías (Farley, 2001):

- Pequeños: menos de 1000 viviendas.
- Mediano: entre 1000 a 3000 viviendas.
- Grande: de 3000 a 5000 viviendas.

También es factible y útil implementar DMA 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 clientes.

2.10. PRINCIPIOS HIDRÁULICOS EN CONDUCCIONES A PRESIÓN

Como los sistemas de suministro de agua, continuo o intermitente, trabajan a presión, se expondrá en forma resumida los métodos y ecuaciones de cálculo hidráulico para estas condiciones.

2.10.1. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad no es más que un caso particular del principio de conservación de la masa. Se basa en que el caudal del fluido permanecerá constante a lo largo de toda la conducción.

Como el caudal debe mantenerse constante a lo largo de todo el conducto, cuando la sección disminuye, la velocidad del flujo aumenta en la misma proporción y viceversa.

2.10.2. ECUACIÓN DE BERNOULLI

Para la deducción de la ecuación de Bernoulli se admiten las siguientes hipótesis (aunque con la consideración de las dos primeras de flujo incompresible y no estacionario se tiene una ecuación más completa):

- Flujo estacionario (invariable en el tiempo).
- Flujo incompresible (densidad constante).
- Fluido no viscoso.
- Fuerzas presentes en el movimiento: fuerzas superficiales de presión y fuerzas másicas gravitatorias (peso del fluido).
- No hay intercambio de trabajo o calor con el exterior del flujo.

De esta forma se tiene para dos puntos de referencia:

$$\frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \quad \text{Ecuación 2.10.1}$$

Cada uno de los términos representa una energía específica, la ecuación muestra cada una de las energías por unidad de peso de fluido, que es equivalente a una longitud o altura. La interpretación de cada término es la siguiente:

- Un cuerpo de masa m situado a una altura z , posee una energía potencial o de posición, referida al plano de referencia situado en cota cero: $E_p = m \cdot g \cdot z$. El término z representa por tanto la energía potencial del fluido por unidad de peso, y se le designa como altura de posición.
- El término $p/\rho \cdot g$ representa la energía necesaria para elevar la unidad de peso del elemento de fluido hasta la altura $p/\rho \cdot g$. Se denomina altura de presión. A la suma de las alturas de potencial y de presión se le conoce como *altura piezométrica*, porque se corresponde con la altura de columna observada con un tubo piezométrico conectado a una conducción con un líquido.
- Finalmente, el término $v^2/2 \cdot g$ representa la energía cinética por unidad de peso del elemento de fluido y se le llama altura de velocidad.

Se denomina altura de energía H , a la suma de la altura de velocidad más la altura piezométrica, es decir, a la suma de los tres términos de cada miembro en la ecuación de Bernoulli:

$$H = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + z \quad \text{Ecuación 2.10.2}$$

El teorema de Bernoulli establece que la carga es constante a lo largo de una línea de corriente bajo las hipótesis iniciales consideradas. Cuando entre dos secciones 1 y 2 existan pérdidas o aportes de energía, la ecuación de Bernoulli puede escribirse como:

$$H_1 = H_2 + h_{12} \quad \text{Ecuación 2.10.3}$$

h_{12} toma un valor positivo cuando representa a una pérdida (fluido desplazándose de 1 a 2), es negativo cuando resulta de un aporte de energía (Pérez, Iglesias, & Fuertes, 2005).

2.10.3. PÉRDIDAS DE CARGA

En la práctica todos los fluidos reales son viscosos, y la aplicación de la ecuación de Bernoulli podrá perder validez en función de la importancia relativa de las fuerzas viscosas en cada caso. La viscosidad y la resistencia al movimiento que generan las paredes de la tubería, hace que el fluido deba emplear parte de su energía mecánica en compensar el trabajo de oposición de estas fuerzas; al no ser un trabajo reversible, se produce una transformación de energía mecánica en energía interna (las pérdidas de energía producen un pequeño incremento de la temperatura).

Graficando la situación descrita se tiene:

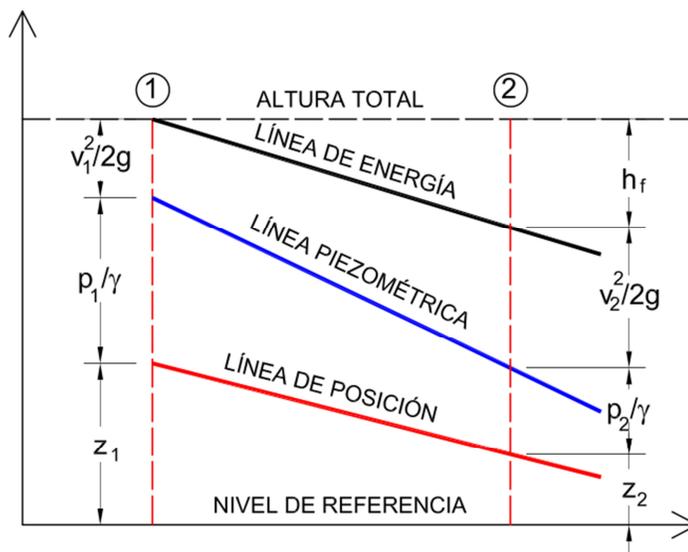


Figura 2.10.1. Representación gráfica de las líneas de energía, piezométrica y de posición.

Desde el punto de vista de la ecuación de Bernoulli, esta transformación se contabiliza como una disminución progresiva de la altura de energía o pérdida de carga h_f .

Si H_1 es la altura de energía del fluido en la sección S_1 y H_2 la carga del fluido en la sección S_2 , se tendrá:

$$h_f = H_1 - H_2 = \left(\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \right) \quad \text{Ecuación 2.10.4}$$

Las relaciones más conocidas para la determinación de la pérdida de carga son las siguientes:

Tabla 2.10.1. Ecuaciones de pérdidas de carga

ECUACIÓN	AUTOR(ES)	CARACTERÍSTICAS
$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$	Darcy - Weisbach	El coeficiente de fricción f es función del número de Reynolds (Re) y del coeficiente de rugosidad o rugosidad relativa de las paredes de la tubería (ϵ_r), su cálculo se realiza mediante la ecuación implícita de Coolebrook - White, en las últimas décadas se plantearon ecuaciones explícitas, la más usada es la de Swamee & Jain.
$h_f = 10.674 \cdot \left(\frac{Q^{1.852}}{C^{1.852} \cdot D^{4.871}} \right) \cdot L$	Hazen-Williams	El uso de la ecuación es válido solamente para agua que fluye en la tubería entre los 5°C a 25°C. El coeficiente de rugosidad "C" no es función de la velocidad ni del diámetro de la tubería. Es muy utilizado en el cálculo de pérdidas de carga en tuberías de redes de distribución
$h_f = 10.29359 \cdot \left(\frac{n^2 \cdot Q^2}{D^{5.33}} \right) \cdot L$	Manning	Ecuación utilizada mayormente en el cálculo de conductos a lámina libre, la configuración mostrada es utilizada en el cálculo de tuberías a presión. No toma en cuenta las variaciones de viscosidad con la temperatura

La selección de la fórmula de pérdida de carga dependerá de la naturaleza del problema y de las preferencias de quien realiza los cálculos.

La fórmula de Darcy-Weisbach es una ecuación con mayor base física, toma en cuenta la viscosidad y densidad del fluido, de esta forma esta ecuación es útil para calcular la pérdida de carga en una tubería que transporte un líquido Newtoniano a cualquier régimen de flujo.

Por otro lado, las ecuaciones de Hazen-Williams y Manning son expresiones de base empírica, desarrolladas a partir de datos experimentales, generalmente se usan en el transporte de fluidos en condiciones de flujo turbulento.

Asimismo, es predominante el uso de la fórmula de Hazen-Williams en América, Darcy-Weisbach en Europa y menos utilizada para flujo a presión la ecuación de Manning, aunque algunas veces se utiliza en Australia (Walski, y otros, 2003).

2.10.3.1. PÉRDIDAS DE CARGA EN ACCESORIOS Y SINGULARIDADES

Además de las pérdidas de carga por rozamiento, se producen otro tipo de pérdidas que se originan en puntos singulares de las tuberías (cambios de dirección, codos, juntas, accesorios) y que se deben a

fenómenos de turbulencia. La suma de estas pérdidas de carga localizadas más las pérdidas por rozamiento dan como resultado las pérdidas de carga totales.

Generalmente, las pérdidas de carga localizadas sólo pueden determinarse de forma experimental, debido a que son causadas por una disipación de energía motivada por las turbulencias, pueden expresarse en función de la altura cinética corregida mediante un coeficiente empírico K .

En el cálculo hidráulico de redes de distribución suele no considerarse estas pérdidas localizadas debido a que no representan más del 5% de la pérdida de carga total, por lo que solamente se considera la pérdida de carga por rozamiento en las tuberías (Sotelo Ávila, 1999).

2.11. HIDRÁULICA DE REDES

En las redes hidráulicas de sistemas de suministro continuo que tienen una presión suficiente en los nodos para mantener una demanda, los elementos están interconectados, de tal forma que cada uno es afectado e influencia al elemento contiguo; todo el sistema está interrelacionado, las condiciones que afectan a un elemento deben ser consistentes y/o coherentes con las condiciones de los otros elementos, dos conceptos definen estas interconexiones, conocidas como leyes de Kirchoff:

- Conservación de la masa
- Conservación de la energía

Asumiendo que en una red se tiene una demanda constante en los nudos de consumo independientes de la presión (Demand Driven Analysis), la resolución del problema se realiza en base a las siguientes formulaciones (Pérez, Iglesias, & Fuertes, 2005):

- *Formulación por nudos*: cuya ventaja principal es que solamente se necesita conocer las líneas conectadas al nudo, sin necesidad de definir las mallas, de esta forma se simplifica el planteamiento del sistema de ecuaciones, las incógnitas a encontrar son las alturas piezométricas de los nudos de consumo y los caudales en los nudos de altura conocida. El método de la gradiente (Todini & Pilati, 1988) está basado en este planteamiento, actualmente programas como el EPANET o el WATERCAD utilizan este algoritmo.
- *Formulación por líneas*: utiliza ecuaciones de energía en cada línea, los valores que se encuentran con el sistema de ecuaciones son los caudales en las líneas y caudales en los nudos de altura conocida, la teoría lineal con gradiente es el método que utiliza esta formulación.
- *Formulación por mallas*: está planteada para reducir el número de incógnitas al número de mallas, calculado un Δq corrector para cada malla. Esto implica asumir datos iniciales y realizar un proceso iterativo para el cálculo de las incógnitas, verificando condiciones de continuidad en los nudos. Los métodos más conocidos que usan esta forma de resolución de redes son el método de Cross y Newton-Raphson.

2.12. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE UN SISTEMA 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, Akinpelu, Lin, & Ali, 2001).

Existe abundante literatura para la planificación, diseño, operación y mantenimiento de los sistemas de suministro continuos, mientras que el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento intermitentes 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.

2.12.1. 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 (nodos 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 nodos. En este tipo de análisis, cualquier relación entre la demanda y la presión son ignoradas y las demandas son siempre satisfechas aun cuando las presiones en los nodos puedan 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 del DDA (Cheung, Van Zyl, & Reis, 2005).

Entonces, un modelo de distribución de agua convencional se crea mediante el uso de la formulación del enlace de nodos, basados en leyes de conservación, balance de masa en nodos y conservación de energía alrededor de un circuito hidráulico. El nodo es un punto en el que se asigna el consumo de agua y se define como demanda, como es un valor conocido, la carga hidráulica en el nodo puede resolverse. Sin embargo, esta formulación es válida sólo si las presiones hidráulicas en todos los nodos son las adecuadas para que la demanda sea independiente de la presión (Wu, y otros, 2006). En muchos casos la presión nodal no es suficiente para suministrar la demanda deseada, en estas situaciones la demanda pasa a depender de la presión, a este enfoque se lo conoce como PDD (Pressure Dependent Demand).

Por ejemplo, cuando se produce un corte de energía en un sistema de suministro continuo, las presiones nodales se ven afectadas, 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, y otros, 2006).

La relación PDD está definida por una función exponencial y un tramo lineal (Wu, y otros, 2006), las relaciones son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 &0 && H_i \leq 0 \\
 &\frac{Q_i^s}{Q_{ri}} = \left(\frac{H_i}{H_{ri}}\right)^\alpha && 0 < H_i < H_t && \text{Ecuación 2.12.1} \\
 &\left(\frac{H_i}{H_{ri}}\right)^\alpha && H_i \geq H_t
 \end{aligned}$$

Donde:

H_i = Presión calculada en el nodo

Q_{ri} = Demanda de referencia o demanda solicitada en el nodo

Q_i^s = Demanda calculada en el nodo

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 nodo

α = Exponente de la relación de demanda/presión

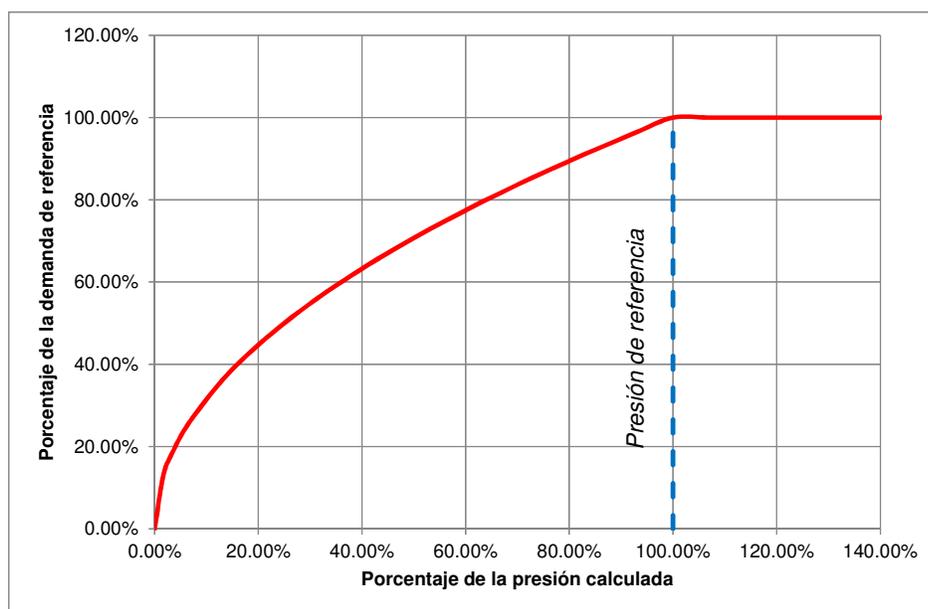


Figura 2.12.1. Curva típica de la Demanda Dependiente de la Presión (PDD), adaptado de (Wu, y otros, 2006)

A diferencia del modelo de distribución de agua convencional, donde la demanda en el nodo es un valor conocido, en el enfoque de modelado 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 al algoritmo global de gradiente (GGA) definido por Todini (1988), (Wu, y otros, 2006) establecen la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{12} \\ \dots & \ddots & \dots \\ A_{21} & \dots & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ \dots \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10}H_0 \\ \dots \\ -q \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2.12.2}$$

Es añadida una nueva matriz diagonal A_{22} :

$$A_{22}(i,i) = Q_i^s \quad \text{Ecuación 2.12.3}$$

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

$$\begin{bmatrix} D_{11} & \dots & A_{12} \\ \dots & \ddots & \dots \\ A_{21} & \dots & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dQ \\ \dots \\ dH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dE \\ \dots \\ dq \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 2.12.4}$$

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

$$D_{22}(i,i) = \begin{cases} 0 & H_i \leq 0 \\ \alpha \left(\frac{H_i}{H_t} \right)^{\alpha-1} \cdot Q_i & 0 < H_i < H_t \\ 0 & H_i \geq H_t \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.12.5}$$

En los sistemas de suministro intermitente, el efecto de los tanques de almacenamiento domiciliarios y las pocas horas de servicio, hacen difícil superar el límite de presión que independiza a la demanda de la presión, por lo que el análisis de este tipo de suministro debe realizarse utilizando PDD.

Considerando que el nudo de suministro tendrá variaciones de presión entre un valor mínimo, que genera el comienzo del suministro, hasta un valor máximo de presión definido por las condiciones del sistema, se obtienen las siguientes relaciones:

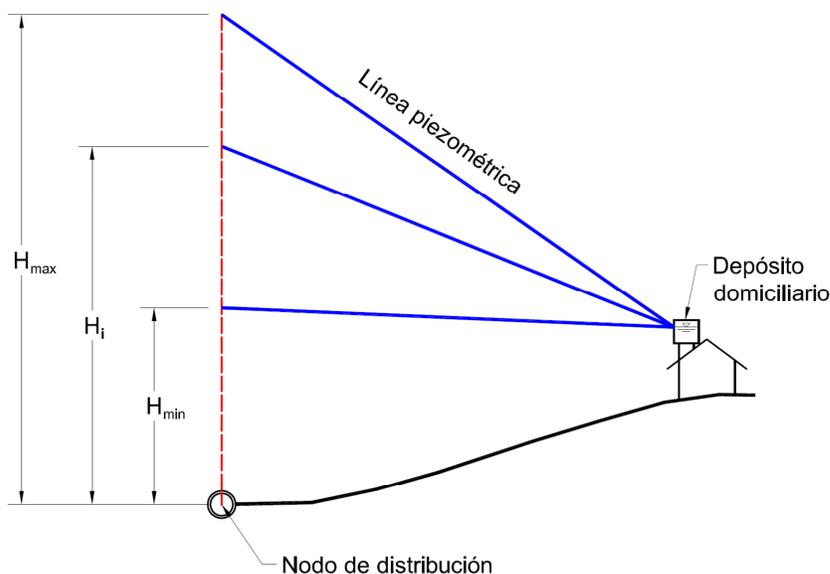


Figura 2.12.2. Esquema simplificado de la variación de la presión y su relación con el caudal suministrado.

Donde:

H_{\min} = Presión mínima en el nudo de suministro, a partir de esta presión comienza el suministro.

H_{\max} = Presión máxima en el nudo de suministro

Q_i = Caudal de suministro o demanda de la vivienda.

Q_{\max} = Caudal máximo disponible para suministro.

De forma general, la pérdida de carga está definida por la relación:

$$h_f = K \cdot Q^n \quad \text{Ecuación 2.12.6}$$

Donde:

K = Factor que depende del tipo de material, tipo de fluido, longitud y diámetro del conducto.

n = Exponente relacionado con la ecuación de pérdidas de carga utilizada (Darcy - Weisbach = 2, Hazen - Williams = 1.852, etc.)

Del gráfico se observa que:

$$H_{\max} = H_{\min} + h_{f \max} \quad \text{Ecuación 2.12.7}$$

$$H_i = H_{\min} + h_{f i} \quad \text{Ecuación 2.12.8}$$

Entonces se tendrá:

$$h_{f \max} = H_{\max} - H_{\min} \quad \text{Ecuación 2.12.9}$$

$$h_{fi} = H_i - H_{\min} \quad \text{Ecuación 2.12.10}$$

Haciendo la pérdida de carga función del caudal se tiene:

$$K \cdot Q_{\max}^n = H_{\max} - H_{\min} \quad \text{Ecuación 2.12.11}$$

$$K \cdot Q_i^n = H_i - H_{\min} \quad \text{Ecuación 2.12.12}$$

Considerando que las condiciones de la conducción de suministro se mantienen, dividiendo ambos términos se tiene una relación entre el caudal demandado y las presiones:

$$Q_i = Q_{\max} \cdot \left(\frac{H_i - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \right)^{1/n} \quad \text{Ecuación 2.12.13}$$

En resumen, la dependencia de la demanda está condicionada bajo los siguientes criterios:

Tabla 2.12.1. Condiciones de variación de la demanda en función de la presión

CONDICIONES DE PRESIÓN EN EL NUDO DE DISTRIBUCIÓN	CAUDAL DE DEMANDA
$H_i \leq H_{\min}$	$H_i = 0$
$H_i > H_{\max}$	$H_i > Q_{\max}$
$H_{\max} > H_i > H_{\min}$	$Q_i = Q_{\max} \cdot \left(\frac{H_i - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \right)^{1/n}$

Adaptado de (Ingeduld, Svitak, Pradhan, & Tarai, 2006)

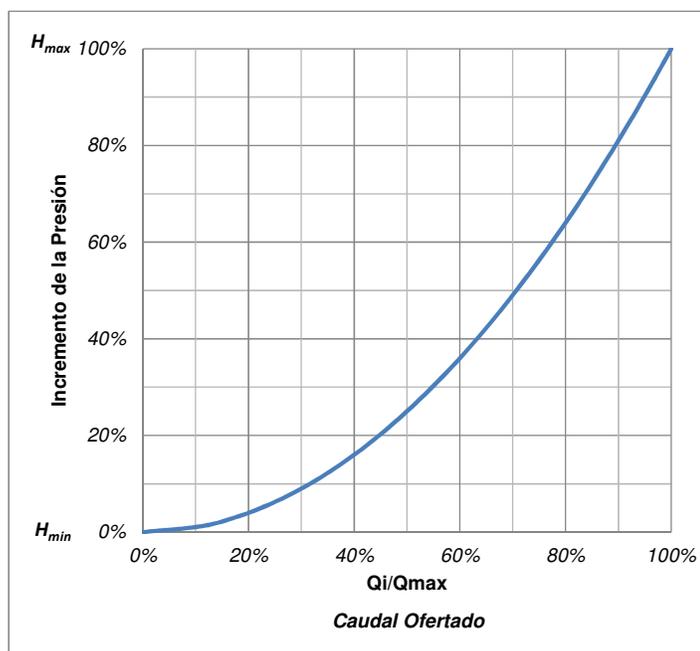


Figura 2.12.3. Incremento del caudal ofertado o suministrado con relación a la presión de servicio

Como puede observarse en el gráfico, al comienzo del suministro, pequeñas variaciones en la presión generan un crecimiento grande en la cantidad de agua ofertada o suministrada; en un escenario de presiones son bajas, puede hablarse de un estado de escases de agua.

2.12.2. PRESENCIA DE AIRE EN EL SUMINISTRO INTERMITENTE.

El problema de la presencia de aire en los sistemas de suministro intermitente se producen 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 existan 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. Las causas de sobrepresión en las tuberías debidas a la presencia de aire pueden darse debido a (Fuertes, Izquierdo, Iglesias, Cabrera, & García-Serra, 1997):

- 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.

2.13. SIMULACIÓN Y MODELADO DE REDES

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, y otros, 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 modelación 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, y otros, 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, en el siguiente gráfico se muestra una clasificación en función de su complejidad y la escala de tiempo que utilizan.

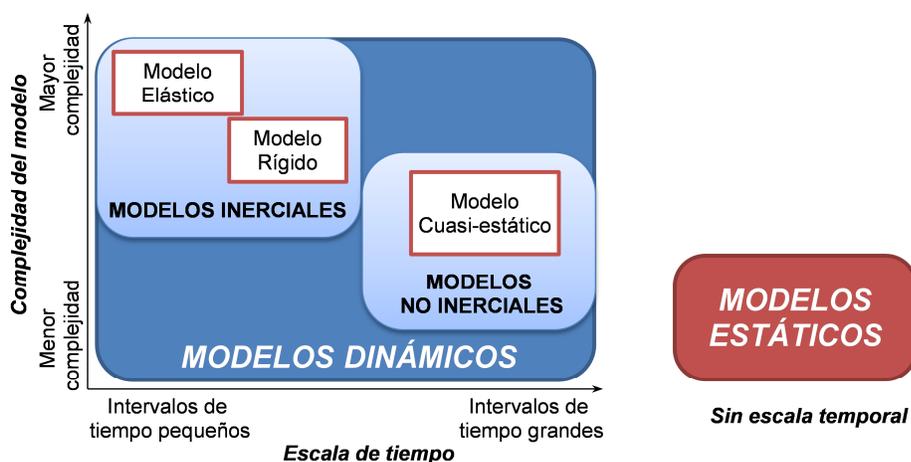


Figura 2.13.1. Esquema de los modelos de análisis para sistemas de suministro de agua

Fuente: (Iglesias, Vicente, & Pérez, 2010)

2.13.1. MODELOS DE ANÁLISIS ESTÁTICO.

Denominados también modelos en régimen permanente, calculan las variables para un instante definido en base a unas condiciones dadas (Iglesias, Vicente, & Pérez, 2010), no tienen en cuenta las variaciones temporales que puedan tener las variables como demanda, presiones, niveles en tanques y otros.

2.13.2. 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, a su vez su clasificación es la siguiente:

2.13.2.1. Modelos no inerciales

En este tipo de modelos se desprecia la inercia del fluido en el sistema, es dinámico porque se disponen de una serie de condiciones de contorno variables con el tiempo (Iglesias, Vicente, & Pérez, 2010), de tal forma que el análisis para cada momento es estático. Por estas condiciones de cálculo también es denominado cuasi-estático o modelos de simulación en periodo extendido, es la forma de cálculo más extendida en software para el análisis de redes de distribución de agua (WATERCAD y EPANET).

2.13.2.2. Modelos inerciales

Estos modelos 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:

- Modelo elástico
- Modelo rígido

2.13.3. EL PROCESO DE MODELADO

La modelación en un proceso iterativo, donde cada uno de los procesos deben ser divididos en sus componentes para trabajar paso a paso.

Para el desarrollo de cualquier proyecto de modelado de un sistema de suministro dentro la empresa de agua, primeramente debe lograrse un consenso dentro la misma empresa analizando la necesidad del modelo y los objetivos que se quieren conseguir a corto y largo plazo; será importante con el compromiso de toda la empresa, desde ejecutivos hasta los trabajadores, apoyando con tiempo, recursos humanos y financieros; el modelado no debe ser visto 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.

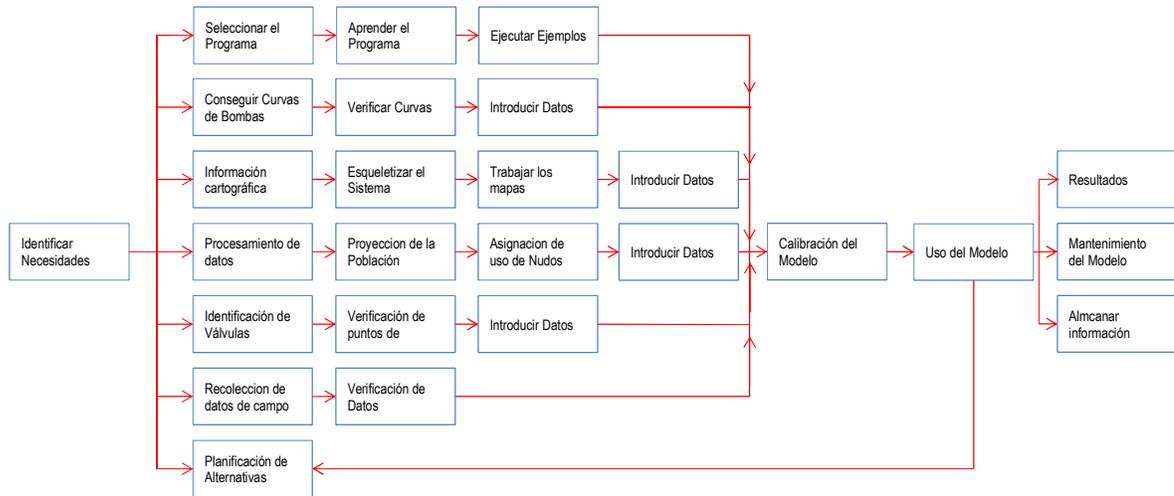


Figura 2.13.2. Diagrama de flujo del proceso de modelado (Walski, y otros, 2003)

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

Modelar 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 nodos. Adicionalmente, debe introducirse al modelo el comportamiento de los nodos 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 modelado incluye la etapa de esqueletización, en la que 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, y otros, 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, y otros, 2003).

Dependiendo del modelo, se pueden calcular variables como presiones de nudos, tasas de flujo y velocidades de flujo, cambios en el nivel de agua del tanque, calidad y otros atributos. La calidad de los parámetros de los datos ingresantes 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.

2.13.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo describe el proceso de comparar condiciones reales medidas del sistema con resultados del modelo simulados 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, y otros, 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, 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, se utilizan 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 grifo contra incendios. Se toma 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 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.

2.13.5. SIMULACIÓN Y MODELADO EN SISTEMAS DE SUMINISTRO INTERMITENTE.

El modelado 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 modelación dinámica con software convencional (Ingeduld, Svitak, Pradhan, & Tarai, 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). 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, Svitak, Pradhan, & Tarai, 2006).

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

Anteriormente, (Vairavamoorthy, Ali, & Lin, 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 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 dependerá si la red es modelada hasta el nivel de conexión de la vivienda individual o no; si se llega hasta las viviendas, se utilizarán 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 clientes considerados.
- El caudal de llenado de los tanques individuales depende principalmente de la pérdida de carga a través de la tubería que conecta el tanque a la red. En el caso de que se utilicen tanques como nudos, será necesario para graduar el diámetro de la tubería de conexión dependiendo del tamaño del tanque utilizado.
- El modelo dinámico de suministro intermitente está relacionado con la presión de servicio en base a los siguientes criterios: La demanda de los clientes es dependiente de la presión, debido a la instalación de tanques de almacenamiento domiciliarios. Las fugas dependen de la presión.
- Debido a que las fugas están relacionadas con la presión, en los sistemas intermitentes cuando no se tenga agua en la tubería las pérdidas serán mínimas.
- El modelo elaborado por (Battermann & Macke, 2001) considera la implementación de tanques 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 tanques utilizados en la modelación del consumo doméstico, los tanques 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 tanques 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.

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, Akinpelu, Lin, & Ali, 2001).

2.14. OPTIMIZACIÓN

Para la selección del mejor horario de suministro, será necesario recurrir a procesos de optimización que nos proporcionen la mejor solución, por esta razón se analizarán las características más importantes de la optimización.

La optimización, como principal objetivo del diseño en la ingeniería, busca siempre encontrar la mejor solución al problema, en términos referentes a calidad, coste, fiabilidad o cualquier otro criterio de utilidad. La solución es óptima cuando se encuentra un extremo de la función objetivo, ya sea máximo o mínimo, esta función está compuesta de n variables de decisión $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ y representa a un determinado criterio a optimizar. El conjunto de leyes de un comportamiento del sistema y de las condiciones impuestas puede expresarse por medio de un conjunto de ecuaciones denominadas restricciones (Pérez, Iglesias, & Fuertes, 2005), que limitan el espacio de búsqueda.

Una función objetivo restringida a un espacio puede tener varios puntos de inflexión, es decir, varios valores óptimos, al mejor de todos ellos se denomina óptimo global y el resto son óptimos locales, en muchos es difícil hallar el óptimo global (Andreu, 1993).

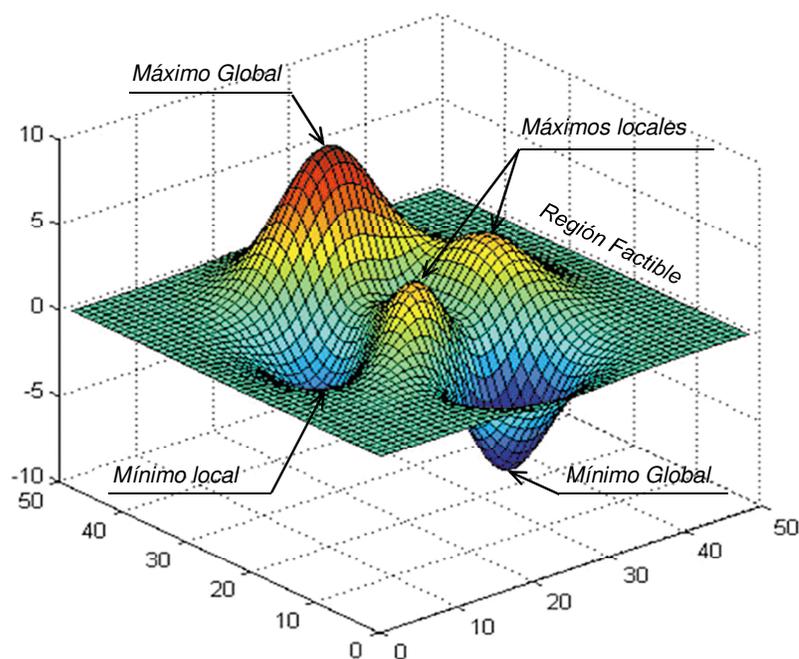


Figura 2.14.1. Máximos locales y máximo global en una función objetivo.

La función objetivo a optimizar depende de muchas variables, por lo que para la evaluación de la función objetivo se tienen que simular modelos complejos y deben usarse algoritmos de optimización con el fin de encontrar la solución óptima.

La optimización permite resolver problemas de:

- Diseño y optimización de infraestructura (redes de suministro), etc.
- Gestión y aprovechamiento de recursos limitados.
- Inversión pública y privada.
- Optimización de parámetros en modelos científicos.

2.14.1. ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

Un algoritmo es un conjunto de procedimientos, basados en cálculos, para buscar y obtener los valores óptimos. Los algoritmos más generales evalúan la función objetivo en un mayor número de veces haciéndolos más lentos en el proceso de resolución, sin embargo, pueden ser aplicados a más tipos de problemas. Otros solamente encuentran como solución a un óptimo local, este tipo de algoritmos puede ser utilizado partiendo de diferentes puntos de inicio de búsqueda y cambiando el paso de búsqueda para obtener una mejor solución (Andreu, 1993).

El objetivo de los algoritmos es encontrar el óptimo global lo más rápido y lo más certeramente posible, el número de evaluaciones realizadas es generalmente utilizado como indicador. La optimización no debe ser el objetivo sino la herramienta.

Entre los algoritmos existentes se tienen las siguientes categorías:

- Malla: aunque tienen baja eficiencia debido a que evalúan más veces la función, nos otorgan mayor tranquilidad debido a que se recorrió toda la región factible.
- Gradiente: son algoritmos muy utilizados, sirven de complemento para algoritmos evolutivos.
- Evolutivos: utilizan diferentes conceptos de búsqueda, a partir de la aleatoriedad de los datos de partida encuentra buenas direcciones para llegar al óptimo, utilizan mayor espacio de búsqueda con relación a los métodos de gradiente.
- Genéticos: algoritmos basados en teorías evolutivas, generan poblaciones iniciales en forma aleatoria, posteriormente generan poblaciones a partir de la anterior bajo una serie de procesos, suele presentar un mayor espacio de búsqueda que los métodos de gradiente.

2.14.2. PROGRAMACIÓN LINEAL

La programación lineal es una de las técnicas más utilizadas debido a su sencillez conceptual, la existencia de una variedad de programas y la capacidad que tiene de obtener el óptimo global.

Un problema de programación lineal es aquel donde la función objetivo y las restricciones son de tipo lineal, las expresiones son las siguientes:

$$\text{Maximizar: } \sum_{i=1}^{i=n} c_i \cdot x_i \quad \text{Ecuación 2.14.1}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n &= b_1 \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \dots + a_{2n} \cdot x_n &= b_2 \\ &\vdots \\ a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \dots + a_{mn} \cdot x_n &= b_m \\ x_1 \geq 0 \quad \dots \quad x_n &\geq 0 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 2.14.2}$$

Es importante conocer que no todos los problemas de optimización tienen solución óptima, entonces los problemas pueden dividirse en problemas con solución óptima y problemas sin solución óptima; sin embargo dentro del segundo tipo hay dos casos muy diferentes entre sí, de esta forma se tienen tres tipos de problemas (Andreu, 1993):

- Problemas con solución óptima: son problemas que tienen una solución óptima global.
- Problemas infactibles: son aquellos para los cuales todas las soluciones son infactibles, es decir, que no existe ninguna solución que satisfaga las restricciones, también puede ser un problema cuyo conjunto solución es vacío.
- Problemas no acotados: Un problema es no acotado si es factible pero no tiene solución óptima, es decir, si toda solución factible puede ser mejorada por otra.

En los problemas de optimización lineal, para encontrar la solución factible básica, solamente se debe encontrar la función en los vértices de la región factible; sin embargo, este número de puntos puede crecer en función del número de variables y el número de restricciones, la cantidad de soluciones posibles se calcula con la siguiente ecuación:

$$\binom{n}{m} = \frac{n!}{(n-m)! \cdot (m)!} \quad \text{Ecuación 2.14.3}$$

Donde:

n = número de variables

m = número de restricciones

Cuando los valores son muy elevados, debe recurrirse a algoritmos que permitirán solucionar este tipo de problemas.

La programación lineal es utilizada en los problemas de optimización de recursos, en el presente estudio se busca optimizar el suministro de agua potable, modificando los horarios de suministro del sistema intermitente. Entre la bibliografía consultada, se encontró estudios relacionados con la optimización de recursos energéticos en los cuales se gestiona la demanda de energía eléctrica utilizando programación lineal (Morais, Kádar, Faria, Vale, & Khodr, 2010), utilizando variables enteras-mixtas.

La selección de los horarios de suministro, será realizada con programación lineal, con variables enteras binarias, tomando en cuenta pesos representativos de criterios que se consideran que serán importantes para que un sector cambie de horario, para el cálculo de los pesos se utilizará la metodología AHP descrita más adelante.

2.14.2.1. Simplex

El término algoritmo simplex habitualmente se refiere a un conjunto de métodos muy usados para resolver problemas de programación lineal, en los cuales se busca el máximo de una función lineal sobre un conjunto de variables que satisfaga un conjunto de restricciones. El algoritmo fue desarrollado por el matemático norteamericano George Dantzig en 1947.

Este proceso que se repite una y otra vez, siempre inicia en un punto extremo de la región factible que normalmente es el origen, en cada iteración se mueve a otro punto extremo adyacente hasta llegar a la solución óptima global.

2.14.2.2. Algoritmo Branch & Cut

El algoritmo Branch & Cut es utilizado para calcular problemas con números enteros como solución, es el método utilizado por el OPENSOLVER (Mason & Dunning, 2010), programa que se utilizará en el presente trabajo para resolver la programación lineal. Con este algoritmo sistemáticamente se van reduciendo el número de combinaciones que se deben examinar, los pasos son los siguientes:

1. Encontrar la solución del problema mediante el método simplex, generalmente no son números enteros.
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 se deben resolver.
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.
4. El paso 3 se repite hasta encontrar los valores enteros que den como resultado un valor óptimo.

2.15. DECISIÓN MULTICRITERIO

Como en el presente trabajo se busca optimizar la gestión de los horarios de suministro, analizando criterios cualitativos y cuantitativos, debe utilizarse la decisión multicriterio para llegar a un óptimo que sea el más beneficioso contemplando todos los objetivos.

La decisión multicriterio es el conjunto de aproximaciones, métodos, modelos, técnicas y herramientas dirigidas a mejorar la calidad de procesos de toma de decisión seguidos por individuos o sistemas (Moreno-Jimenez, 1996).

Se desarrollaron varios métodos de decisión multicriterio, divididos como métodos multicriterio continuo y discreto (Aznar & Guijarro, 2012):

- Cuando el conjunto de soluciones está formado por infinito número de puntos, se denomina análisis multicriterio continuo. Dentro de esta clasificación está la Programación multiobjetivo, la Programación compromiso y la Programación por metas.
- Si las soluciones son finitas y un número bajo, es denominado como análisis multicriterio discreto. Entre los métodos más utilizados se tiene a: el Electre, Promethee, Procesos Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process AHP) y el Proceso Analítico en red (Analytic Network Process, ANP).

2.15.1. VARIABLES EXPLICATIVAS

Es importante conocer inicialmente este tipo de variables, de esta forma se podrá aplicar cualquier método de decisión multicriterio. Las variables explicativas o elementos de comparación pueden ser directas o inversas, es común relacionarlas con el precio y de esta forma realizar de forma más sencilla la clasificación:

- a) Variables explicativas directas, serán aquellas en las cuales se tiene una proporción directa entre éstas y el precio, es decir, si la variable aumenta el precio aumenta y viceversa, en el presente trabajo se observa que criterios como la facilidad en la operación es directamente proporcional a la elección del sector para su cambio de horario.
- b) 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 aumentará. Por ejemplo, en un sistema de suministro intermitente, la elección para modificar el horario será mayor si el sector tiene menos cantidad de clientes.

Para llevar a cabo la transformación de variables explicativas inversas a directas, se pueden utilizar los métodos:

- a) Transformación por la inversa, cuando se tiene una variable explicativa inversa x_i , esta puede ser sustituida por la variable directa calculando $1/x_i$. Este método no se aplica para variables con valor cero.
- b) Transformación por la diferencia, se utiliza una constante K , de este valor se sustrae el término x_i , entonces se tendrá la variable directa $(K-x_i)$, la desventaja de esta forma de transformación radica en que existe variaciones en función del valor de K elegido.

2.15.2. NORMALIZACIÓN DE VARIABLES

Para la aplicación de un método de decisión multicriterio, todas las variables deben estar normalizadas, de esta forma no existe diferencia entre unidades de medida para poder compararlas entre sí. Los tipos de normalización existentes son:

Normalización por la suma:

$$x_{ij_Normalizado} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad \text{Ecuación 2.15.1}$$

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

Normalización por el ideal o por el mayor elemento:

$$x_{ij_Normalizado} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad \text{Ecuación 2.15.2}$$

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

Normalización por el rango:

$$x_{ij_Normalizado} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad \text{Ecuación 2.15.3}$$

El intervalo de los valores normalizados es: $0 \leq x_{ij_Normalizado} \leq 1$

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

2.15.3. PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), fue propuesto por Thomas L. Saaty (1980), es un método que se adecua a diferentes situaciones, como lo demuestran los diferentes estudios que utilizaron el método con diferentes temáticas. Esencialmente el AHP es un método para la selección de

alternativas, utilizando criterios o variables, las cuales suelen estar en conflicto. El método se basa en el uso de matrices de comparación pareadas (Aznar & Guijarro, 2012).

Estas comparaciones se pueden realizar a partir de mediciones reales o a partir de una escala fundamental que refleje la fuerza relativa de las preferencias y opiniones. Existen aplicaciones amplias en la toma de decisiones multicriterio, planificación, asignación de recursos y en la resolución de conflictos. 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)

Los psicólogos cognitivos han reconocido desde hace tiempo que hay dos tipos de comparaciones que hacen los seres humanos: absolutas y relativas. En comparaciones absolutas las alternativas se comparan con un estándar o 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 razón 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 la función objetivo de la programación lineal entera (Ghazinoory, Aliahmadi, Namdarzangeneh, & Ghodsypour, 2007).

Para la utilización del método AHP debe seguirse:

- Partir del interés que tenga el decisor en seleccionar la alternativa más interesante, en un conjunto de alternativas.
- Definir los criterios que se utilizarán para determinar la selección, las características que harán más deseable una alternativa sobre otra.

El siguiente gráfico muestra el esquema jerárquico para la selección de la mejor alternativa en base a tres alternativas y dos criterios de selección:

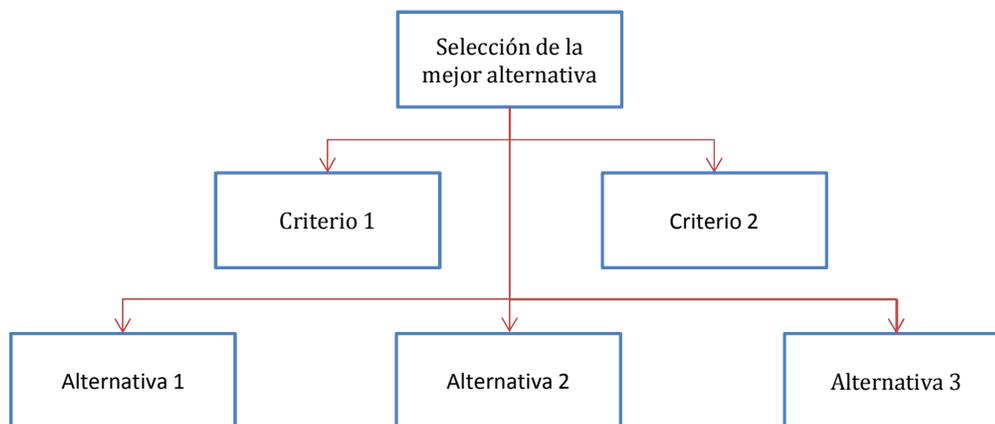


Figura 2.15.1. Esquema jerárquico, (Aznar & Guijarro, 2012)

El procedimiento para utilizar el AHP es el siguiente:

- a) Conocidas las alternativas y los criterios utilizados, se procederá a ordenar y ponderar cada uno de los criterios. Posteriormente se realizará la comparación por pares en base a una Escala Fundamental definida por Saaty.

Tabla 2.15.1. Escala fundamental de comparación por pares (Saaty & Vargas, 2012)

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, se tiene: Criterio A frente a criterio B = 5/1 Criterio B frente a criterio A = 1/5

- b) Cuando se conoce la ponderación de los criterios, se ponderarán las diferentes alternativas en función de cada criterio; para este fin se comparan todas las alternativas en función de cada uno de los criterios y década una de ellas se calcula su vector propio, el cual indicará la ponderación de las distintas alternativas en función de cada criterio.
- c) Con estos dos procesos se obtienen dos matrices, una $n \times 1$ con la ponderación de los criterios (n = número de criterios) y la otra matriz $m \times n$ con la ponderación de las alternativas para cada criterio.
- d) El producto de las dos matrices (la segunda por la primera) tendrá como resultado una matriz $m \times 1$ que indicará la ponderación de las alternativas en función de los criterios y su respectivo peso. De esta forma se podrá elegir la mejor alternativa.

2.15.3.1. Consistencia de la matriz pareada

Las matrices de comparación pareadas deben ser consistentes, el procedimiento para calcular su consistencia es el siguiente:

1. Normalización por la suma de los elementos de la matriz A:

$$A_{Normalizado} = \left[\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \right] \quad \text{Ecuación 2.15.4}$$

2. Se suman las filas de la matriz normalizada:

$$\begin{aligned} \frac{a_{11}}{\sum_{n=1}^n a_{n1}} + \frac{a_{12}}{\sum_{n=1}^n a_{n2}} + \dots + \frac{a_{1n}}{\sum_{n=1}^n a_{nn}} &= b_1 \\ \frac{a_{21}}{\sum_{n=1}^n a_{n1}} + \frac{a_{22}}{\sum_{n=1}^n a_{n2}} + \dots + \frac{a_{2n}}{\sum_{n=1}^n a_{nn}} &= b_2 \\ \vdots & \\ \frac{a_{n1}}{\sum_{n=1}^n a_{n1}} + \frac{a_{n2}}{\sum_{n=1}^n a_{n2}} + \dots + \frac{a_{nn}}{\sum_{n=1}^n a_{nn}} &= b_n \end{aligned} \quad \text{Ecuación 2.15.5}$$

3. Formamos un vector con el promedio de los valores ya calculados:

$$B = \left(\frac{b_1}{n}, \frac{b_2}{n}, \dots, \frac{b_n}{n} \right)^T \quad \text{Ecuación 2.15.6}$$

4. El producto de la matriz A por el vector de prioridades globales B proporciona una matriz columna denominada vector fila total C:

$$A \cdot B = C = (c_1, c_2, \dots, c_n) \quad \text{Ecuación 2.15.7}$$

5. Se realiza el cociente entre los vectores C y B obteniendo el vector D:

$$C / B = D \quad \text{Ecuación 2.15.8}$$

6. Sumando y promediando los elementos del vector D se tendrá λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad \text{Ecuación 2.15.9}$$

7. Con este valor se calculará el índice de consistencia (Consistency Index CI)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación 2.15.10}$$

8. El índice de consistencia es comparado con los valores aleatorios de CI, denominado Índice de consistencia aleatoria (Random consistency index, RI) mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 2.15.2. Valores del índice de consistencia aleatoria (RI) en función del tamaño de la matriz (Saaty & Vargas, 2012)

Tamaño de la matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de consistencia aleatoria (RI)	0.00	0.00	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

9. En función del tamaño de la matriz se elegirá el RI respectivo para calcular el Ratio de consistencia (Consistency ratio, CR):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Ecuación 2.15.11}$$

Existirá consistencia cuando los valores de CR no superen los valores indicados en la siguiente tabla:

Tabla 2.15.3. Porcentajes máximos del ratio de consistencia

Tamaño de la matriz (n)	Ratio de Consistencia
3	5%
4	9%
5 o mayor	10%

Cuando el Ratio de Consistencia supera los valores máximos indicados en la tabla, deben revisarse las ponderaciones.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO

3.1. INTRODUCCIÓN

Como se conoce, la calidad del servicio del suministro de agua no solamente está definida por la calidad físico, química y biológica, también son elementos importantes para un buen servicio contar con presión suficiente y el caudal necesario. Un abastecimiento intermitente presenta varios inconvenientes, uno de ellos es la baja presión de suministro debido a los caudales punta que presenta, muchas veces mayores a los que se dan en sistemas continuos.

Con la metodología planteada en este trabajo no se busca perpetuar el sistema de suministro intermitente, 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; asimismo, puede convertirse en una herramienta útil para la transición gradual de un sistema intermitente a uno continuo. Las soluciones para que los sistemas de suministro intermitentes trabajen mejor no pasan necesariamente por la construcción de nueva infraestructura, en sistemas con escasez económica se cuentan con pocos recursos económicos por lo que deben buscarse soluciones en base a la infraestructura existente que requieran una mínima cantidad de recursos humanos y económicos.

3.2. CONOCIMIENTO DEL SISTEMA DE SUMINISTRO

Es necesario conocer el contexto en el que se quieren plantear las mejoras, para este fin será importante conocer básicamente las características geográficas, demográficas, climatológicas y socioeconómicas del área de estudio. Asimismo, debe buscarse la información necesaria del funcionamiento del sistema de suministro de agua, sus debilidades y fortalezas, aspectos relacionados con la operación y otros; también es importante conocer el tipo de conexión domiciliaria para analizar si la metodología es útil, debido a que en caso de que las acometidas no cuenten con depósitos domiciliarios las simplificaciones propuestas no serían correctas.

3.3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA

A continuación, se muestra una descripción de la metodología en un esquema con el resumen de los pasos o etapas que deben realizarse, en una primera parte se deberá realizar un análisis de la situación actual y los ajustes necesarios del modelo, en la segunda se realiza la optimización y selección de sectores y horarios generando los escenarios que mejoran el servicio.

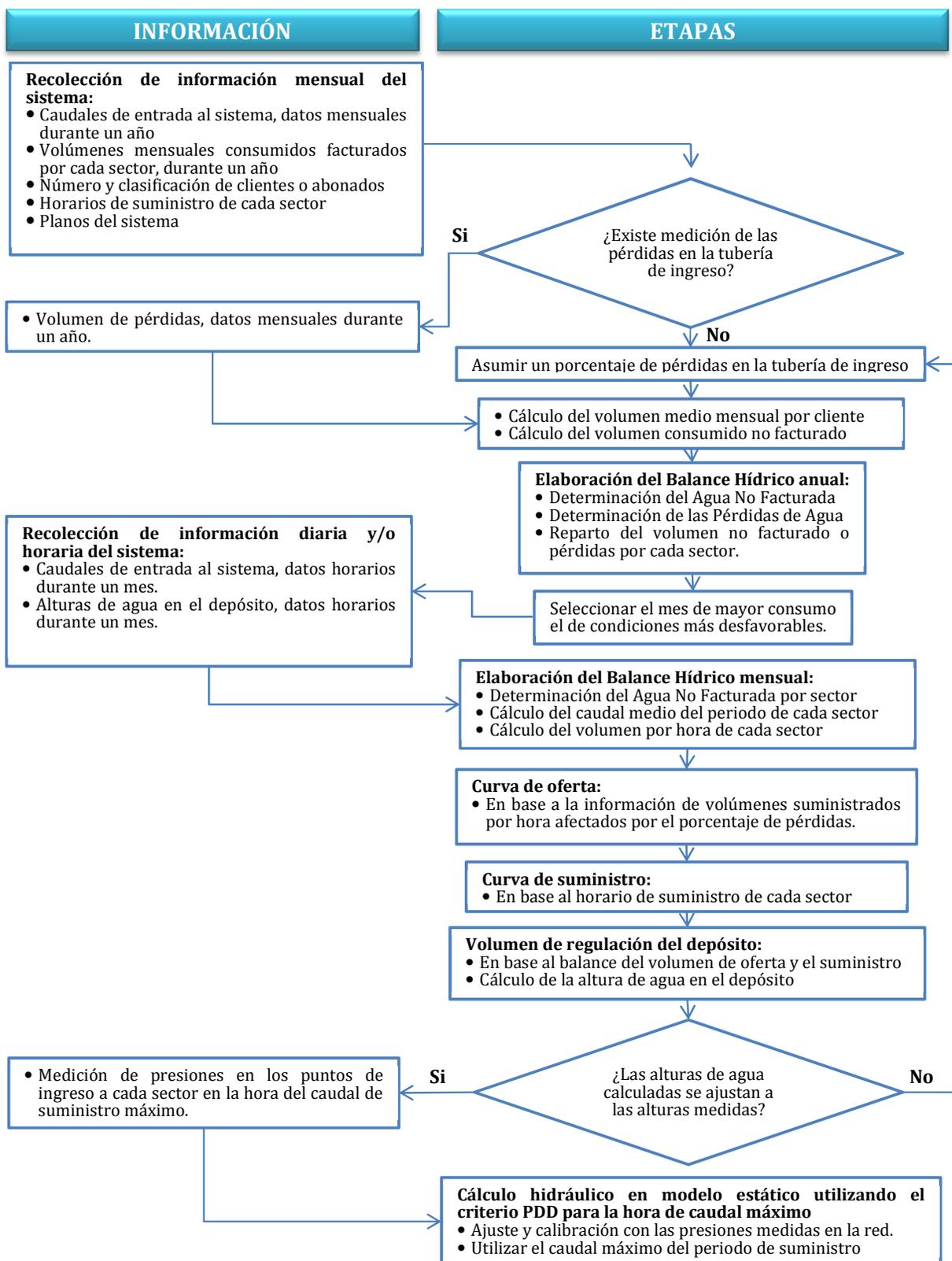


Figura 3.3.1. Primera parte, metodología para el escenario actual o inicial

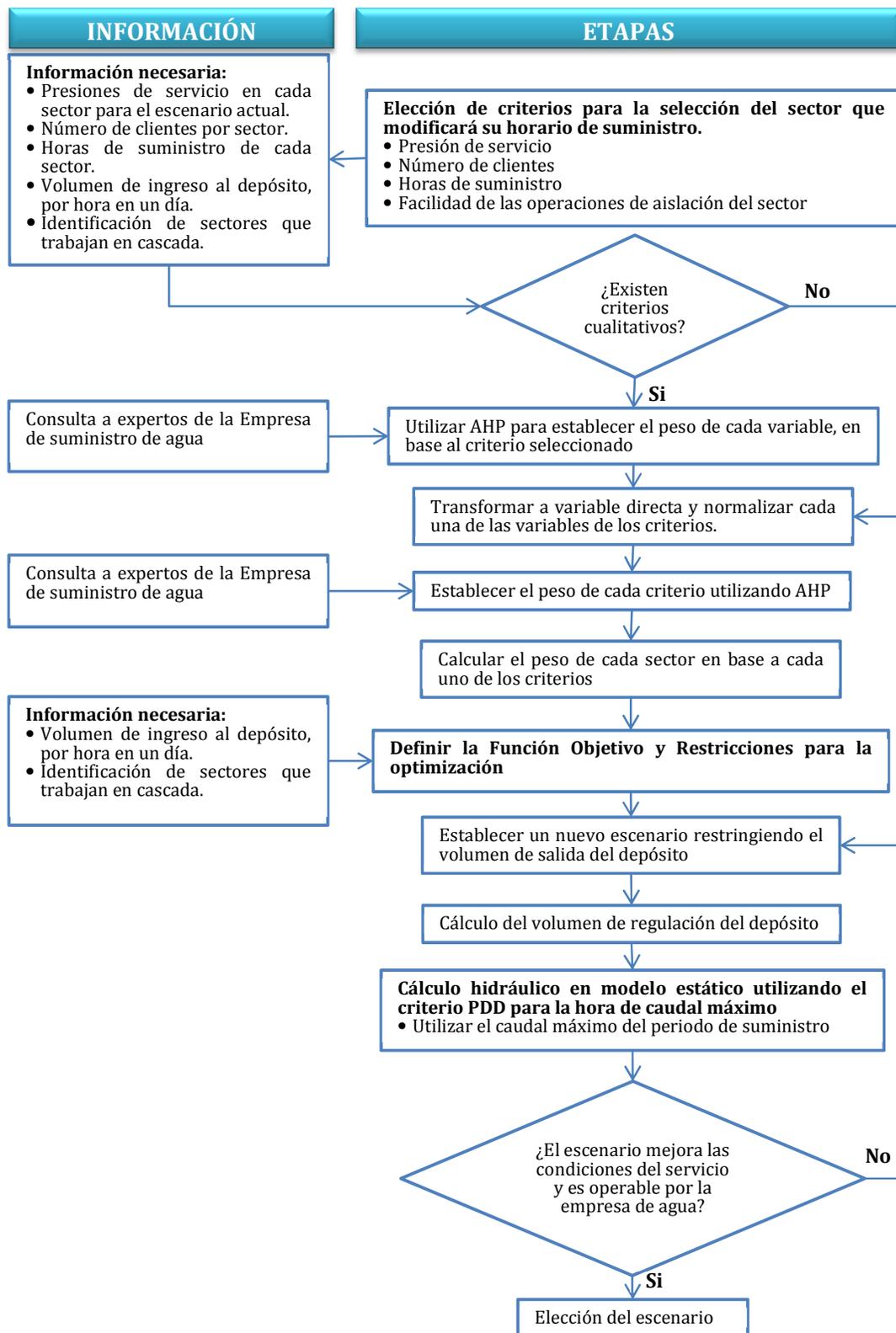


Figura 3.3.2. Segunda parte, metodología para el escenario propuesto

En la presente metodología se tomaron en cuenta simplificaciones, las principales son las siguientes:

- Para la determinación de los horarios de suministro, se considera que la demanda de cada sector es laminada tendiendo a una línea horizontal en el tiempo, debido a la presencia de depósitos domiciliarios en cada una de las viviendas.
- Se asume que el caudal máximo horario se produce en el mes de mayor consumo.
- Para el cálculo hidráulico, se considera que el caudal máximo del periodo se produce en la hora de mayor consumo.
- La metodología está planteada para sistemas de suministro intermitente, principalmente con escasez económica.

El procedimiento utiliza al depósito de almacenamiento como punto de equilibrio y es necesario que la red se encuentre sectorizada para el suministro intermitente.

3.4. CATEGORIZACIÓN DEL SISTEMA DE SUMINISTRO INTERMITENTE

Uno de los primeros pasos es la categorización del tipo de sistema de suministro intermitente, de esta forma se podrá establecer si las mejoras en la operación o en la gestión técnica son pertinentes para el tipo de suministro. Como se argumentó en su momento, los sistemas con categoría 2A y 2B son sistemas que pueden ser mejorados en su gestión como sistema intermitente, las categorías 3A y 3B también pueden utilizar la presente metodología aunque se tenga el inconveniente de la falta de agua, las categorías 1A y 1B requieren otro tipo de medidas que mejoren su gestión. De esta forma, la metodología será de mayor utilidad en sistemas de escasez económica, por lo que este paso es fundamental para establecer si se continúa con la aplicación de la metodología o no.

3.5. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN, DATOS MENSUALES DURANTE UNA GESTIÓN

Definida la categoría del sistema, se procederá con la recolección de información; generalmente, en sistemas de suministro intermitente con escasez económica, los recursos son limitados para el monitoreo y recolección de datos del sistema; de esta forma, la metodología debe adaptarse a información básica sin caer en la simplificación excesiva del modelo. Debido a que será una medida a corto plazo la información debe ser lo más actualizada posible, por lo que se recolectarán datos de uno del último año desglosados por cada mes.

La información básica 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, el número de clientes por sector, las características del horario de cada sector, cantidad de abonados con contadores, planos del sistema y la configuración de los sectores. Es recomendable, después de recolectar la información, conversar con los trabajadores operarios directos del sistema para analizar posibles variaciones o anomalías que puedan existir entre los datos. Debe tomarse en cuenta que la metodología analiza un sistema o subsistema que debe tener un depósito de almacenamiento de cabecera.

El volumen de ingreso al depósito del subsistema o sistema, debe ser medido en un contador o caudalímetro de ingreso; en caso de no contar con este tipo de instalaciones, deberá recolectarse la información de las fuentes de suministro o los puntos anteriores que alimentan al depósito, cuando se procede de esta forma, se debe asumir un porcentaje de pérdidas en la tubería de alimentación, el cual será ajustado posteriormente con la comparación de los niveles de agua calculados y los medidos.

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.

3.5.1. BASE DE DATOS DE CLIENTES

En esta base de datos se almacenan datos de la facturación, la identificación del abonado con un código específico, el tipo de cliente (doméstico, industrial, público, etc.), la ruta de lectura a la que pertenece (código de catastro) y el sector hidráulico correspondiente.

3.5.2. BASE DE DATOS DE LA RED

En ella se incluyen todos los elementos que forman parte de la red de agua potable, con sus características más importantes, se incluyen los sectores y otro tipo de información como el 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.

3.6. VOLUMEN DE CONSUMO FACTURADO MEDIDO Y NO MEDIDO

Conociendo el volumen mensual consumido por los abonados que cuentan con contador se calcula el volumen mensual de consumo promedio, este valor servirá de base para la estimación del consumo de los abonados que no cuentan con contador, se entiende que los clientes que no tienen contador tienden consumir mayor cantidad de agua, en un sistema continuo seguramente esta situación será generalizada pero en un sistema intermitente la demanda depende de la presión disponible.

3.7. BALANCE HÍDRICO ANUAL

Una herramienta muy útil para la estimación del agua no facturada y las pérdidas es el Balance Hídrico propuesto por el IWA, herramienta utilizada en la presente metodología en base a los valores recolectados y estimados. De esta forma también se calculará el caudal medio diario del sistema de suministro, el cual servirá para la determinación de los coeficientes de modulación.

3.8. REPARTO DEL VOLUMEN NO FACTURADO O PÉRDIDAS 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.

En este caso, la asignación de estos volúmenes de pérdidas al modelo es complicada, pues generalmente no se conoce su localización exacta aunque puede estimarse su cantidad.

Varios autores estudiaron la forma en la que debería cargarse los volúmenes de pérdidas al modelo matemático, entre las propuestas se tiene:

3.8.1. 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.

3.8.2. REPRESENTACIÓN DE LAS FUGAS COMO CONSUMOS DEPENDIENTES DE LA PRESIÓN

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

3.8.3. ASIGNACIÓN DEL CAUDAL DE FUGAS MEDIANTE UN 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.

En la presente metodología se utilizará el reparto de las pérdidas en base al volumen consumido por cada uno de los sectores, considerando que las mismas son proporcionales al consumo medido.

3.9. ELECCIÓN DEL MES DE CONDICIONES MÁS DESFAVORABLES.

Utilizando los volúmenes mensuales consumidos por los abonados con contador, se establecerá el mes de mayor consumo, con el fin de utilizarlo como referencia, debido a que se asume que en este mes se producirán las condiciones más desfavorables que deberá soportar el sistema, es decir, los caudales más altos y las presiones más bajas.

Definido el mes, se procede nuevamente a la recolección de información, esta vez detallada por horas: volúmenes que ingresan al depósito, altura del agua en el depósito, horas de bombeo, etc.

3.10. BALANCE HÍDRICO MENSUAL

Con la información detallada del mes de condiciones más desfavorables, se establecerán los volúmenes de cada sector para este mes. Como en un paso anterior, se realizará el reparto del volumen de pérdidas en el mes a cada uno de los sectores en base a su volumen consumido, de esta forma se conocerá la demanda total de cada uno de ellos.

3.11. CAUDAL MEDIO DEL PERIODO DE SUMINISTRO

La principal desventaja del abastecimiento discontinuo es que los usuarios al tener el servicio en menor cantidad de horas consumen caudales grandes, porque deben llegar a cubrir la cantidad de agua que consumirán en un día, se aplica esta suposición para dividir el volumen que se consume en un día en el sector entre las horas de servicio, esto implica que los sectores donde el suministro se realiza por pocas horas tendrán un caudal medio del periodo de suministro más grande.

Según mediciones realizadas en los sistemas intermitentes de Judayta-Jordania (Battermann & Macke, 2001) y en Oruro-Bolivia, la presencia de los depósitos de almacenamiento domiciliarios hace que el consumo en las horas de suministro tienda a ser constante, generalmente con valores máximos al inicio y mínimos antes de que concluya el horario de suministro, por lo que puede asumirse un caudal o volumen medio del periodo de abastecimiento constante para fines de cálculo.

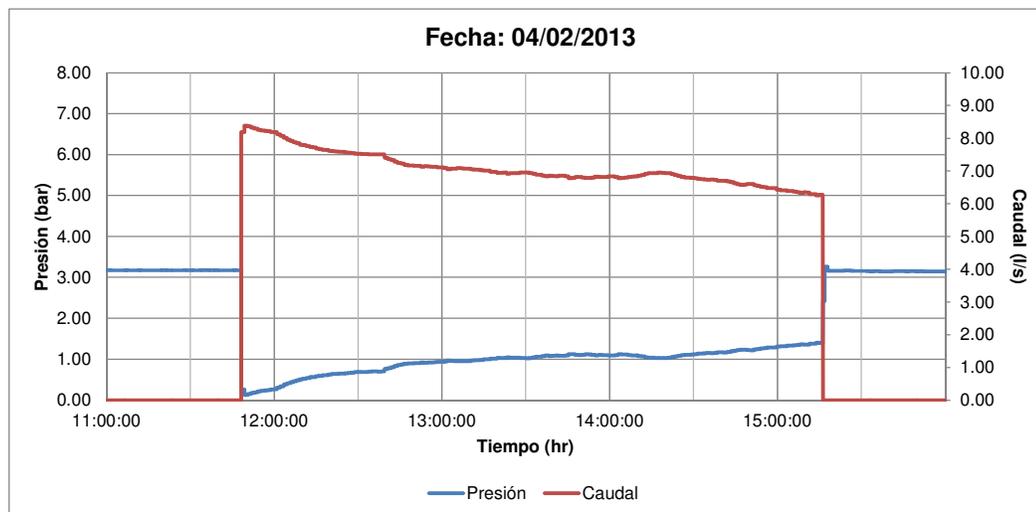


Figura 3.11.1. Medición de presiones y caudales en el punto Centro de convenciones, ingreso al sector E08-02, sistema intermitente de la ciudad de Oruro, 04/02/2013. Fuente: SeLA - Oruro

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

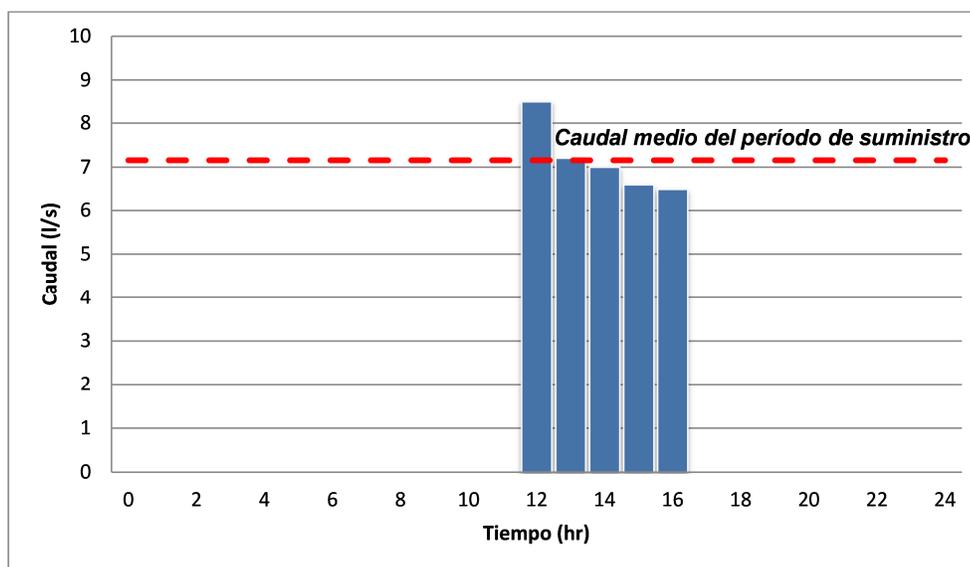


Figura 3.11.2. Representación de la variación del caudal de suministro, ingreso al sector E08-02, sistema intermitente de la ciudad de Oruro, 04/02/2013

La variación del caudal de suministro puede ser simplificada con el caudal medio del periodo de suministro, de esta forma se crean bloques de demanda constante que se utilizarán para la creación de nuevos escenarios en los cuales se modifica el horario de suministro.

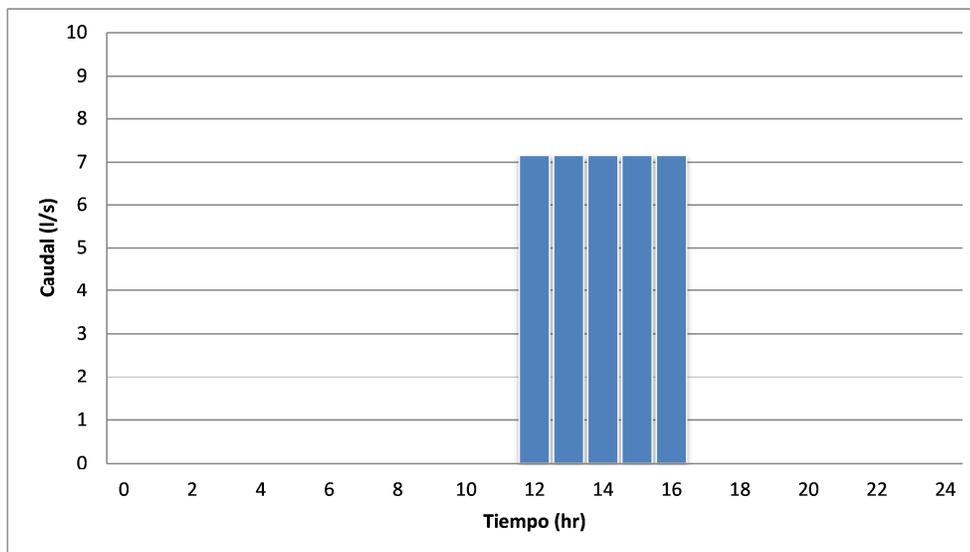


Figura 3.11.3. Simplificación del caudal de suministro, ingreso al sector E08-02, 04/02/2013

El valor calculado de esta forma representa al caudal medio del periodo de suministro, sin embargo para el cálculo hidráulico este caudales será multiplicado por un factor punta que represente mejor la realidad. La variación de la demanda en los sistemas intermitentes fluctúa entre $\pm 20\%$ a $\pm 30\%$, por esta razón para el cálculo hidráulico se utilizará una incremento de 30%, como se utilizará el criterio de Demanda Dependiente de la Presión, se partirá de una demanda inicial alta que tenderá a disminuir en función de la presión.

La relación que se utiliza para el cálculo del volumen por hora que se utilizará para representar la situación descrita, es la siguiente:

$$\text{Volumen por hora} = \frac{\text{Volumen diario}}{\text{Horas de suministro}} \quad \text{Ecuación 3.11.1}$$

3.12. CURVA DE OFERTA Y CURVA DE SUMINISTRO

Considerando el porcentaje de pérdidas en la tubería de ingreso, en caso de asumirlo, se establecen volúmenes de ingreso por cada hora, de esta forma se define la curva de oferta. Para este fin, debe recolectarse información horaria del mes de estudio, la curva de oferta es producto del procesamiento de estos datos.

Para calcular la curva de suministro del sistema o subsistema, en base a los volúmenes facturados (medidos y no medidos) de cada sector, se procede a la desagregación del volumen de agua no facturado, repartiendo a cada uno en función de su peso, de esta forma se conocerá el volumen diario de cada uno de estos sectores, este valor será dividido entre la cantidad de horas de suministro para ser ubicado en el horario respectivo, finalmente se calculará el volumen por hora que sale del depósito representando de esta forma a la curva de buscada.

3.13. VOLUMEN DE REGULACIÓN DEL DEPÓSITO

Conociendo los volúmenes de ingreso y salida del depósito, tanto la curva de oferta como la de suministro, 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 permitirá calcular la altura del agua durante las veinticuatro horas. Una forma de verificar que el modelo planteado este calculado adecuadamente es comparando el volumen de regulación con el volumen total del depósito, en caso de que el volumen de regulación sea mayor al volumen del tanque, existirá algún error en las estimaciones, deberán analizarse los pasos anteriores o en todo caso estudiarse las posibilidades de pérdidas en la tubería de ingreso.

La importancia del depósito radica en el equilibrio que permite obtener con los volúmenes del sistema, siendo un elemento en el cual se realiza el ajuste inicial.

3.14. AJUSTE DEL MODELO CON NIVELES DEL DEPÓSITO

En el caso de los sistemas que no cuentan con contadores al ingreso del depósito debe adoptarse un porcentaje de pérdidas, este valor reduce el caudal de ingreso, en consecuencia controla los volúmenes de ingreso, salida y la altura de agua en el depósito. La altura del agua en el tanque debe formar parte de la información recolectada o en su defecto se deberán realizar las mediciones correspondientes, estos valores medidos y los calculados deben ser comparados y ajustados en esta etapa.

La altura del agua en el depósito es calculada con las siguientes relaciones:

$$h_{c-i} = \frac{V_i}{A_b} \quad \text{Ecuación 3.14.1}$$

Para depósito circular:

$$h_{c-i} = \frac{4 \cdot V_i}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Ecuación 3.14.2}$$

Donde:

h_{c-i} = Altura de agua calculada en el depósito en el periodo i

V_i = Volumen de agua existente en el depósito en el periodo i

A_b = Área media de la base del depósito

D = Diámetro de la base del depósito circular

La estimación del porcentaje de pérdidas dependerá de la relación existente entre el nivel del agua calculado y el medido, por esta razón puede utilizarse un algoritmo de optimización que busque el mejor ajuste. Este paso también ajustará los volúmenes de salida de cada uno de los sectores porque dependen del volumen de ingreso al depósito, debido a que las pérdidas están asociadas al volumen de ingreso al sistema.

La función objetivo debe buscar minimizar el error cuadrático medio de la comparación de alturas, calculadas y medidas:

$$\text{Minimizar } \Delta x = \sqrt{\frac{\sum (h_{m-i} - h_{c-i})^2}{n \cdot (n-1)}}; \quad \text{Ecuación 3.14.3}$$

Las restricciones limitan el valor del porcentaje de pérdidas entre 0 y 100%

3.15. CÁLCULO HIDRÁULICO ESCENARIO ACTUAL

Para el cálculo hidráulico se utilizarán los volúmenes consumidos por cada sector y la red de distribución con sus tramos principales, se ingresan estos volúmenes en los nudos que representan los puntos de entrada a cada uno de los sectores.

En este apartado, debe tenerse en cuenta que los volúmenes calculados hasta ahora en cada uno de los sectores son volúmenes o caudales medios del periodo de suministro, para el cálculo hidráulico deben ser incrementados un porcentaje o ser afectados por un factor punta para llegar al caudal máximo del periodo de suministro.

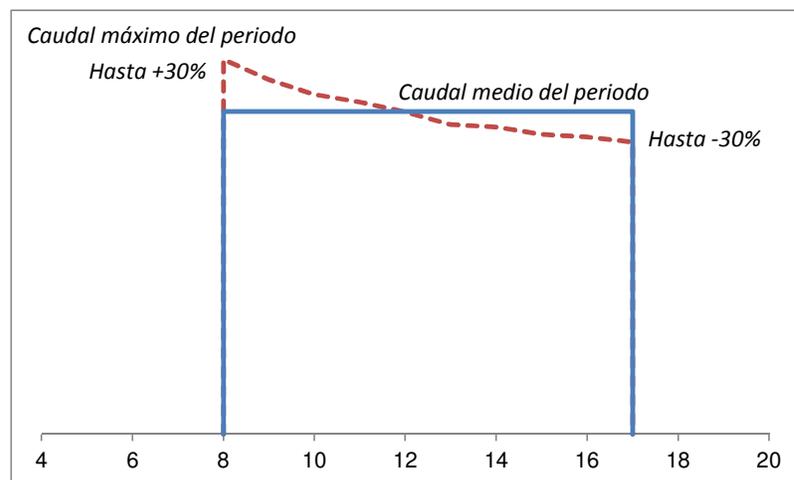


Figura 3.15.1. Simplificación del caudal o volumen de suministro en un sistema intermitente.

El incremento del volumen de suministro o de demanda alcanza un máximo de 20% a 30% de incremento del caudal medio del periodo, para mayor seguridad se utilizará un factor punta de 1.3.

Este factor punta permitirá también proceder con el cálculo hidráulico utilizando el criterio de la demanda dependiente de la presión (PDD), situación común en sistemas de suministro intermitente debido a las presiones bajas que se presentan, de esta forma la demanda se irá ajustando a estas presiones de servicio, las demandas altas irán disminuyendo por efecto del descenso de la presión en cada uno de los nudos de la red. Cuando el cálculo se realiza en DDA, debido a valores altos y constantes de la demanda las presiones llegan a valores negativos, por lo que no es apropiado realizar el cálculo hidráulico de sistemas intermitentes utilizando este criterio.

Calculadas las presiones, estas deben ajustarse a las presiones medidas en la hora de cálculo u hora más desfavorable, este cálculo solamente sirve como verificación de las mejoras en el sistema de suministro, por lo que se utilizará un modelo estático para las horas de mayor consumo.

Adicionalmente se analizaron los siguientes aspectos hidráulicos del sistema de suministro intermitente, los cuales permiten conocer mejor su funcionamiento:

3.15.1. DEMANDA EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN

En un sistema de abastecimiento intermitente la demanda de la población depende de la presión disponible, una de las relaciones que define este comportamiento es la siguiente:

$$\frac{Q_i}{Q_{\max}} = \left(\frac{H_i - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}} \right)^{1/n} \quad \text{Ecuación 3.15.1}$$

Ecuación que define un comportamiento en el cual el caudal ofertado está limitado por la capacidad y características de las tuberías de suministro; de esta forma mientras menor sea la presión, la oferta de caudal también será menor y cuando va creciendo, la oferta de caudal disponible también crece.

3.15.2. PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL CAUDAL DEMANDADO

Por otro lado, si se analiza la variación de la presión en función del caudal de demanda, es evidente que mientras mayor sea la cantidad de consumidores que utilicen agua la presión tenderá a disminuir; de esta forma, si se quiere conocer esta relación, debe partirse de:

$$H_i = H_{\max} - h_{f_i} \quad \text{Ecuación 3.15.2}$$

$$H_{\max} = H_{\min} + h_{f_{\max}} \quad \text{Ecuación 3.15.3}$$

Entonces:

$$h_{f_i} = H_{\max} - H_i \quad \text{Ecuación 3.15.4}$$

$$h_{f_{\max}} = H_{\max} - H_{\min} \quad \text{Ecuación 3.15.5}$$

Como la pérdida de carga está relacionada con el caudal se tiene:

$$K \cdot Q_i^n = H_{\max} - H_i \quad \text{Ecuación 3.15.6}$$

$$K \cdot Q_{\max}^n = H_{\max} - H_{\min} \quad \text{Ecuación 3.15.7}$$

Dividiendo ambas relaciones y considerando que las condiciones en la conducción y en el fluido se mantienen constantes, tenemos:

$$\frac{Q_i}{Q_{\max}} = \left(\frac{H_{\max} - H_i}{H_{\max} - H_{\min}} \right)^{1/n} \quad \text{Ecuación 3.15.8}$$

Graficando lo incremento de caudal demandado con relación al incremento en la presión se tiene el siguiente gráfico:

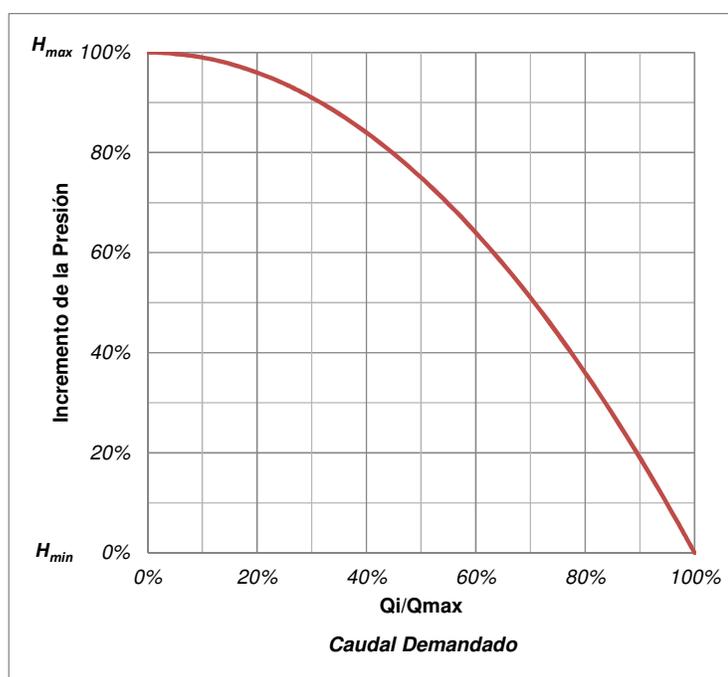


Figura 3.15.2. Decremento de la presión con relación al caudal demandado

3.15.3. ANÁLISIS DEL INCREMENTO DE LA PRESIÓN Y SU INCIDENCIA EN LA DEMANDA EN UN SISTEMA INTERMITENTE

Analizando ambos criterios, es evidente que mientras mayor sea la cantidad de consumidores (caudal demandado) las presiones serán más bajas, este valor a su vez limitará las condiciones de oferta de agua, ya que cuando las presiones son bajas se tiene un menor caudal disponible. Asimismo, si el caudal demandado decrece, la presión de servicio se incrementará, de esta forma la oferta de agua a las viviendas tenderá a subir. La representación en un gráfico es la siguiente:

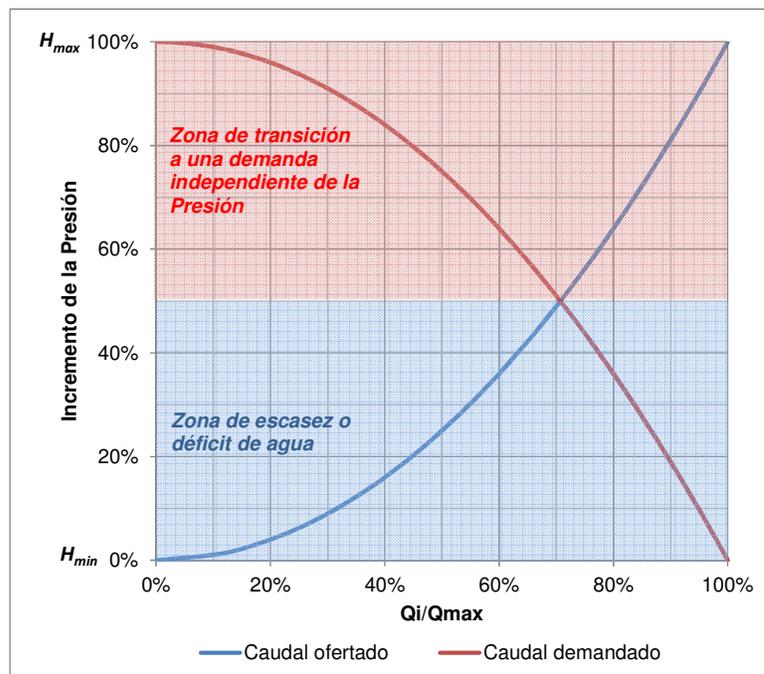


Figura 3.15.3. Comparación del caudal ofertado y demandado y su variación con la presión.

En un sistema de suministro intermitente, a presiones elevadas es más probable que ocurran pérdidas de agua y desperdicio, pues como se conoce, en este tipo de suministro la población tiende a consumir o a almacenar toda el agua que puede. Sin embargo, las presiones grandes permitirán independizar la demanda de la presión, entrando en una zona de transición que permitiría analizar también las posibilidades de plantear el cambio de un sistema intermitente a uno continuo. Cuando se quiera cubrir a mayor cantidad de clientes o abonados se tendrán presiones bajas con un servicio muy deficiente, generando escasez o déficit de agua.

La mejora en la presión en un sistema intermitente es adecuada, siempre y cuando se controle la presión de servicio en los puntos de toma de los sectores utilizando válvulas, para no perjudicar al resto de los abonados.

3.16. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA ACTUAL

En base a los cálculos precedentes, puede realizarse un diagnóstico de la situación actual del sistema de suministro intermitente, el cual permitirá generar ideas de solución a las deficiencias del sistema o subsistema. Como la presente metodología busca mejorar las condiciones de servicio, se analizarán los elementos que inciden en las deficiencias de presión fundamentalmente.

A continuación, deben buscarse soluciones que mejoren la presión de servicio, como estas aumentan cuando los caudales son pequeños, la solución debe ir por este camino reduciendo los caudales punta, una de las ventajas del suministro intermitente radica en la facilidad para modificación de la curva de suministro en base al cambio de horarios de apertura de cada uno de los sectores, la situación de

suministro ideal en un sistema intermitente sería aquella en la que se reduzcan al mínimo los picos de consumo, planificando de la mejor forma cada uno de los horarios de suministro, tratando en lo posible tener consumos valle. Para mejorar un sistema de suministro intermitente, el objetivo principal debe buscar minimizar la diversidad de la presión (Totsuka, Trifunovic, & Vairavamoorthy, 2004).

Sin embargo, para lograr las condiciones deseadas los horarios de suministro se modifican tanto que pueden llegar a perjudicar a los abonados, debido a que se puede llegar a un suministro en horarios poco adecuados generando mayor cantidad de quejas, por lo tanto debe tenerse en cuenta que también se busca minimizar la modificación de los hábitos de consumo actuales.

De esta forma, deben buscarse aquellas soluciones que tengan el menor impacto o perjuicio sobre los abonados y que mejoren de forma sustancial las presiones de servicio, deben seleccionarse de la mejor forma posible aquellos sectores que modificarán su horario de suministro.

3.17. ESCENARIO PROPUESTO, ELECCIÓN DE CRITERIOS PARA EL CAMBIO DE HORARIO DE LOS SECTORES

En el escenario propuesto deben elegirse los criterios de selección para el sector o sectores que deben modificar su horario de suministro, estos criterios pueden ser cuantitativos o cualitativos, cuantitativos como al presión de servicio, número de abonados o clientes del sector, número de horas de suministro, longitud de tubería, diámetros y otros elementos medibles, cualitativos como la facilidad de operación para aislación de los sectores, problemas con quejas de los vecinos y otros.

En caso de que se deban considerar criterios adicionales a los presentados en el presente trabajo, deberá modificarse la función objetivo incluyendo el peso de cada uno de estos elementos, la estructura global de la metodología no cambia.

Los tres criterios cualitativos considerados son los siguientes:

- Presión de servicio,
- Horas de suministro y
- Número de clientes.

Asimismo, se utilizará uno cuantitativo:

- Facilidad de las operaciones de aislación del sector

Estos criterios serán la base para la optimización de los horarios de suministro utilizando programación lineal.

Adicionalmente, para el cambio del horario de suministro es conveniente que cada sector se mueva preferiblemente dentro de las horas en las cuales ingresa agua al depósito, de esta forma se podrá reducir

el volumen de regulación y el tiempo que el agua permanece en el tanque. Como se conoce el volumen de ingreso al depósito en cada hora, se puede calcular el peso relacionado con el volumen total diario.

3.17.1. CUANTIFICACIÓN DE LOS FACTORES QUE INCIDEN EN LA SELECCIÓN DEL SECTOR PARA SU CAMBIO DE HORARIO

En base a los criterios ya definidos, se procederá a cuantificar o establecer el peso de cada una de las variables (sectores) utilizando cada uno de los criterios.

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 aquellas que son inicialmente indirectas; existe dificultad en el cálculo de pesos para cada sector cuando se utilizan criterios cualitativos, estos no son medibles fácilmente, por lo tanto se utilizan técnicas de análisis multicriterio como el AHP para poder realizar la comparación de las variables en base al criterio elegido.

3.17.1.1. Cantidad de clientes del sector

Este criterio es importante, debido a que permitirá reducir el número de clientes afectados por la modificación del horario en los sectores. Si la cantidad de clientes es pequeña, el sector tendrá mayores posibilidades de moverse porque la cantidad de personas afectadas será menor.

Como la variable explicativa es cuantitativa e inversa, se trabajará con la información recolectada, sin embargo, estos valores deberán transformarse en variables explicativas directas, para lo cual se utilizará el método de transformación por la inversa:

$$l'_i = \frac{1}{nc_i} \quad \text{Ecuación 3.17.1}$$

nc_i = Número de clientes del sector i

Posteriormente, la variable debe ser normalizada por la suma:

$$l_i = \frac{l'_i}{\sum_{i=1}^n l'_i} \quad \text{Ecuación 3.17.2}$$

Como resultado, se tiene el vector columna L que reúne a los valores normalizados de cada uno de los sectores:

$$L = (l_1, l_2, \dots, l_n) \quad \text{Ecuación 3.17.3}$$

3.17.1.2. Presión de servicio

Este criterio establece la posibilidad de cambio de horario del sector en base a la presión de servicio, mientras más pequeña sea esta el sector tendrá mayores posibilidades de moverse, de tal forma de encontrar 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 utilizarán las presiones calculadas y ajustadas del modelo inicial o las presiones medidas, también esta condicionada como variable explicativa inversa que debe ser convertida en directa, debido a que la presión puede llegar a tener valores de cero en casos extremos su transformación a variable directa será realizada por la diferencia:

$$p'_i = K - vp_i ; \quad K = vp_{\max} \quad \text{Ecuación 3.17.4}$$

vp_i = Valor de la presión de servicio del sector i

Normalizando por la suma:

$$p_i = \frac{p'_i}{\sum_{i=1}^n p'_i} \quad \text{Ecuación 3.17.5}$$

Los valores calculados normalizados de cada uno de los sectores se reúnen en el vector P :

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n) \quad \text{Ecuación 3.17.6}$$

3.17.1.3. 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 que generalmente están interconectados a otros o que reciben poco volumen a lo largo del día.

La variable explicativa relacionada con las horas de suministro también es cuantitativa e inversa, por lo que se seguirá el mismo procedimiento que para las dos anteriores:

$$r'_i = \frac{1}{nh_i} \quad \text{Ecuación 3.17.7}$$

nh_i = Número de horas de suministro del sector i

Se normaliza la variable por la suma:

$$r_i = \frac{r'_i}{\sum_{i=1}^n r'_i} \quad \text{Ecuación 3.17.8}$$

El vector R reunirá a todos los valores normalizados relacionados con las horas de suministro:

$$R = (r_1, r_2, \dots, r_n) \quad \text{Ecuación 3.17.9}$$

3.17.1.4. 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 dependerá de diversos elementos, por citar algunos: disponibilidad de válvulas de sectorización, si estas se encuentran funcionando correctamente y si están visibles, dificultad en el trabajo para los operadores (trabajo manual), quejas de la población y otros. De esta forma, esta variable cualitativa es consultada al personal de la empresa que conoce y tiene experiencia con respecto a las facilidades de operación del sector para que el sector pueda modificar en su horario.

Para la cuantificación de esta variable se utilizará el método AHP, calculando los vectores propios de las matrices pareadas resultado de las consultas a por lo menos tres ingenieros que trabajan en la empresa de agua potable relacionados con la operación y mantenimiento de la red.

La media geométrica de los vectores propios de las matrices de cada experto es posteriormente normalizada por la suma, generando el vector E.

$$E = (e_1, e_2, \dots, e_n) \quad \text{Ecuación 3.17.10}$$

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, que se calculará también la ponderación de cada criterio utilizando el AHP, para este fin se realizarán consultas a los expertos de la empresa de suministro de agua.

3.17.1.5. Volumen de ingreso al depósito

Como se indicó anteriormente, este criterio permitirá la modificación del horario de suministro de cada sector enmarcado preferiblemente en las horas en las cuales ingresa agua al depósito, de esta forma se logrará reducir el volumen de regulación en el depósito de almacenamiento.

Esta variable es directa, por lo que no es necesario ninguna conversión, solamente será necesario su normalización por la suma, solamente en este caso el peso será representado directamente por este valor:

$$t_i = \frac{t'_i}{\sum_{i=1}^m t'_i} \quad \text{Ecuación 3.17.11}$$

Entonces el vector que representa el peso del volumen de ingreso al tanque es:

$$T = (t_1, t_2, \dots, t_m) \quad \text{Ecuación 3.17.12}$$

Al ser un criterio muy importante para la modificación de los horarios de suministro, este criterio no será ponderado con los otros criterios.

3.17.1.6. Ponderación de criterios

En este acápite se define la ponderación de los criterios en base a los cuales se definirán 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, para lo cual también se utilizará el AHP, consultando a los expertos sobre la importancia de cada uno de los criterios utilizados.

Los criterios que se ponderan son:

- Presión de servicio
- Horas de suministro y
- 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 defina al sector que deba moverse, solamente establece los horarios que tienen mayores posibilidades de acoger el suministro del sector.

Tras la consulta a los expertos, se calculará la media geométrica de los vectores propios de las matrices de cada uno de los criterios y de esta forma se tendrán pesos globales representativos de los criterios:

$$W = (wc', wp', wh', wo') \quad \text{Ecuación 3.17.13}$$

3.17.1.7. Cálculo de los factores por criterio para la optimización.

Multiplicando el peso de los criterios por cada uno de los elementos que conforman los vectores se tiene el peso detallado para cada variable:

Factor que depende del número de clientes del sector:

$$Wc = (wc' \cdot l_1, wc' \cdot l_2, \dots, wc' \cdot l_n) \quad \text{Ecuación 3.17.14}$$

$$Wc = (wc_1, wc_2, \dots, wc_n) \quad \text{Ecuación 3.17.15}$$

Factor que depende de la presión de servicio en el sector:

$$Wp = (wp' \cdot p_1, wp' \cdot p_2, \dots, wp' \cdot p_n) \quad \text{Ecuación 3.17.16}$$

$$Wp = (wp_1, wp_2, \dots, wp_n) \quad \text{Ecuación 3.17.17}$$

Factor que depende del número de horas de suministro del sector:

$$Wh = (wh \cdot r_1, wh \cdot r_2, \dots, wh \cdot r_n) \quad \text{Ecuación 3.17.18}$$

$$Wh = (wh_1, wh_2, \dots, wh_n) \quad \text{Ecuación 3.17.19}$$

Factor que depende de la facilidad o no en la operación para el aislamiento de un sector:

$$Wo = (wo \cdot e_1, wo \cdot e_2, \dots, wo \cdot e_n) \quad \text{Ecuación 3.17.20}$$

$$Wo = (wo_1, wo_2, \dots, wo_n) \quad \text{Ecuación 3.17.21}$$

3.17.2. OPTIMIZACIÓN DEL HORARIO DE SUMINISTRO

Definidos los pesos de cada una de las variables (sectores), se procede a realizar la optimización que busque el mejor horario de suministro para cada sector, en el presente estudio se propone una metodología que utiliza programación lineal con variables binarias, la cual permitirá seleccionar los sectores que modificarán su horario de suministro en base a los criterios mencionados, dentro de la función objetivo se considera la posibilidad de que existan sectores que trabajen en cascada, también para reducir el volumen de regulación y el tiempo de residencia del agua en el depósito se incluye el término relacionado con el volumen de ingreso al depósito. La restricción más importante en la optimización es el volumen de salida del depósito, este valor permitirá reorganizar el horario de cada sector y encontrar escenarios con mejores condiciones de servicio.

A continuación se describen todas las expresiones utilizadas para definir la función objetivo:

Partiendo de la matriz de variables binarias $V \ m \times n$:

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & \dots & v_{mn} \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 3.17.22}$$

v_{kl} es binario, para todo $k = 1, 2, \dots, m$ y $l = 1, 2, \dots, n$

Donde:

n = número total de sectores

m = número total de periodos del día

Utilizamos la matriz cuadrada $U \ m \times m$, $m \times p$ para efectos de cálculo, para que el horario de suministro de cada sector se mueva en bloque:

$$U^{(n)} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1p} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \dots & u_{mp} \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 3.17.23}$$

Donde:

$$u_{kl} = 0$$

$$u_{kl} = 1 \quad \text{Para todo} \quad k = 1, 2, \dots, m$$

$$l = k, (k+1), \dots, (k+h-1)$$

$$\text{Si } (k+h-1) > m$$

$$\text{Entonces: } l = 1, 2, \dots, (k+h-1-m)$$

$$h = \text{periodos de suministro}$$

Se tendrán tantas matrices U como sectores tenga el estudio.

Por ejemplo para m=12 y h=4:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 3.17.24}$$

Creamos los vectores de horario de suministro de cada sector, utilizando los valores de la matriz correspondiente a cada uno:

$$X_1 = \left(\sum_{m=1}^m v_{m1} \cdot u_{m1}^{(1)}, \sum_{m=1}^m v_{m1} \cdot u_{m2}^{(1)}, \dots, \sum_{m=1}^m v_{m1} \cdot u_{mp}^{(1)} \right) = (x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}) \quad \text{Ecuación 3.17.25}$$

$$X_2 = \left(\sum_{m=1}^m v_{m2} \cdot u_{m1}^{(2)}, \sum_{m=1}^m v_{m2} \cdot u_{m2}^{(2)}, \dots, \sum_{m=1}^m v_{m2} \cdot u_{mp}^{(2)} \right) = (x_{12}, x_{22}, \dots, x_{m2})$$

⋮

$$X_n = \left(\sum_{m=1}^m v_{mn} \cdot u_{m1}^{(n)}, \sum_{m=1}^m v_{mn} \cdot u_{m2}^{(n)}, \dots, \sum_{m=1}^m v_{mn} \cdot u_{mp}^{(n)} \right) = (x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{mn})$$

Multiplicamos el volumen por periodo por el vector de horarios de suministro, de esta forma se encontrará el volumen de cada sector en el periodo correspondiente.

$$M_1 = V_{S_1} \cdot (x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1}) = (V_{S_1} \cdot x_{11}, V_{S_1} \cdot x_{21}, \dots, V_{S_1} \cdot x_{m1}) = (m_{11}, m_{21}, \dots, m_{m1}) \quad \text{Ecuación 3.17.26}$$

$$M_2 = V_{S_2} \cdot (x_{12}, x_{22}, \dots, x_{m2}) = (V_{S_2} \cdot x_{12}, V_{S_2} \cdot x_{22}, \dots, V_{S_2} \cdot x_{m2}) = (m_{12}, m_{22}, \dots, m_{m2})$$

⋮

$$M_n = V_{S_n} \cdot (x_{1n}, x_{2n}, \dots, x_{mn}) = (V_{S_n} \cdot x_{1n}, V_{S_n} \cdot x_{2n}, \dots, V_{S_n} \cdot x_{mn}) = (m_{1n}, m_{2n}, \dots, m_{mn})$$

$$V_{S_n} = \frac{\text{Volumen diario sector}}{\text{periodos de suministro}} \quad \text{Ecuación 3.17.27}$$

Asimismo, con el fin de que los sectores tengan prioridad inicial en su horario actual, es decir, para partir de un escenario con el horario actual, se requiere de una matriz S $m \times n$ donde el periodo de suministro actual este representado con valores de 1 y los periodos en los que no haya suministro con 0:

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & \dots & s_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & \dots & s_{mn} \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 3.17.28}$$

s_{kl} es binario; $s_{kl} = 1$ si es periodo con suministro; $s_{kl} = 0$ si es periodo sin suministro

Vector que representa el horario del sector 1: $S_1 = (s_{11}, s_{21}, \dots, s_{m1})$

Vector que representa el horario del sector 2: $S_2 = (s_{12}, s_{22}, \dots, s_{m2})$

⋮

Vector que representa el horario del sector n: $S_n = (s_{1n}, s_{2n}, \dots, s_{mn})$

De esta forma, con los elementos calculados, la función objetivo es:

Maximizar

$$\sum_{i=1}^{i=m} \left(\sum_{j=1}^{j=n} wp_i \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^{j=n} wc_i \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^{j=n} wh_i \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^{j=n} wo_i \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^{j=n} s_{ij} \cdot x_{ij} + t_i \cdot \sum_{j=1}^{j=n} x_{ij} + s_{ix} \cdot x_{iy} \right)$$

Sujeto a:

$$\sum_{m=1}^m v_{m1} = 1 ; \sum_{m=1}^m v_{m2} = 1 ; \dots ; \sum_{m=1}^m v_{mm} = 1$$

$$\sum_{n=1}^n x_{1n} \leq SS ; \sum_{n=1}^n x_{2n} \leq SS ; \dots ; \sum_{n=1}^n x_{mn} \leq SS$$

$$\sum_{n=1}^n m_{1n} \leq VS ; \sum_{n=1}^n m_{2n} \leq VS ; \dots ; \sum_{n=1}^n m_{mn} \leq VS$$

$$v_{11} \geq 0 \quad \dots \quad v_{mm} \geq 0$$

Donde:

x = valor binario definido en un periodo para cada sector.

wp = factor o peso que depende de la presión de servicio en el sector

wc = factor o peso que depende del número de clientes del sector

wh = factor o peso que depende del número de horas de suministro del sector

wo = factor o peso que depende de la facilidad o no en la operación para el aislamiento de un sector.

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

SS = Sectores trabajando simultáneamente.

VS = Volumen máximo de salida por la tubería de distribución.

La función objetivo permitirá seleccionar los sectores que modificarán su horario de suministro en base a los pesos de cada criterio, la modificación del horario toma en cuenta el volumen de ingreso al tanque de almacenamiento, con el fin de que el horario nuevo tenga preferencia por horas en las que existe oferta de

agua al depósito, de esta forma se reduce el tiempo de residencia y el volumen de regulación; por otra parte, se consideró el efecto de los sectores que trabajan en cascada, sectores que difícilmente podrán modificar su horario de suministro debido a su dependencia con otros sectores, por esta razón se introduce en la función objetivo el término $S_{ix} \cdot X_{iy}$.

3.18. CÁLCULO HIDRÁULICO DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS

Definida la nueva configuración en horario y volumen de salida del depósito para cada hora, se procede con el cálculo o verificación hidráulica utilizando los caudales máximos que se producen en la hora pico, el cálculo hidráulico establecerá como mejoran las presiones con el cambio de horario de los sectores, el criterio utilizado para el cálculo de presiones también es el PDD, no solamente mejoran las presiones sino que también mejoran los volúmenes suministrados o demandas.

Debe analizarse la modificación del nivel del agua en el depósito en cada uno de los escenarios, lo cual afectará al cálculo de las presiones.

3.19. ELECCIÓN DEL ESCENARIO.

Con la presente metodología pueden generarse varios escenarios, principalmente restringiendo el volumen de salida del depósito, la elección del escenario definitivo más favorable o la elección del nivel de mejora del sistema será tarea de los ejecutivos de la empresa de agua; cuando la restricción del volumen de salida para limitar el caudal pico es menor, 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 muevan la mayoría de los sectores.

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, para evitar futuros problemas sociales.

CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO

4.1. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua, 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 este sentido hay sectores en la ciudad que tienen agua solamente por horas. El horario de distribución debería estar planificado para cubrir la demanda y la presión de servicio, sin embargo el crecimiento intensivo de la ciudad y la escasez económica hicieron que estas premisas fueron perdiendo validez; actualmente, en la ciudad de Oruro hay zonas que no solamente tienen agua por pocas horas, sino que también tienen presiones y caudales insuficientes, una de ellas es la zona sur 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), actualmente se abastece a la ciudad con un caudal producido en fuentes de más de 300 lt/seg para los más de 50000 abonados, se cuenta con un volumen de almacenamiento en los tanques de 11000 m³, las aducciones principales llegan a tener una longitud de 65 km y la red de distribución alcanza casi los 900 km de longitud.

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 que es el depósito Agua de Castilla.

Como se indicó anteriormente, se buscan soluciones a corto plazo a los problemas relacionados con la presión y demanda de agua potable en los barrios de la zona sur de la ciudad de Oruro buscando mejorar la calidad del servicio. No se consideran las soluciones a largo plazo pues estas resultan obvias debido a que necesariamente pasarán a ser soluciones de infraestructura como la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento, ampliación del volumen de regulación de los tanques (construcción de nuevos), ampliación de redes y aducciones.

Inicialmente se realiza un diagnóstico en base a un balance hídrico, para este fin se recopila información en SeLA-Oruro relacionada con la producción, facturación e infraestructura, de tal forma que se pueda realizar este balance para posteriormente establecer la cantidad de agua no facturada en la zona sur de la ciudad, posteriormente se establecerán procedimientos o estrategias para mejorar el servicio.

Se utilizan las mediciones periódicas que realiza SeLA: presiones, caudales, niveles de tanques; estas mediciones son realizadas principalmente por las exigencias del ente regulador del servicio de agua potable de Bolivia AAPS (Autoridad de Fiscalización y Control Social de Agua Potable y Saneamiento); el sistema intermitente de la ciudad utiliza 72 sectores diferenciados (SeLA - Oruro., 2013.), de los cuales 15 se encuentran en la zona sur. Aunque la información es básica, se trabajará con la misma, generalmente los sistemas de suministro intermitente con escasez económica destinan pocos recursos para monitorear su sistema de abastecimiento.

Para encontrar soluciones a estos problemas se utilizará la metodología planteada en el presente trabajo, en este capítulo se detallan cada uno de los pasos que se siguieron para mejorar las condiciones del servicio.

4.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.2.1. 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.

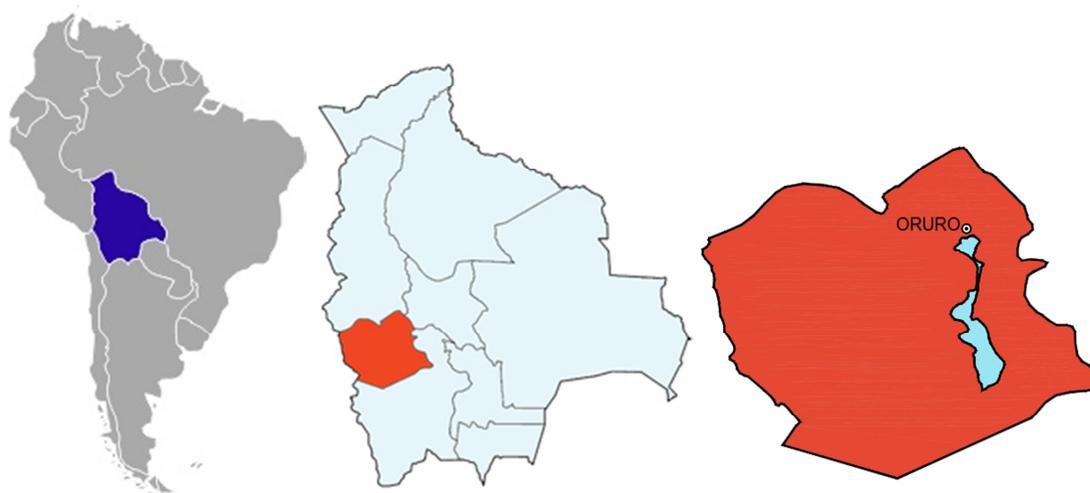


Figura 4.2.1. Ubicación geográfica del Departamento de Oruro



Figura 4.2.2. 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° 58' 19" a 18° 00' 44" de latitud Sur y los 67° 08' 40" a 67° 05' 59" de longitud Oeste (Datum WGS84).

4.2.2. CLIMA

La ciudad de Oruro tiene un clima muy distorsionado debido a su altitud de 3706 m.s.n.m. 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 a 562.1 mm.

Tabla 4.2.1. Precipitación total - Gestión 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

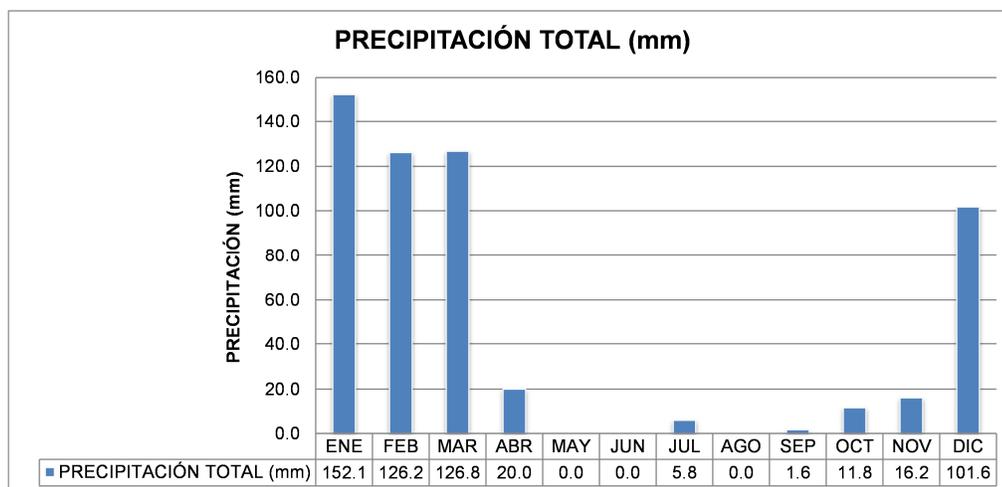


Figura 4.2.3. Precipitación total - Gestión 2012

La temperatura media anual en la ciudad de Oruro alcanzó a 9.9 °C, presentándose en los meses de mayo, junio, julio e inclusive agosto las temperaturas absolutas más bajas, llegando a 12.6 °C bajo cero.

Tabla 4.2.2. Temperatura media - Gestión 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 4.2.3. 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 4.2.4. Temperatura mínima absoluta - Gestión 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

4.2.3. 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. En esta zona la conformación del suelo es limo arenoso fino producto de sedimentación de origen fluvial.

4.2.4. 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 a 1.03%.

En 1950, de la población del departamento de Oruro 62% residía en el área rural y solo el 38% en el área urbana, en el año 2001 la población urbana alcanza a 60.25% y la rural a 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 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.

Debido a que no se cuenta con la población detallada por sectores, 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 para la ciudad de Oruro de 4.2 hab./familia debido a que muchas veces existen más de una familia con una conexión domiciliaria.

Tabla 4.2.5. Número de usuarios y población - zona sur de Oruro

CIRCUITO	NUMERO 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
TOTAL	7540	37700

La población estimada de esta zona de la ciudad es 37700 habitantes que habitan los 32 barrios.

4.2.5. 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 que comunes en la ciudad de Oruro son el español, quechua y aimara. La estructura de organización de los barrios está conformada por Juntas Vecinales, las cuales buscan el desarrollo de la comunidad. 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.

4.3. CARACTERÍSTICAS DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA

En Bolivia, cerca al 25% de la población, rural y urbana, no cuenta con servicio continuo por 24 horas de agua potable, más de la mitad de este porcentaje tiene agua de 0 a 6 horas por día (INE - Bolivia, 2014).



Figura 4.3.1. Hogares por continuidad diaria en la provisión de agua (2000 – 2002), (INE - Bolivia, 2014)

Para implementar la presente metodología, es necesario conocer las características del sistema de suministro de la ciudad, a continuación se describen los aspectos más importantes:

El sistema de agua potable de la ciudad de Oruro cuenta solamente con fuentes subterráneas, un total de 10.21 Hm³/año, las vertientes de Cala Cala aportan el 6% del volumen suministrado, los pozos profundos

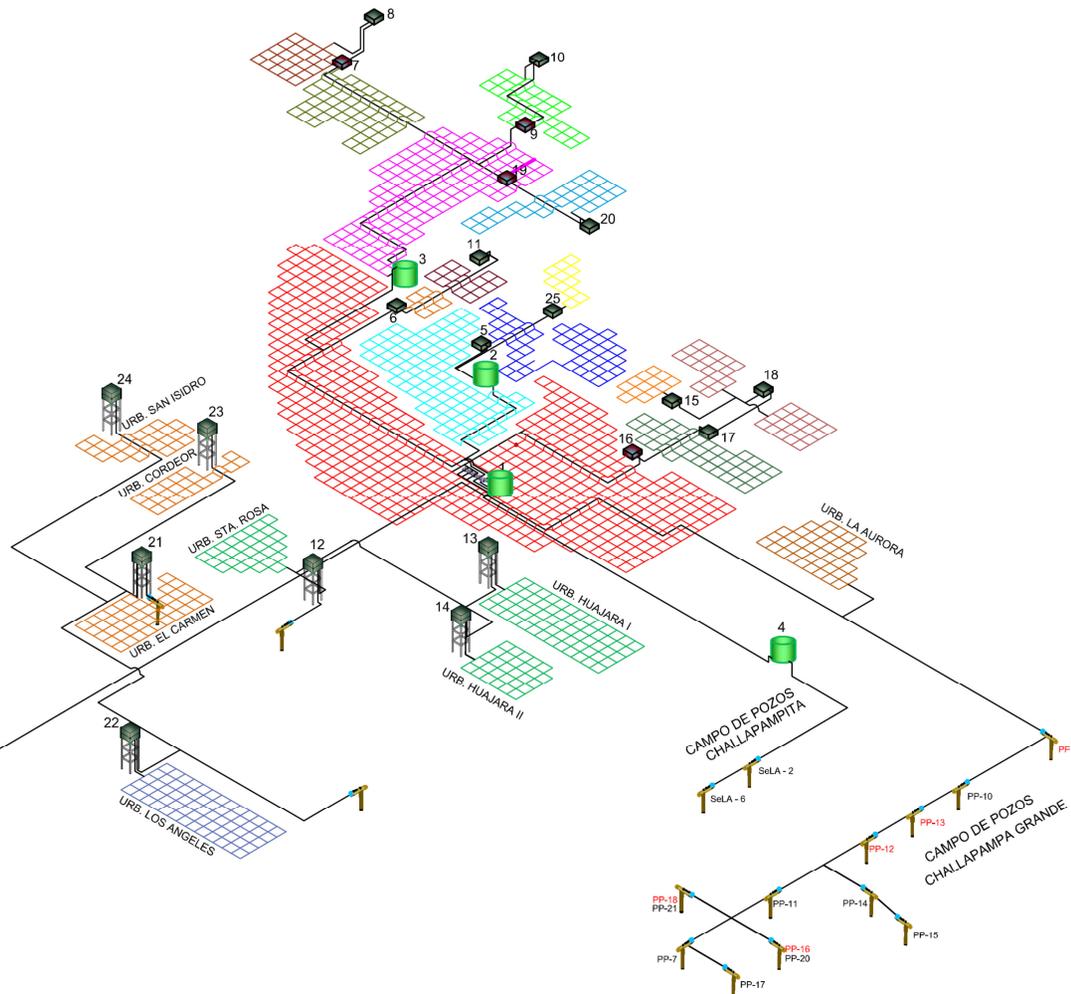
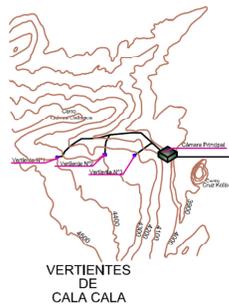
de Challapampa grande y Challapampita 94%, este volumen es almacenado y desinfectado en la Planta JKW, la desinfección se realiza utilizando gas cloro, solamente se procede con la cloración debido a una buena calidad físico-química y bacteriológica del agua por su origen subterráneo, no necesita tratamientos adicionales, 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); como se conoce, la dureza produce incrustaciones en las paredes internas de la tubería las cuales generan mayor rugosidad, este aspecto será tomado en cuenta cuando se realice la modelación hidráulica del sistema.

Dentro la Planta JKW se tiene un depósito de almacenamiento 1500 m³, con el uso de cinco bombas centrífugas 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 m³), al tanque Agua de Castilla (suministra agua a la Zona sur de la ciudad, cuenta con un volumen de almacenamiento de 1900 m³) 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.



Fotografía 4.3.1. Tanque de almacenamiento Planta JKW – SeLA Oruro

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 3/16"
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 URURO 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

Figura 4.3.2. Esquema isométrico del sistema de agua potable de la ciudad de Oruro

Fuente: SeLA

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.

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 abonados sin contador, esta situación perjudica en el logro de un balance hídrico más preciso.

Otra característica a tomar en cuenta es la clasificación de los abonados por el tipo de uso, más del 90% está clasificado como doméstico, existiendo poca cantidad de usuarios industriales, comerciales o institucionales.

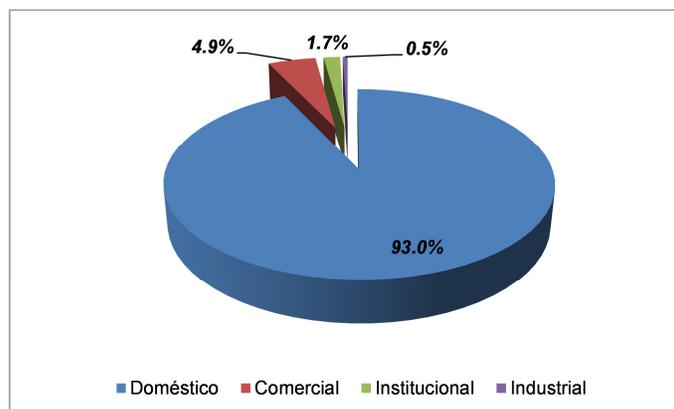


Figura 4.3.3. Abonados por categoría, ciudad de Oruro

Fuente: SeLA - Oruro

Comparando con los volúmenes de consumo mensual, los clientes domésticos reducen en porcentaje, sin embargo sigue siendo muy importante el consumo doméstico, mayor a 65%.

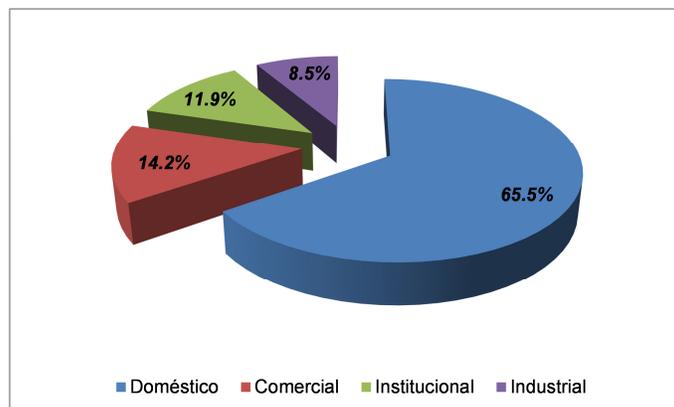


Figura 4.3.4. Consumo por categoría de abonado, ciudad de Oruro

4.3.1. 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.

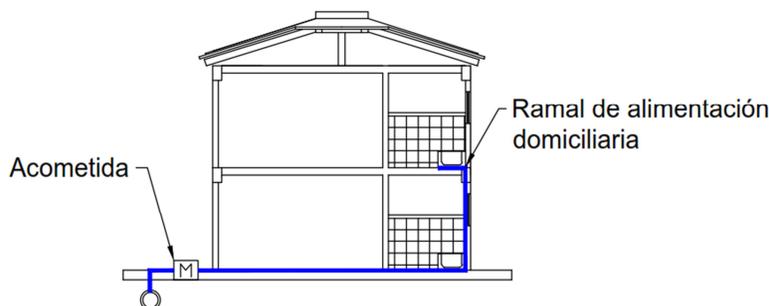


Figura 4.3.5. Sistema de conexión directa, sin tanque elevado

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.

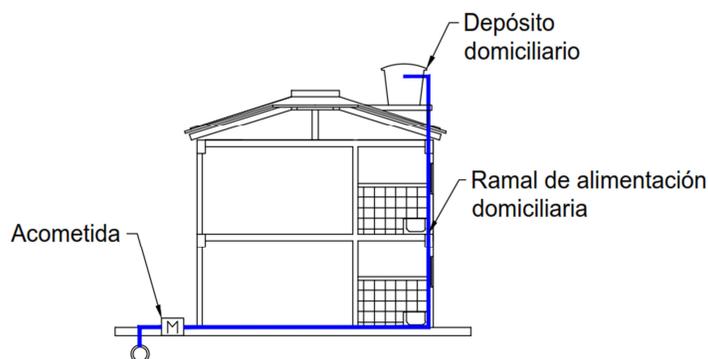


Figura 4.3.6. Sistema de conexión indirecta, sin bombeo

Las conexiones indirectas con bombeo son utilizadas generalmente en edificios multifamiliares, debido al costo que implica el uso de energía eléctrica para la impulsión del agua no es utilizado en viviendas donde habita poca gente, es poco frecuente este tipo de sistema en la zona de estudio debido a que existen pocos edificios multifamiliares en el lugar.

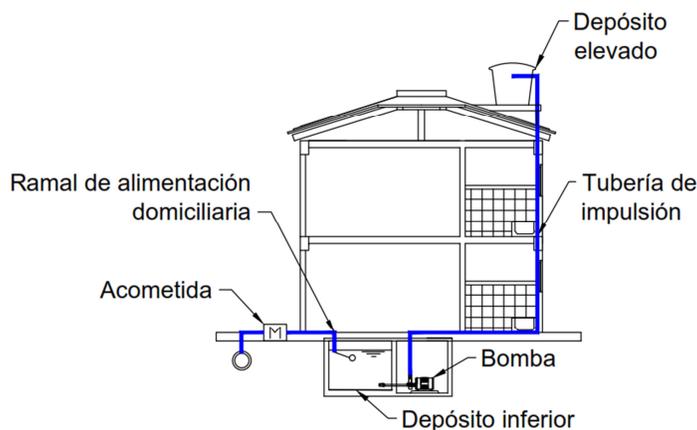


Figura 4.3.7. Sistema de conexión indirecto, con bombeo.

Debido a la intermitencia del suministro, la población tiene que almacenar agua de la forma que pueda, se dan varios casos en los cuales se utilizan recipientes pequeños ubicados a nivel del suelo donde se almacena agua, a veces por la baja presión del servicio de la red y otras porque no tiene recursos económicos para solventar los gastos de elevar el agua, esta costumbre puede generar problemas en la calidad del agua.

4.3.2. SELA – ORURO

El Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado de Oruro (SeLA – Oruro) creada 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 de administración de información:

- La base de datos del sistema comercial SELASIS donde se efectúa la cobranza, facturación, cortes y catastro de usuarios, 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 o circuitos hidráulicos, 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 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 empresa; 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 14.9 ó 1.66 € cargo fijo y Bs. 2.1 ó 0.23 € por metro cúbico consumido), no cubre costos de reposición ni ampliación del sistema por lo que se puede hablar de un sistema de suministro intermitente de escasez económica.

4.3.3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA SUR

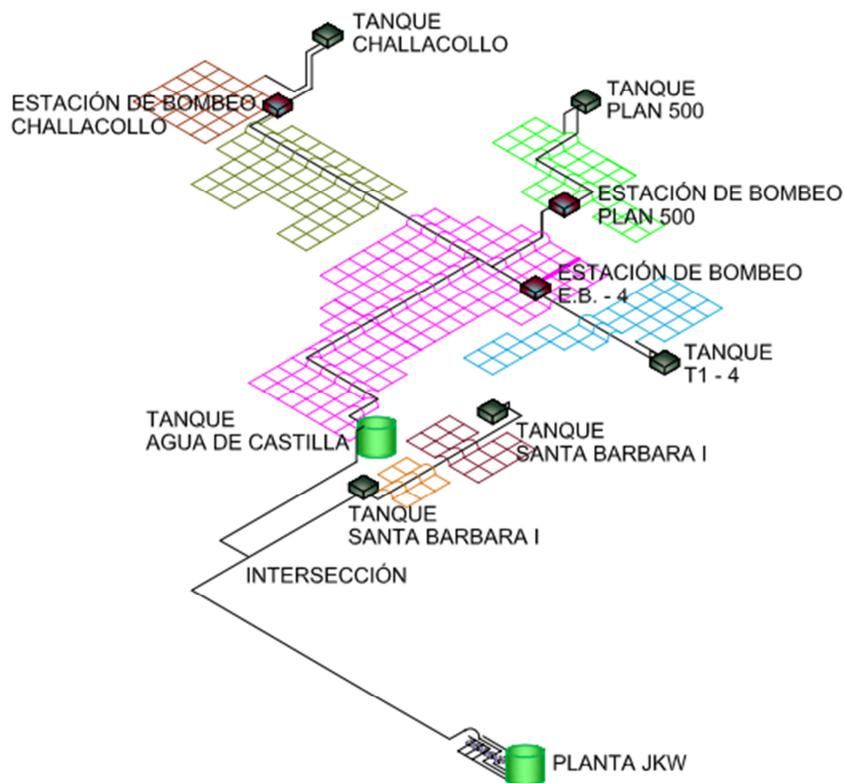


Figura 4.3.8. Esquema isométrico del subsistema de abastecimiento de agua potable de la zona sur de la ciudad de Oruro.

Fuente: SeLA - Oruro

Como se mencionó en la descripción del sistema de agua potable de la ciudad de Oruro, la mayoría de las fuentes de abastecimiento llegan a la Planta JKW, desde aquí 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.



Fotografía 4.3.2. Sala de bombas Planta JKW – SeLA Oruro

Como una parte del caudal trasegado llega al tanque Santa Bárbara I, será necesario conocerlo, por lo que se recolectó esta información que es medida diariamente en el medidor que se encuentra al ingreso de este depósito.

Resulta perjudicial que no exista un contador o caudalímetro en el ingreso del depósito Agua de Castilla, esta situación exige que se utilicen datos adicionales medidos en el depósito, como la altura de agua a cada hora.

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.

4.4. MODELO INICIAL DEL SISTEMA – ESCENARIO ACTUAL

Como parte del modelo inicial del sistema, se realizará un diagnóstico del sistema en base al balance hídrico, posteriormente se estimarán las demandas de cada sector, comparando con los volúmenes de ingreso al sistema se podrá conocer la variación del volumen y del nivel del agua en el depósito de almacenamiento, elemento importante en el modelo inicial. Asimismo, se considera la verificación de presiones utilizando un modelo estático en la hora de mayor consumo utilizando el criterio de Demanda Dependiente de la Presión (PDD), en base a las presiones calculadas y medidas se podrá ajustar el modelo variando la rugosidad de las tuberías, el modelo ajustado será utilizado para calcular la variación de las presiones en escenarios nuevos donde se modifiquen los horarios de suministro de los sectores.

4.4.1. CATEGORIZACIÓN DEL SISTEMA DE SUMINISTRO INTERMITENTE

Debido a las limitaciones económicas de la empresa encargada del servicio de agua potable (SeLA-Oruro), muy relacionadas con las limitaciones en la cantidad de agua suministrada, se establece que el sistema intermitente tiene escasez económica, por lo que le corresponde una categoría tipo 2.

En el subsistema de suministro de agua de la zona sur de la ciudad 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.

4.4.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN – VOLUMEN DE ENTRADA AL SISTEMA EN FORMA MENSUAL

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 en cada uno de los meses del año 2012.

Debido a que se estudia un subsistema, se considera que la planta JKW es la fuente de suministro, por lo que se utilizarán los volúmenes enviados desde la misma considerándola como fuente de suministro de agua.

4.4.2.1. Volumen mensual bombeado medido en la planta JKW

Cada hora son registrados los volúmenes trasegados por la Bomba B-4 a los tanques Agua de Castilla y Santa Bárbara I (como un solo caudal a través de una tubería de impulsión), estas cantidades son totalizadas y reportadas en un volumen mensual.

Tabla 4.4.1. Volumen mensual (m³) – Bomba B-4 – Mediciones realizadas en la planta JKW – Gestión 2012

MES	VOLUMEN MENSUAL (m ³ /mes)	NÚMERO DE DÍAS	VOLUMEN DIARIO (m ³ /día)	CAUDAL MEDIO (l/s)
ENERO	120396	31	3883.74	44.95
FEBRERO	110075	29	3795.69	43.93
MARZO	117835	31	3801.13	43.99
ABRIL	121051	30	4035.03	46.70
MAYO	121482	31	3918.77	45.36
JUNIO	119437	30	3981.23	46.08
JULIO	120637	31	3891.52	45.04
AGOSTO	124489	31	4015.77	46.48
SEPTIEMBRE	115656	30	3855.20	44.62
OCTUBRE	119037	31	3839.90	44.44

NOVIEMBRE	123329	30	4110.95	47.58
DICIEMBRE	122306	31	3945.35	45.66
TOTAL:	1435729.5	366	3922.86	45.40

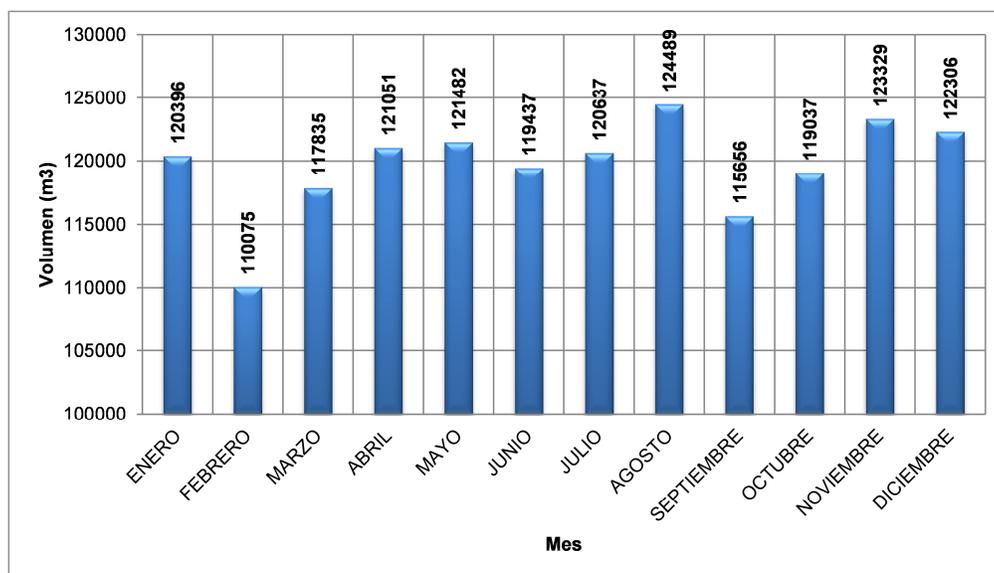


Figura 4.4.1. Volumen Mensual – Bomba B-4 – Gestión 2012

4.4.2.2. Volumen medido que ingresa al depósito Santa Bárbara I

Debido a que el depósito Agua de Castilla no cuenta con contador, debe considerarse el volumen que ingresa al depósito Santa Bárbara I, que si tiene contador al ingreso, una fracción del volumen trasegado ingresa a este tanque. Posteriormente se calculará la diferencia para determinar el volumen de entrada al sistema que será el volumen que llega al depósito Agua de Castilla.

Tabla 4.4.2. Volumen mensual (m³) – Contador Santa Bárbara I – Mediciones realizadas en el tanque Santa Bárbara I – Gestión 2012

MES	VOLUMEN MENSUAL (m ³ /mes)	NÚMERO DE DÍAS	VOLUMEN DIARIO (m ³ /día)	CAUDAL MEDIO (l/s)
ENERO	16387.2	31	528.62	6.12
FEBRERO	14967.5	29	516.12	5.97
MARZO	15941.8	31	514.25	5.95
ABRIL	14853.2	30	495.11	5.73
MAYO	14981.3	31	483.27	5.59
JUNIO	14908.6	30	496.95	5.75
JULIO	14477.5	31	467.02	5.41
AGOSTO	15939	31	514.16	5.95
SEPTIEMBRE	15663	30	522.10	6.04
OCTUBRE	15327	31	494.42	5.72
NOVIEMBRE	15103.2	30	503.44	5.83
DICIEMBRE	16345.7	31	527.28	6.10
TOTAL:	184895	366	502.23	5.85

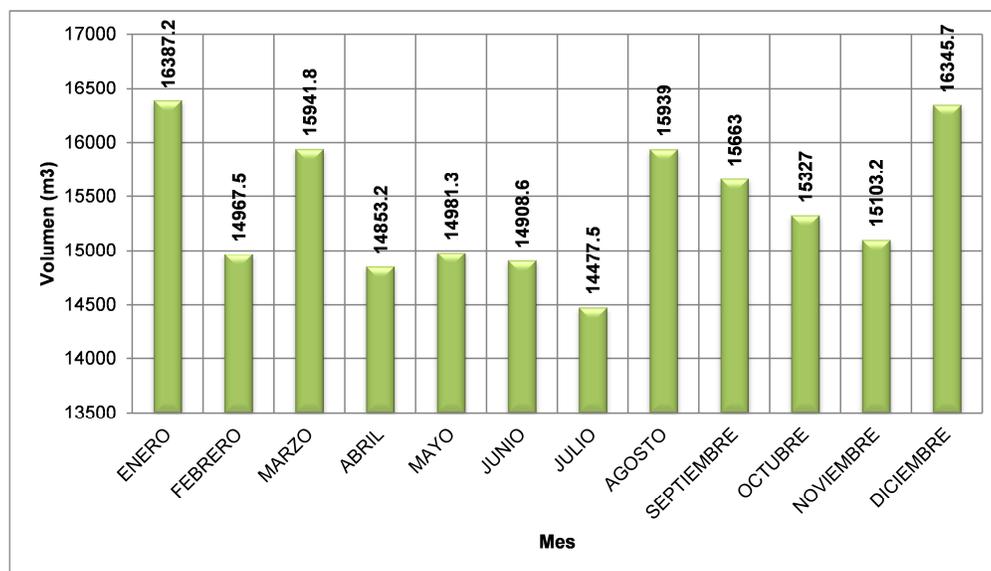


Figura 4.4.2. Volumen mensual (m³) – Contador Santa Bárbara I – Gestión 2012

4.4.2.3. Porcentaje de pérdidas en la tubería de impulsión desde la planta JKW

Como no se tiene un contador al ingreso del depósito Agua de Castilla, no es posible establecer el volumen de pérdidas producido en el tramo de impulsión entre la Planta JKW y este depósito, por esta razón, en principio se adoptó un valor de 10% de pérdidas, posteriormente este valor se ajusta utilizando las alturas o niveles de agua medidas y calculadas por el modelo en el depósito, tras este ajuste se estableció un valor de 10.43%.

Se volverá a analizar este valor en el acápite correspondiente al primer ajuste.

4.4.2.4. Volumen de entrada al sistema

Considerando el porcentaje de pérdidas en la tubería de impulsión y conociendo el volumen que va al tanque Santa Bárbara I, se calcula el volumen de entrada al sistema que será resultado de la diferencia de ambos valores.

Tabla 4.4.3. Volumen de entrada al sistema (m³) – Gestión 2012

MES	VOLUMEN MENSUAL* (1-%Perd.) (m³/mes)	VOLUMEN MENSUAL DEPÓSITO SANTA BARBARA I (m³/mes)	VOLUMEN MENSUAL DE ENTRADA AL SISTEMA (m³/mes)	NÚMERO DE DÍAS	VOLUMEN DIARIO DE ENTRADA AL SISTEMA (m³/día)	CAUDAL MEDIO DE ENTRADA AL SISTEMA (l/s)
ENERO	107841.32	16387.2	91454.1	31	2950.13	34.15
FEBRERO	98596.58	14967.5	83629.1	29	2883.76	33.38
MARZO	105547.38	15941.8	89605.6	31	2890.50	33.45
ABRIL	108428.02	14853.2	93574.8	30	3119.16	36.10

MAYO	108814.07	14981.3	93832.8	31	3026.86	35.03
JUNIO	106982.32	14908.6	92073.7	30	3069.12	35.52
JULIO	108057.19	14477.5	93579.7	31	3018.70	34.94
AGOSTO	111507.51	15939.0	95568.5	31	3082.86	35.68
SEPTIEMBRE	103595.60	15663.0	87932.6	30	2931.09	33.92
OCTUBRE	106624.03	15327.0	91297.0	31	2945.07	34.09
NOVIEMBRE	110468.02	15103.2	95364.8	30	3178.83	36.79
DICIEMBRE	109552.15	16345.7	93206.4	31	3006.66	34.80
TOTAL:	1286014.19	184895.0	1101119.2	366	3008.56	34.82

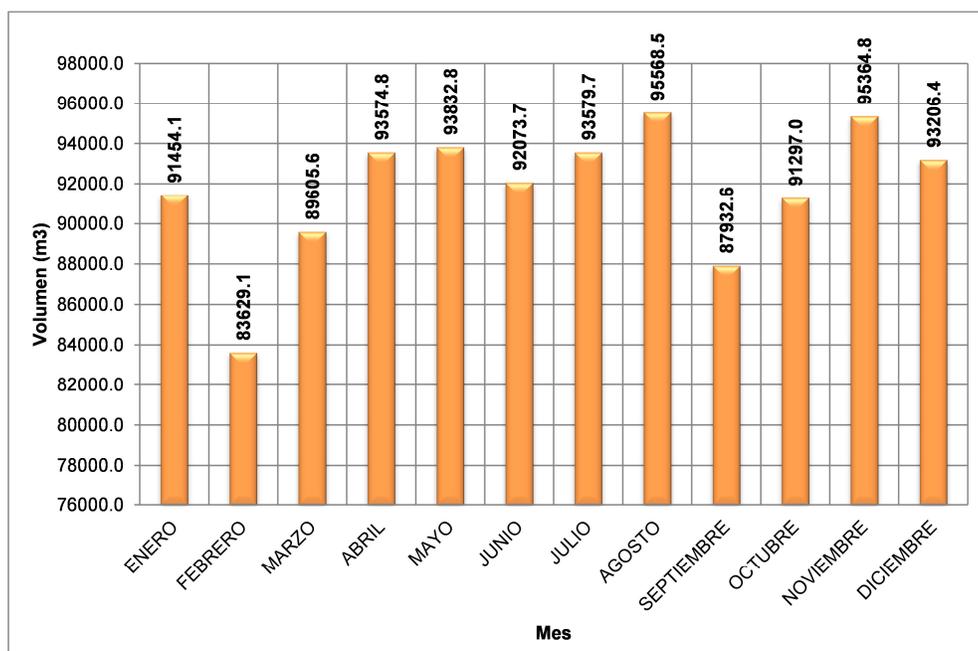


Figura 4.4.3. Volumen de entrada al sistema (m³) – Gestión 2012

Considerando la presencia de 10.43% de pérdidas en la línea de impulsión, se tiene un caudal medio impulsado desde la planta JKW de 40.67 l/s (1286014.19 m³/año), como una parte ingresa al tanque Santa Bárbara I (5.85 l/s), entonces llegan al depósito Agua de Castilla 34.82 l/s (1101119.2 m³/año).

4.4.3. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN – VOLUMEN DE CONSUMO FACTURADO MEDIDO

Se procedió a la recolección de la información del Departamento de Facturación de SeLA-Oruro (Gestión 2012), en primera instancia se clasificaron los volúmenes medidos facturados por cada sector.

Se elaboró la siguiente relación mensual con estos volúmenes por cada sector:

Tabla 4.4.4. Volumen de consumo facturado medido (m3) – Gestión 2012

SECTOR	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	VOLUMEN ANUAL MEDIDO EN USUARIOS CON CONTADOR (m3)
S01-05	1614	1219	1387	1346	1642	1356	1273	1379	1525	1599	1655	1163	17158
S01-06	4633	3289	3546	3913	3981	3670	3281	3643	3744	4183	3852	3146	44881
S01-07	5975	5269	4792	5310	5854	5087	6049	5825	5807	6318	5890	4307	66483
S01-08	3494	2960	2815	3159	3219	3030	3407	2839	3077	3392	3550	2674	37616
S01-10	1732	1854	1821	1774	1559	1938	1529	2018	1855	1857	1718	1527	21182
S01-11	1408	1584	1774	1657	1573	2209	1651	1993	1931	1703	1791	1286	20560
S01-09	3296	2265	2771	2533	3217	2934	2072	2849	3346	2569	3092	2673	33617
S01-13	7075	5832	5884	6312	6370	6175	5943	6275	6602	6510	6818	5002	74798
S01-14	1590	1330	1345	1443	1454	1405	1357	1432	1521	1430	1556	1143	17006
S01-15	2350	1977	1995	2141	2155	2090	2010	2134	2240	2215	2313	1705	25325
S01-16	3102	2570	2594	2780	2800	2725	2624	2773	2912	2880	3004	2211	32975
S02	4266	3704	3053	3768	3326	3380	3259	3331	4047	3353	7224	2481	45192
M02	3433	2459	2874	3173	2508	2461	2560	2609	2559	2493	2397	1853	31379
S01-12	13121	2566	11171	11980	12084	11732	11283	11920	12550	12345	12942	9536	133230
S01-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	57089	38878	47822	51289	51742	50192	48298	51020	53716	52847	57802	40707	601402

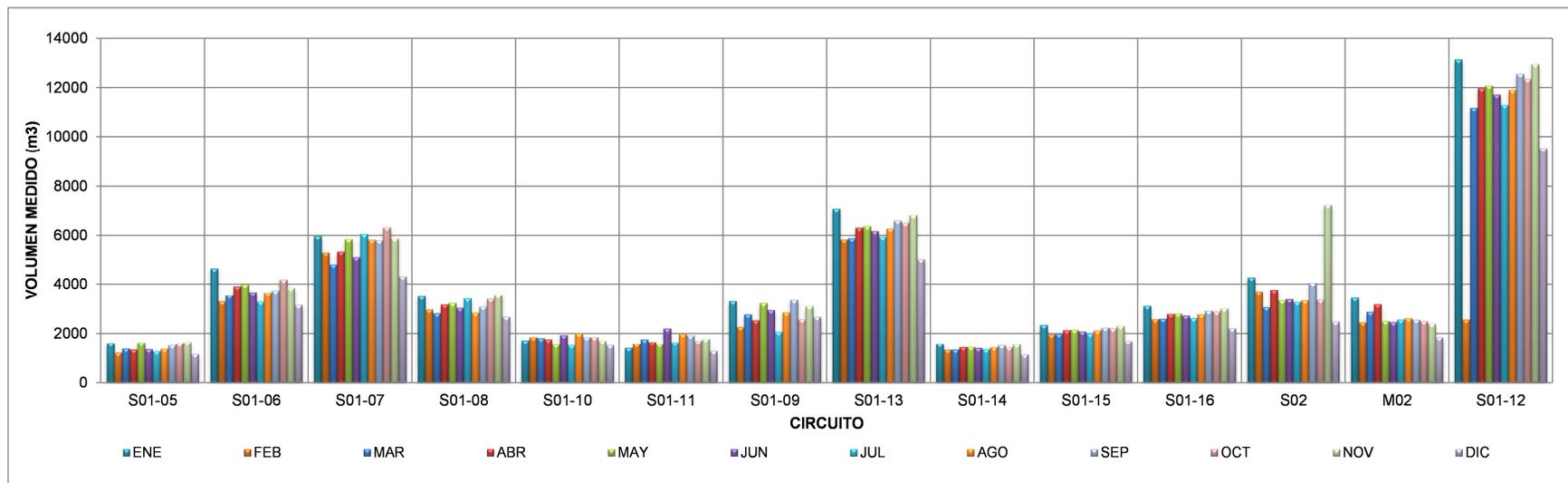


Figura 4.4.4. Volumen mensual consumido facturado por sector (m3) – Gestión 2012

4.4.4. VOLUMEN DE CONSUMO FACTURADO NO MEDIDO

Con el volumen mensual que consume un usuario con medición, calculado en cada sector, se estima el volumen de consumo de los clientes no medidos. Sin embargo debe considerarse que esta estimación puede arrojar valores pequeños con relación a la tendencia de consumir mayor cantidad cuando no se cuenta con medición, aunque en un sistema intermitente este hecho se ve reducido por las presiones bajas y la dependencia del caudal demandado.

Tabla 4.4.5. Volumen mensual medio consumido por clientes con medición – Gestión 2012

SECTOR	VOLUMEN MENSUAL MEDIDO (m ³ /mes/conexión)
S01-05	11.82
S01-06	12.68
S01-07	14.39
S01-08	9.73
S01-10	9.86
S01-11	11.42
S01-09	9.13
S01-13	7.75
S01-14	8.01
S01-15	10.24
S01-16	4.86
S02	7.03
M02	17.32
S01-12	12.36

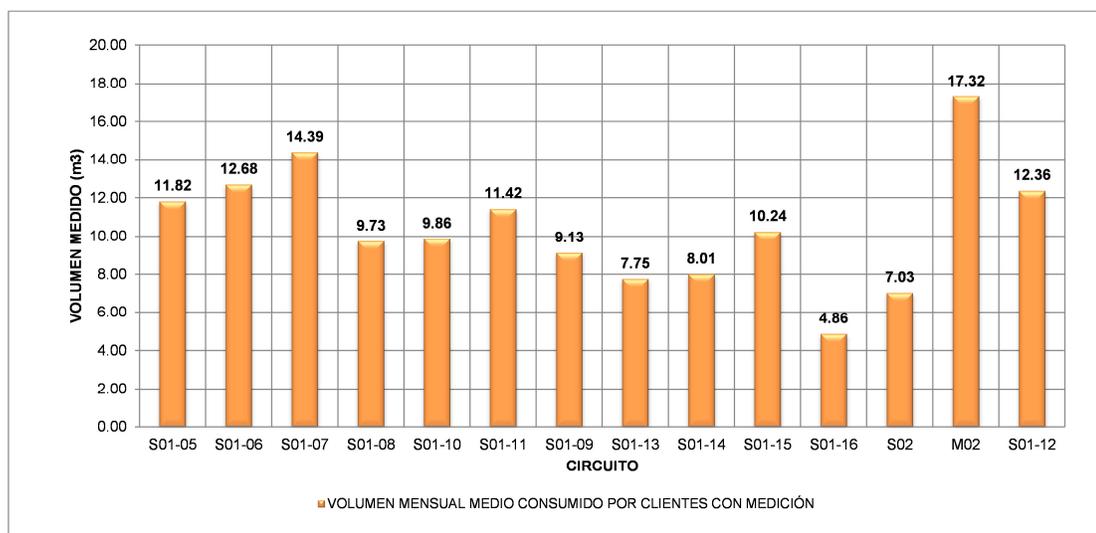


Figura 4.4.5. Volumen mensual medio consumido por clientes con medición – Gestión 2012

Los valores muestran la distribución inequitativa resultado de un sistema de suministro intermitente, los sectores con mayor cantidad de horas de suministro consumen más.

Posteriormente, en base a estos consumos, se procede a calcular el volumen de consumo facturado no medido:

Tabla 4.4.6. Volumen de consumo facturado no medido (m³) – Gestión 2012

SECTOR	CLIENTES SIN CONTADOR O SIN MEDICIÓN	VOLUMEN MENSUAL MEDIDO (m ³ /mes/conexión)	VOLUMEN MENSUAL DE CONSUMO FACTURADO NO MEDIDO (m ³ /mes)	VOLUMEN ANUAL DE CONSUMO FACTURADO NO MEDIDO (m ³ /año)
S01-05	26	11.82	307.24	3686.84
S01-06	172	12.68	2180.66	26167.91
S01-07	208	14.39	2993.17	35918.09
S01-08	115	9.73	1119.52	13434.29
S01-10	206	9.86	2031.42	24377.05
S01-11	94	11.42	1073.69	12884.27
S01-09	208	9.13	1898.03	22776.34
S01-13	261	7.75	2023.45	24281.44
S01-14	99	8.01	792.65	9511.83
S01-15	5	10.24	51.22	614.68
S01-16	353	4.86	1716.84	20602.08
S02	39	7.03	274.02	3288.22
M02	86	17.32	1489.29	17871.48
S01-12	187	12.36	2311.99	27743.89
S01-18	385	10.47	4031.60	48379.17
TOTAL	2059		24294.8	291537.58

El sector S01-18 tiene una cobertura de medición de 100%, sin embargo no se realizan las mediciones que corresponden por problemas sociales ya señalados, por esta razón se estimará su consumo utilizando el valor promedio de los otros sectores.

4.4.5. BALANCE HÍDRICO

En base a los volúmenes de ingreso al sistema y los volúmenes facturados, se procede a utilizar el método del IWA para realizar el balance hídrico; para completar la totalidad de valores se utilizan porcentajes proporcionados por SeLA-Oruro, debido a que en el presente trabajo el elemento que interesa solamente es el volumen de pérdidas; los volúmenes utilizados para el balance son anuales. Como el balance se realiza en la zona sur de la ciudad, utilizando como punto de partida el tanque Agua de Castilla, algunos volúmenes figurarán 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 m³/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 m³/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 m³/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 m³/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 m³/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 m³/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 m³/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 m³/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 m³/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 m³/año.

El balance hídrico del subsistema será:

Tabla 4.4.7. Balance hídrico del subsistema en formato del IWA – Gestión 2012

Volumen de entrada al sistema Qi	1,101,119.19 m³/año	Consumo autorizado QA	892,939.58 m³/año	Consumo autorizado facturado QAF	892,939.58 m³/año	Agua facturada exportada	0.00 m³/año	Agua facturada	892,939.58 m³/año
						Consumo facturado medido	601,402.00 m³/año		
						Consumo facturado no medido	291,537.58 m³/año		
				Consumo autorizado no facturado QAuNF	0.00 m³/año	Consumo no facturado medido	0.00 m³/año	Agua no facturada	208,179.61 m³/año
				Consumo no facturado no medido	0.00 m³/año				
		Pérdidas aparentes QPA	76,656.99 m³/año	Consumo no autorizado	16,516.79 m³/año				
				Inexactitudes de los medidores y errores en el manejo de datos	60,140.20 m³/año				
				Fugas en las tuberías de aducción y distribución	72,337.44 m³/año				
		Pérdidas reales QPR	131,522.62 m³/año	Fugas y reboses en tanques de almacenamiento	0.00 m³/año				
				Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente	59,185.18 m³/año				

Resumiendo y calculando porcentajes con relación al volumen de entrada al sistema se tiene:

Tabla 4.4.8. Porcentajes representativos del Balance Hídrico IWA

DESCRIPCIÓN	VOLUMEN	PORCENTAJE
Agua facturada exportada	0.00 m3/año	0.00%
Consumo facturado medido	601,402.00 m3/año	54.62%
Consumo facturado no medido	291,537.58 m3/año	26.48%
Consumo no facturado medido	0.00 m3/año	0.00%
Consumo no facturado no medido	0.00 m3/año	0.00%
Consumo no autorizado	16,516.79 m3/año	1.50%
Inexactitudes de los medidores y errores en el manejo de datos	60,140.20 m3/año	5.46%
Fugas en las tuberías de aducción y distribución	72,337.44 m3/año	6.57%
Fugas y reboses en tanques de almacenamiento	0.00 m3/año	0.00%
Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente	59,185.18 m3/año	5.38%
Volumen de entrada al sistema Qi	1,101,119.19 m3/año	100.00%

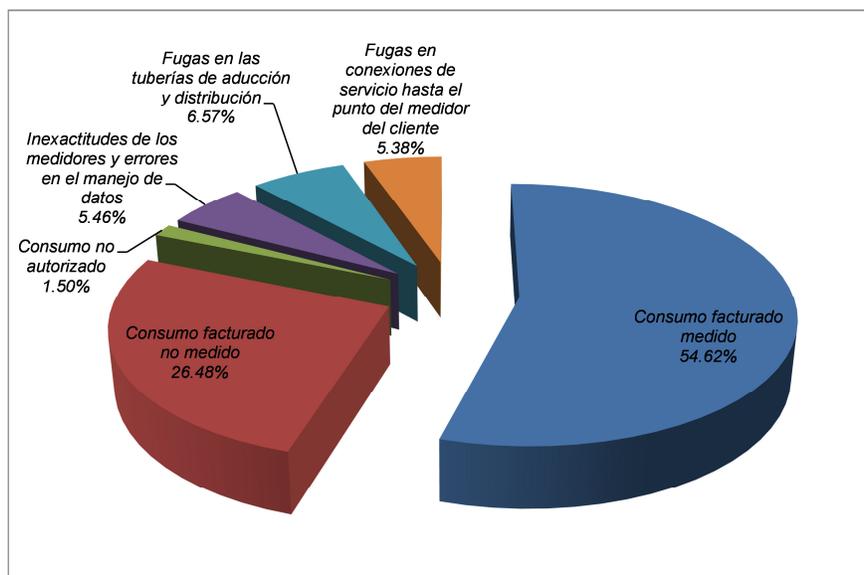


Figura 4.4.6. Porcentajes representativos del Balance Hídrico IWA

4.4.6. REPARTO DEL VOLUMEN NO FACTURADO POR SECTORES EN UN AÑO

Distribuimos el volumen no facturado a cada circuito en función del volumen consumido, de tal forma que el volumen de entrada sea igual a la suma del volumen total facturado y no facturado.

Con el balance hídrico se estimó el volumen de agua no facturado, que en este caso coincide con el volumen total de pérdidas de 208,179.61 m3/año, este volumen debe ser repartido entre todos los sectores, por esta razón se calcula un peso basado en el volumen anual consumido por cada sector, a continuación se realizará esta desagregación para calcular el volumen total.

Tabla 4.4.9. Cálculo del caudal medio de entrada a cada sector

SECTOR	CONSUMO AUTORIZADO FACTURADO (m3/año)	PESO DE CADA SECTOR	VOLUMEN AGUA NO FACTURADA (m3/año)	CAUDAL MEDIO DE AGUA NO FACTURADA (l/s)	VOLUMEN DE ENTRADA AL SECTOR (m3/año)	VOLUMEN DE ENTRADA AL SECTOR (m3/día)	CAUDAL MEDIO DE ENTRADA AL SECTOR (l/s)
S01-05	20844.84	2.33%	4859.76	0.15	25704.60	70.23	0.81
S01-06	71048.91	7.96%	16564.32	0.52	87613.22	239.38	2.77
S01-07	102401.09	11.47%	23873.75	0.75	126274.84	345.01	3.99
S01-08	51050.29	5.72%	11901.84	0.38	62952.13	172.00	1.99
S01-10	45559.05	5.10%	10621.62	0.34	56180.67	153.50	1.78
S01-11	33444.27	3.75%	7797.18	0.25	41241.45	112.68	1.30
S01-09	56393.34	6.32%	13147.52	0.42	69540.86	190.00	2.20
S01-13	99079.44	11.10%	23099.34	0.73	122178.78	333.82	3.86
S01-14	26517.83	2.97%	6182.36	0.20	32700.19	89.34	1.03
S01-15	25939.68	2.90%	6047.57	0.19	31987.25	87.40	1.01
S01-16	53577.08	6.00%	12490.94	0.40	66068.02	180.51	2.09
S02	48480.22	5.43%	11302.66	0.36	59782.89	163.34	1.89
M02	49250.48	5.52%	11482.24	0.36	60732.72	165.94	1.92
S01-12	160973.89	18.03%	37529.39	1.19	198503.28	542.36	6.28
S01-18	48379.17	5.42%	11279.10	0.36	59658.28	163.00	1.89
TOTAL	892939.58		208179.61		1101119.19	3008.52	34.82

De esta forma se calculó el caudal medio diario de toda la zona (34.82 l/s) y de cada uno de los sectores estudiados.

4.4.7. ELECCIÓN DEL MES DE CONDICIONES MÁS DESFAVORABLES

El análisis hidráulico debe realizarse en el mes, día y hora más desfavorable, es decir, se considera aquel periodo de tiempo en el cual el volumen de consumo haya sido máximo, en estas condiciones se tendrán las presiones más bajas en la red. Como las lecturas de consumo realizadas por SeLA-Oruro son mensuales, se procederá con la identificación del mes de mayor consumo medido, asumiendo que el caudal máximo horario se produce en este periodo de tiempo.

La variación mensual del consumo en la gestión 2012 en la zona sur de la ciudad de Oruro fue:

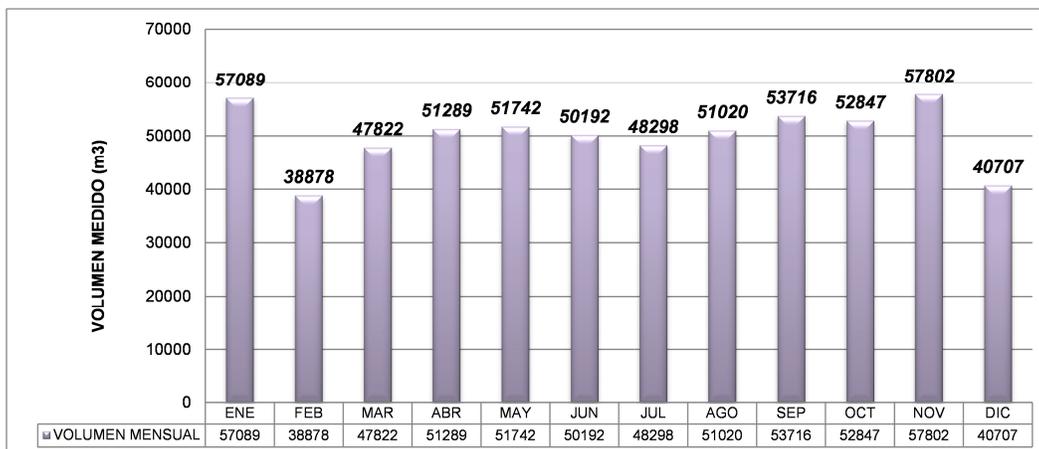


Figura 4.4.7. Volumen de consumo medido mensualmente – zona sur Oruro – Gestión 2012

Como puede observarse, en el mes de noviembre el volumen medido fue el mayor del año 2012 (57802 m³); por esta razón, deben recabarse información detallada de este mes, como por ejemplo volúmenes de producción registrados cada hora, niveles en el deposito Agua de Castilla y otra que resulte relevante.

4.4.8. REPARTO DEL VOLUMEN NO FACTURADO POR SECTORES EN EL MES MÁS DESFAVORABLE

El volumen de ingreso al sistema en el mes de noviembre fue de 97895.6 m³/mes, este valor debe ser repartido a cada uno de los sectores estudiados en base a su consumo medido en ese mes (clientes con contador y clientes sin contador), de esta forma se logrará distribuir el volumen no facturado; como resultado de este paso, se tendrá que el volumen de ingreso total será igual al volumen consumido total.

Tabla 4.4.10. Cálculo del volumen de entrada a cada sector – noviembre de 2012

CIRCUITO	CLIENTES CON CONTADOR	CLIENTES SIN CONTADOR	VOLUMEN DE CONSUMO FACTURADO MEDIDO (m ³ /mes)	VOLUMEN POR CLIENTE MENSUAL (m ³ /mes/conex.)	VOLUMEN DE CONSUMO FACTURADO NO MEDIDO (m ³ /mes)	VOLUMEN TOTAL FACTURADO NOVIEMBRE (m ³ /mes)	PORCENTAJE DEL VOLUMEN FACTURADO	VOLUMEN DE ENTRADA AL SECTOR EN NOVIEMBRE (m ³ /mes)
S01-05	121	26	1655.00	13.68	355.62	2010.62	2.39%	2279.60
S01-06	295	172	3852.00	13.06	2245.91	6097.91	7.25%	6913.70
S01-07	385	208	5890.00	15.30	3182.13	9072.13	10.79%	10285.81
S01-08	322	115	3550.00	11.02	1267.86	4817.86	5.73%	5462.40
S01-10	179	206	1718.00	9.60	1977.14	3695.14	4.39%	4189.48
S01-11	150	94	1791.00	11.94	1122.36	2913.36	3.46%	3303.11
S01-09	307	208	3092.00	10.07	2094.91	5186.91	6.17%	5880.82
S01-13	804	261	6818.00	8.48	2213.31	9031.31	10.74%	10239.53
S01-14	177	99	1556.00	8.79	870.31	2426.31	2.88%	2750.90
S01-15	206	5	2313.00	11.23	56.14	2369.14	2.82%	2686.09
S01-16	565	353	3004.00	5.32	1876.84	4880.84	5.80%	5533.80
S02	536	39	7224.00	13.48	525.63	7749.63	9.21%	8786.38
M02	151	86	2397.00	15.87	1365.18	3762.18	4.47%	4265.49
S01-12	898	187	12942.00	14.41	2695.05	15637.05	18.59%	17728.99
S01-18	385	0	0.00	11.59	4461.82	4461.82	5.30%	5058.73
TOTAL			57802.00		26310.19	84112.19		95364.82

4.4.9. CAUDAL MEDIO DEL PERIODO DE SUMINISTRO POR SECTOR

Se calcula el caudal medio por periodo por cada sector utilizando las horas de suministro, como se indica en anteriores acápite, este caudal medio representa al volumen total consumido en una cantidad de horas determinadas.

Tabla 4.4.11. Caudal medio por periodo de suministro por sector – noviembre de 2012

SECTOR	HORAS DE SUMINISTRO	VOLUMEN DE ENTRADA AL SECTOR EN NOVIEMBRE (m ³ /mes)	VOLUMEN DE ENTRADA AL SECTOR EN NOVIEMBRE (m ³ /día)	VOLUMEN POR HORA (m ³ /hr)	CAUDAL MEDIO DEL PERIODO (l/s)	CAUDAL MEDIO DIARIO (l/s)
S01-05	5	2279.60	75.99	15.20	4.22	0.81
S01-06	5	6913.70	230.46	46.09	12.80	2.77
S01-07	5	10285.81	342.86	68.57	19.05	3.99
S01-08	5	5462.40	182.08	36.42	10.12	1.99
S01-10	5	4189.48	139.65	27.93	7.76	1.78
S01-11	5	3303.11	110.10	22.02	6.12	1.30
S01-09	8	5880.82	196.03	24.50	6.81	2.20
S01-13	8	10239.53	341.32	42.66	11.85	3.86
S01-14	8	2750.90	91.70	11.46	3.18	1.03
S01-15	8	2686.09	89.54	11.19	3.11	1.01
S01-16	11	5533.80	184.46	16.77	4.66	2.09
S02	12	8786.38	292.88	24.41	6.78	1.89
M02	14	4265.49	142.18	10.16	2.82	1.92
S01-12	5	17728.99	590.97	118.19	32.83	6.28
S01-18	4	5058.73	168.62	42.16	11.71	1.89
TOTAL		95364.82	3178.83	517.73		

El caudal medio diario calculado en el periodo de un año, puede ser comparado con el caudal medio del periodo, de esta forma se puede conocer el factor punta del sistema de suministro intermitente.

4.4.10. HORARIOS DE SUMINISTRO

La información relacionada con los horarios de distribución es muy importante, ésta permitirá calcular los caudales por hora demandados por la población, es decir, en base a esta información se podrá elaborar la curva de consumo de la red. Se realiza este cálculo debido a que no se cuenta con contador o caudalímetro al ingreso ni a la salida del depósito Agua de Castilla.

Tabla 4.4.12. Horarios de distribución de los sectores alimentados por el depósito Agua de Castilla

Nº	CIRCUITO	HORARIO ACTUAL	HORAS DE DISTRIBUCIÓN																									
			0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	
1	S01-05	De 4:00 a 9:00																										
2	S01-06	De 4:00 a 9:00																										
3	S01-07	De 4:00 a 9:00																										
4	S01-08	De 4:00 a 9:00																										
5	S01-10	De 4:00 a 9:00																										
6	S01-11	De 4:00 a 9:00																										
7	S01-09	De 23:00 a 7:00																										
8	S01-13	De 23:00 a 7:00																										
9	S01-14	De 23:00 a 7:00																										
10	S01-15	De 23:00 a 7:00																										
11	S01-16	De 20:00 a 7:00																										
12	S02	De 21:00 a 9:00																										
13	M02	De 20:00 a 10:00																										
14	S01-12	De 4:00 a 9:00																										
15	S01-18	De 20:00 a 0:00																										

FUENTE: SeLA - URURO

Los horarios de distribución de 14 de los 15 sectores coinciden en horarios de la mañana, lo cual es desventajoso para un funcionamiento hidráulico del sistema, esta condición exigirá un caudal muy grande y en consecuencia se tendrán bajas presiones en los extremos.

4.4.11. CÁLCULO DE LA CURVA DE SUMINISTRO POR HORAS

Una vez calculados los volúmenes que entran a cada uno de los sectores por hora, se procede a ubicar estos valores en los horarios de suministro correspondientes, sumando los valores calculados para cada hora se conocerá la curva de suministro de la zona sur de la ciudad de Oruro.

Tabla 4.4.13. Cálculo del caudal de suministro por horas

HORA	VOLUMEN POR HORAS DE CADA SECTOR															TOTAL VOLUMEN DE ENTRADA AL SISTEMA (m ³ /hr)	CAUDAL (l/s)	COEFICIENTE DE MODULACIÓN
	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	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	42.16	183.31	50.92	1.46
1:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	0.00	141.15	39.21	1.13
2:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	0.00	141.15	39.21	1.13
3:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	0.00	141.15	39.21	1.13
4:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.50	42.66	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	0.00	141.15	39.21	1.13
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	0.00	475.57	132.10	3.79
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	0.00	475.57	132.10	3.79
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	0.00	475.57	132.10	3.79
8:00	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.41	10.16	118.19	0.00	368.98	102.50	2.94
9:00	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.41	10.16	118.19	0.00	368.98	102.50	2.94
10:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.16	0.00	0.00	10.16	2.82	0.08
11:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

19:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.77	0.00	10.16	0.00	42.16	69.08	19.19	0.55
22:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.77	24.41	10.16	0.00	42.16	93.49	25.97	0.75
23:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.77	24.41	10.16	0.00	42.16	93.49	25.97	0.75
TOTAL	75.99	230.46	342.86	182.08	139.65	110.10	196.03	341.32	91.70	89.54	184.46	292.88	142.18	590.97	168.62	3178.83		

Graficando los valores de caudal para cada hora se obtiene la curva de consumo o de suministro de la población:

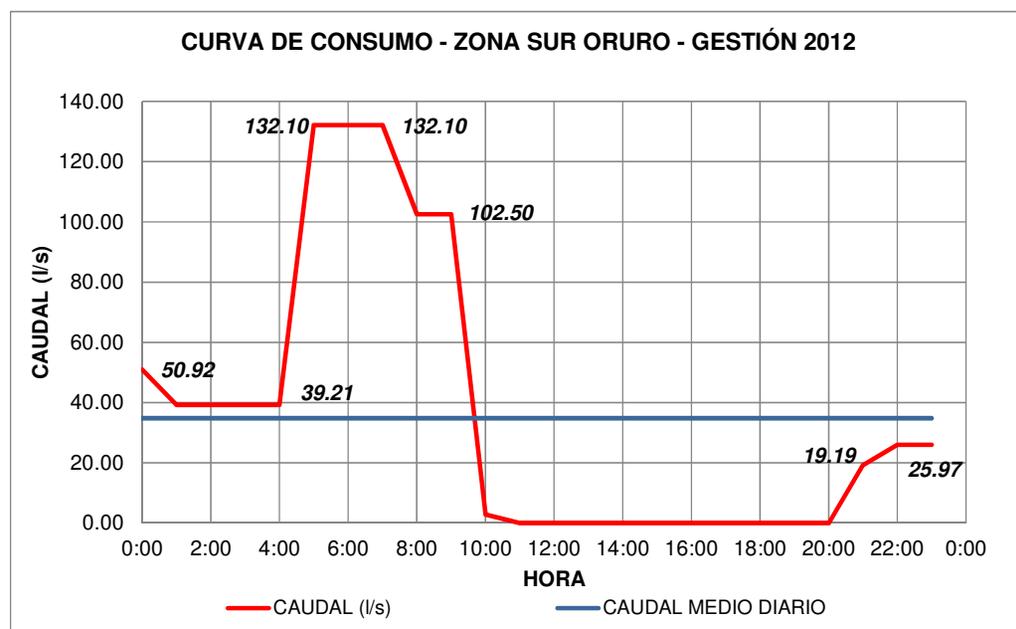


Figura 4.4.8. Curva de suministro – zona sud de Oruro – Gestión 2012

En el gráfico se observa que el caudal máximo alcanza a 132.10 l/s, la concentración en el suministro de 14 sectores en horarios de la mañana hace que se forme un pico entre las 5:00 y 6:00 a.m., debe tenerse en cuenta que caudales grandes generan presiones pequeñas en los extremos, en caso de poder disminuirse este caudal las presiones tenderían a subir.

En base a estos caudales se calculará la curva de modulación de salida del depósito Agua de Castilla.

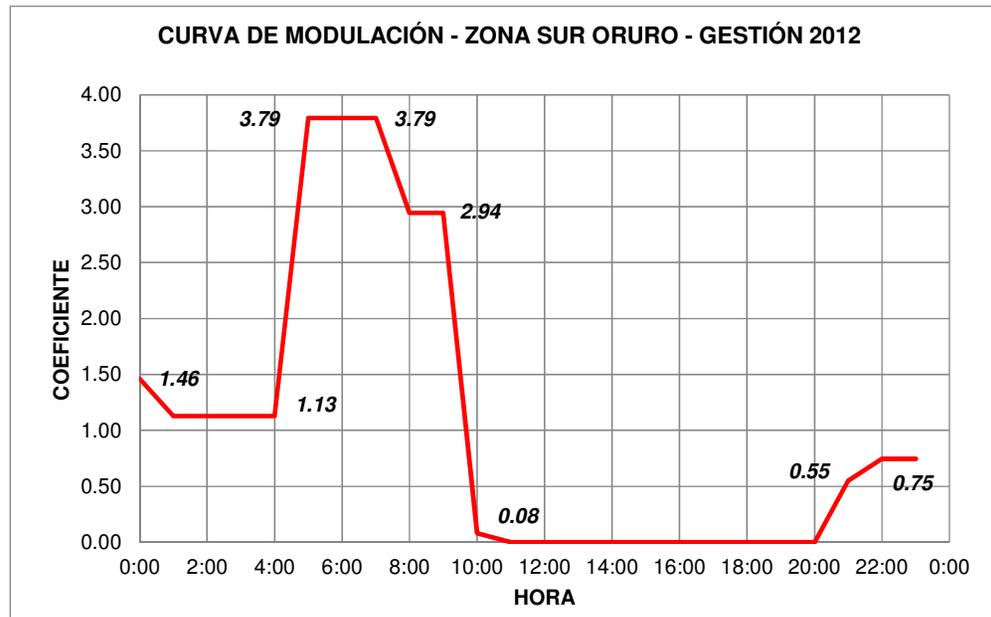


Figura 4.4.9. Curva de modulación - zona sud de Oruro - Gestión 2012

4.4.12. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN – VOLUMEN DE ENTRADA AL SISTEMA EN FORMA DIARIA

Debido a que se estableció al mes de noviembre como el más desfavorable, se recolectó la información más detallada de este mes, para este objeto se recurrieron a datos de la División de Producción de SeLA.

4.4.12.1. Volumen horario bombeado medido en la planta JKW

Teniendo los datos horarios de cada uno de los días del mes de noviembre, se promediaron estos valores para establecer un valor representativo de la variación diaria del volumen bombeado desde la Planta JKW; en este caso, también se aplicará el porcentaje de pérdidas asumido en acápite anteriores (10.43%) para realizar el cálculo del volumen que ingresan al sistema:

Tabla 4.4.14. Volumen promedio de bombeo B-4, medido por horas

HORA	VOLUMEN PROMEDIO BOMBEADO DE JKW (m ³ /hr)	VOLUMEN BOMBEADO* (1-%Perd.) (m ³ /hr)	CAUDAL MEDIO (l/s)
0:00	234.72	210.24	58.40
1:00	285.84	256.03	71.12
2:00	253.44	227.01	63.06
3:00	214.44	192.08	53.36
4:00	206.88	185.31	51.47
5:00	236.04	211.43	58.73
6:00	204.48	183.16	50.88
7:00	14.64	13.11	3.64
8:00	0.00	0.00	0.00
9:00	0.00	0.00	0.00
10:00	0.00	0.00	0.00
11:00	0.00	0.00	0.00
12:00	0.00	0.00	0.00
13:00	0.00	0.00	0.00
14:00	0.00	0.00	0.00
15:00	118.32	105.98	29.44
16:00	242.16	216.91	60.25
17:00	250.08	224.00	62.22
18:00	268.68	240.66	66.85
19:00	317.28	284.19	78.94
20:00	358.92	321.49	89.30
21:00	362.04	324.29	90.08
22:00	327.00	292.90	81.36
23:00	216.00	193.48	53.74
TOTAL:	4110.95	3682.28	

4.4.12.2. Volumen que ingresa al depósito Santa Bárbara I

Como se conoce el volumen que ingresa al tanque Santa Bárbara I (15103.2 m³/mes y 503.44 m³/día), este valor se dividirá entre las cinco horas de apertura de válvulas para el llenado de este tanque. El volumen por hora es 100.69 m³/hr.

4.4.12.3. Cálculo del volumen que ingresa al depósito Agua de Castilla

Para calcular el volumen diario que ingresa al tanque Agua de Castilla en el mes de noviembre se utilizó el volumen por horas que alimenta al depósito Santa Bárbara I (14:00 a 19:00), este volumen fue restado a los volúmenes por hora bombeados medidos en la Planta JKW.

Tabla 4.4.15. Volumen por horas de ingreso a cada tanque (Agua de Castilla y Santa Bárbara I)

HORA	VOLUMEN BOMBEADO* (1-%Perd.) (m ³ /hr)	VOLUMEN AL DEPÓSITO SANTA BARBARA I (m ³ /hr)	VOLUMEN DE ENTRADA AL SISTEMA (m ³ /hr)
0:00	210.24	0	210.24
1:00	256.03	0	256.03
2:00	227.01	0	227.01
3:00	192.08	0	192.08
4:00	185.31	0	185.31
5:00	211.43	0	211.43
6:00	183.16	0	183.16
7:00	13.11	0	13.11
8:00	0	0	0.00
9:00	0	0	0.00
10:00	0	0	0.00
11:00	0	0	0.00
12:00	0	0	0.00
13:00	0	0	0.00
14:00	0	0	0.00
15:00	105.98	100.69	5.29
16:00	216.91	100.69	116.22
17:00	224.00	100.69	123.31
18:00	240.66	100.69	139.97
19:00	284.19	100.69	183.51
20:00	321.49	0	321.49
21:00	324.29	0	324.29
22:00	292.90	0	292.90
23:00	193.48	0	193.48
TOTAL:	3682.28	503.44	3178.84

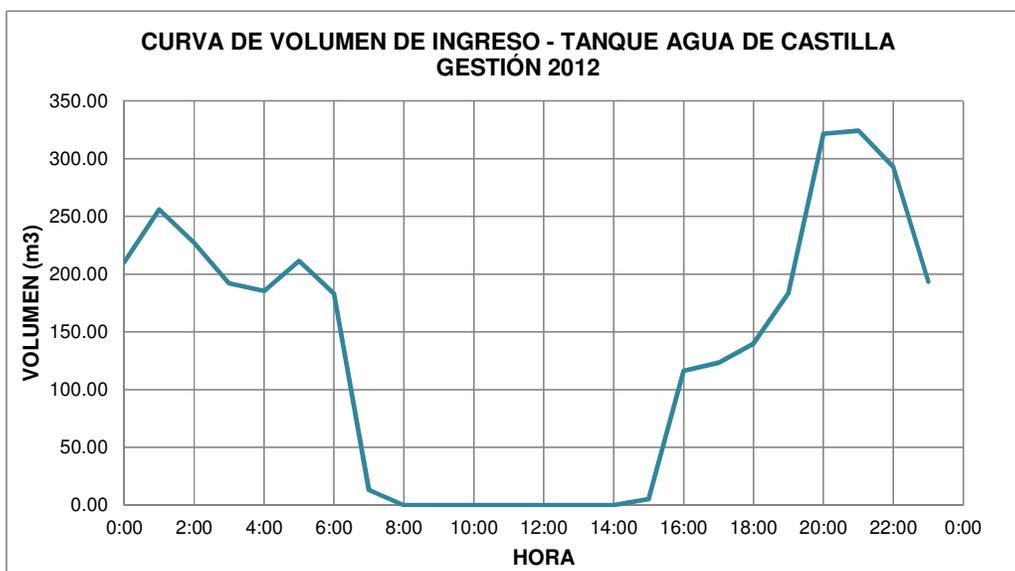


Figura 4.4.10. Curva de volumen de entrada al sistema – zona sur de Oruro – Gestión 2012

4.5. VOLUMEN DE REGULACIÓN TANQUE AGUA DE CASTILLA

En base a la variación horaria de caudales de ingreso y la curva de demanda o suministro de la población, se calcula el volumen de regulación del tanque Agua de Castilla:

Tabla 4.5.1. Cálculo del volumen de regulación tanque Agua de Castilla

HORA	VOLUMEN DE OFERTA (m3)	VOLUMEN DE DEMANDA (m3)	BALANCE INICIAL (m3)	BALANCE FINAL (m3)	VOLUMEN DE DEMANDA ACUMULADO (m3)	VOLUMEN DE OFERTA ACUMULADO (m3)
			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	1767.15	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 distribución.

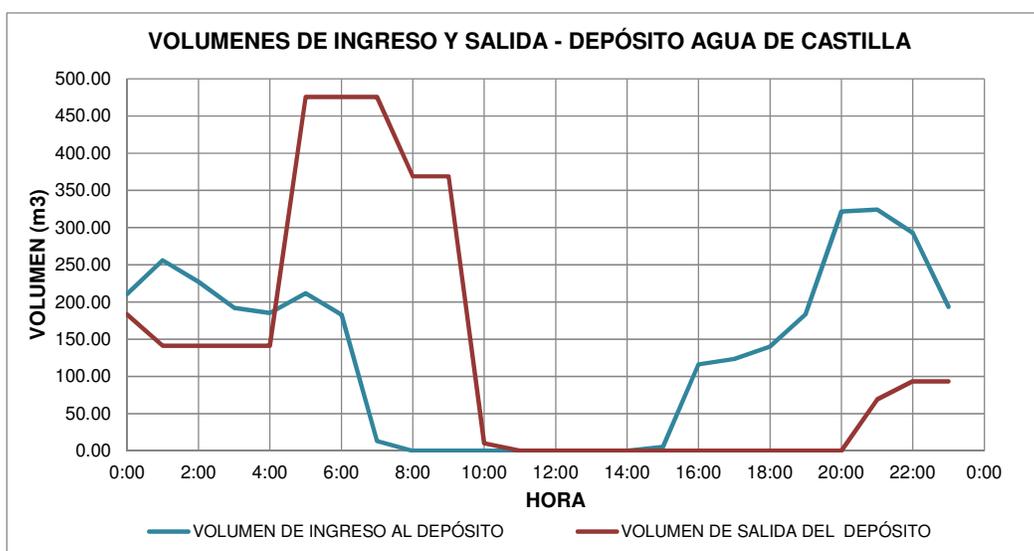


Figura 4.5.1. Volúmenes de ingreso y salida – Depósito agua de Castilla

Acumulando los volúmenes y posteriormente realizando el balance en el depósito es posible calcular el volumen de regulación:

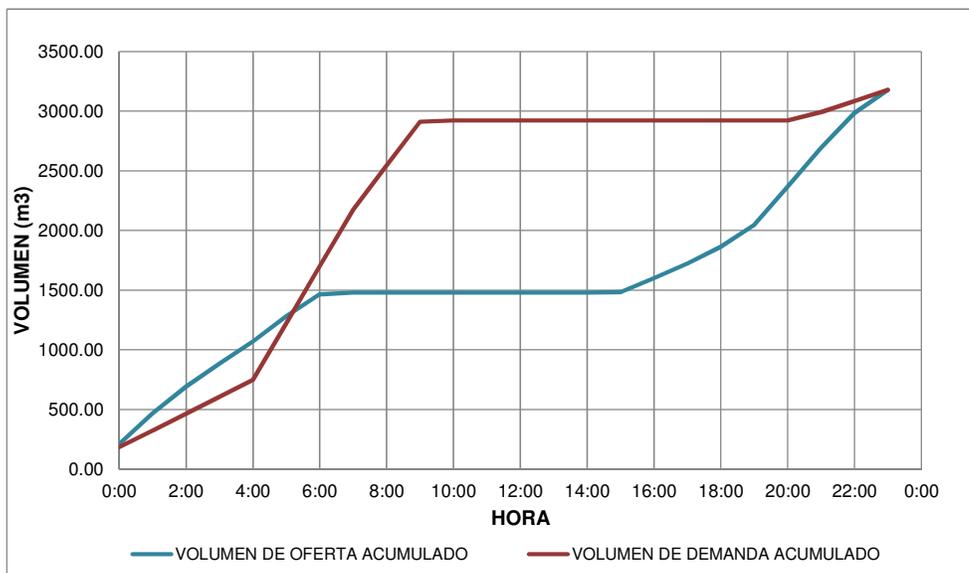


Figura 4.5.2. Volúmenes acumulados de ingreso y salida – Depósito agua de Castilla

El volumen de regulación del depósito Agua de Castilla es 1767.15 m³, cercanos a los 1800 m³ disponibles en el tanque, de seguir un crecimiento del sistema incrementando caudales con estos horarios el volumen del tanque será insuficiente.

4.5.1. AJUSTE DEL MODELO CON NIVELES DEL DEPÓSITO AGUA DE CASTILLA

Debido a que no existen caudalímetros ni contadores en el depósito Agua de Castilla, ni de ingreso ni de salida, solamente se realiza la medición de niveles por horas, por lo que esta información será utilizada para validar los cálculos realizados en el presente estudio.

El tanque agua de castilla es cilíndrico, tiene un diámetro en la base de 15 m y una altura útil de 10 m.

La altura del tanque es calculada con la siguiente relación:

$$h = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Ecuación 4.5.1}$$

Donde:

h = Altura calculada en el tanque (m)

V = Volumen de agua existente en el tanque (m³)

D = Diámetro de la base del tanque circular = 15 m

Tabla 4.5.2. Cálculo de la altura teórica en el tanque Agua de Castilla

HORA	NIVEL MEDIDO (m)	BLANCE DE VOLÚMENES (m ³)	ALTURA TANQUE TEÓRICA (m)	$(h_m-h_c)^2$
0:00	8.2	1471.33	8.3	0.0159
1:00	8.5	1586.21	9.0	0.2267
2:00	8.7	1672.07	9.5	0.5806
3:00	9.1	1723.00	9.8	0.4227
4:00	9.2	1767.15	10.0	0.6400
5:00	8.2	1503.00	8.5	0.0932
6:00	7.2	1210.58	6.9	0.1221
7:00	6.0	748.12	4.2	3.1205
8:00	5.3	379.14	2.1	9.9509
9:00	4.0	10.16	0.1	15.5435
10:00	2.3	0.00	0.0	5.2900
11:00	0.0	0.00	0.0	0.0000
12:00	0.0	0.00	0.0	0.0000
13:00	0.0	0.00	0.0	0.0000
14:00	0.0	0.00	0.0	0.0000
15:00	1.0	5.29	0.0	0.9410
16:00	2.0	121.51	0.7	1.7223
17:00	3.1	244.83	1.4	2.9397
18:00	3.8	384.80	2.2	2.6324
19:00	6.0	568.31	3.2	7.7508
20:00	7.6	889.80	5.0	6.5779
21:00	7.6	1145.01	6.5	1.2557
22:00	7.8	1344.42	7.6	0.0369
23:00	9.1	1444.41	8.2	0.8581
Error cuadrático medio				0.5377

Los valores de la altura fueron calculados utilizando el volumen existente en el depósito, este valor a su vez fue determinado en base al balance de volúmenes de ingreso y salida del tanque que toman en cuenta el porcentaje de pérdidas adoptado en la tubería de ingreso al depósito. En esta etapa, para el cálculo de la altura de agua, se ajusta este porcentaje; cuando se tienen grandes niveles de pérdidas en la tubería de ingreso la altura máxima es pequeña y cuando las pérdidas son menores la altura en el depósito supera los 10 m, altura máxima útil en el tanque. Por esta razón, la función objetivo busca minimizar el error cuadrático medio entre las alturas calculadas y las alturas medidas, la restricción es no superar la altura máxima de 10 m y la variable a calcular es solamente el porcentaje de pérdidas en la tubería de ingreso. El ajuste fue realizado con el algoritmo evolutivo que utiliza del Solver de Excel.

$$D_i = h_{m-i} - h_{c-i} \quad \text{Ecuación 4.5.2}$$

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n \cdot (n-1)}} \quad \text{Ecuación 4.5.3}$$

De esta forma, con 10.43% de pérdidas en la tubería de ingreso al depósito Agua de Castilla, la relación de las alturas medidas y las alturas calculadas, es la siguiente:

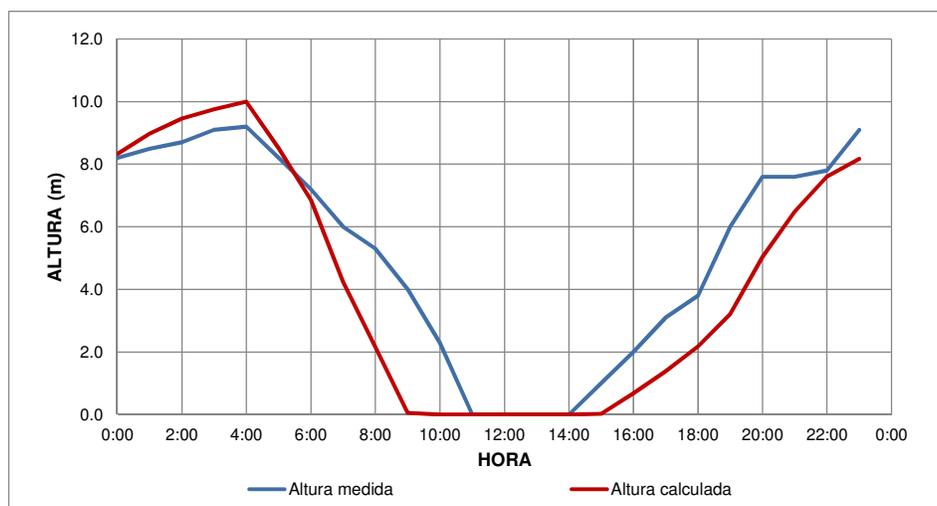


Figura 4.5.3. Altura de agua medida y calculada en el tanque Agua de Castilla

4.6. ESCENARIO PROPUESTO

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 tenga menor cantidad sectores que trabajen en las mismas horas, así se logrará reducir el caudal máximo en consecuencia las presiones y el servicio mejorarán.

Los criterios que permiten la modificación del horario de suministro de cada sector deben estar definidos en esta etapa, de esta forma se establecerán pesos para los términos de una función objetivo que será resuelta con programación lineal, logrando de esta forma la optimización de los horarios de suministro.

4.6.1. ELECCIÓN DE CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DEL SECTOR QUE MODIFICARÁ SU HORARIO

Los criterios utilizados para la determinación de pesos que definan la función objetivo de la optimización son los siguientes:

- **Presión de servicio:** criterio importante en la selección del sector que debe modificar su horario, se considera que los sectores que tienen menor presión de servicio son aquellos que pueden cambiar de horario, se entiende que los abonados que tienen menor presión aceptarán las medidas que mejore las condiciones del servicio.
- **Número de clientes:** este elemento es importante, mientras más abonados tenga el sector menor será la posibilidad de modificación de horario, en el entendido de que se quiere mejorar la situación afectando las condiciones actuales de la menor cantidad posible de gente.
- **Horas de suministro:** tendrán mayor flexibilidad para el movimiento aquellos sectores que tengan menos cantidad de horas de suministro.
- **Facilidad en la operación del sector:** criterio relacionado con la posibilidad de aislar el sector para el suministro intermitente, este criterio se convierte en cualitativo por las características del sistema de suministro, existen válvulas las cuales no trabajan o tienen problemas, dificultades para los operadores (debido a que el trabajo es manual), posibles problemas con los vecinos del sector y otros aspectos que no pueden ser cuantificables; por lo que se consultará a tres expertos técnicos de SeLA para establecer los pesos correspondientes.

4.6.2. CUANTIFICACIÓN DE LOS FACTORES QUE INCIDEN EN LA SELECCIÓN DEL SECTOR PARA SU CAMBIO DE HORARIO

En base a las mediciones y datos, se realizara la ponderación de las variables de cada uno de los criterios:

4.6.2.1. Criterio 1: Presión de servicio.

Tabla 4.6.1. Normalización Criterio 1: Presión de servicio.

Sector	vp_i	p'_i	p_i
	PRESIÓN DE SERVICIO (MCA)	TRANSFORMACIÓN A VARIABLE DIRECTA POR LA DIFERENCIA	NORMALIZACIÓN
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
Total:		332.80	1.000

4.6.2.2. Criterio 2: Número de clientes.

Tabla 4.6.2. Normalización Criterio 2: Número de clientes.

SECTOR	nc_i	I'_i	I_i
	NÚMERO TOTAL DE CLIENTES	TRANSFORMACIÓN A VARIABLE DIRECTA POR LA INVERSA	NORMALIZACIÓN
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
Total:		0.0414	1.000

4.6.2.3. Criterio 3: horas de suministro.

Tabla 4.6.3. Normalización Criterio 3: horas de suministro.

SECTOR	nh_i	r'_i	r_i
	HORAS DE SUMINISTRO	TRANSFORMACIÓN A VARIABLE DIRECTA POR LA INVERSA	NORMALIZACIÓN
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
Total:		2.40	1.000

4.6.2.4. Criterio 4: Facilidad en la operación del sector.

Para el cálculo de este criterio, se utilizará el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), de esta forma se obtendrá 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 pareada calculando el vector propio de cada opinión, 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.

Tabla 4.6.4. Matriz pareada del criterio del Criterio 4: 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 debe ser inferior a 10%

Los vectores propios de cada uno de los expertos son:

Tabla 4.6.5. Vector propio de cada experto y ponderación de cada sector Criterio 4

SECTOR	EXPERTO 1	EXPERTO 2	EXPERTO 3	MEDIA GEOMÉTRICA	e _i 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
Total:	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

4.6.3. PONDERACIÓN DE CRITERIOS

El peso de cada uno de los criterios será calculado también utilizando la metodología AHP, posteriormente este peso será multiplicado por cada uno de los valores ya calculados.

Experto 1:

Tabla 4.6.6. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 1

	Presión	Clientes	Horas	Operación	Vector propio
Presión	1	1	1	1/3	0.1581
Clientes	1	1	1	1/3	0.1581
Horas	1	1	1	1/5	0.1401
Operación	3	3	5	1	0.5437
CR	1.2%				

Experto 2:

Tabla 4.6.7. Matriz pareada de ponderación de criterios, Experto 2

	Presión	Clientes	Horas	Operación	Vector propio
Presión	1	1	3	1/3	0.2098
Clientes	1	1	1	1/3	0.1579
Horas	1/3	1	1	1/5	0.1069
Operación	3	3	5	1	0.5255
CR	4.4%				

Experto 3:

Tabla 4.6.8. 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, posteriormente se normaliza y este valor es multiplicado por el total de sectores, con el fin de incrementar el peso de los criterios en la función objetivo.

Tabla 4.6.9. 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

4.6.4. CÁLCULO DE LOS FACTORES POR CRITERIO PARA LA OPTIMIZACIÓN.

Se multiplica el peso de cada criterio por cada una de las variables, de esta forma se obtienen los factores de cada criterio para cada sector.

Tabla 4.6.10. Factores o pesos de cada uno de los sectores según cada criterio

SECTOR	CRITERIO 1 Wp	CRITERIO 2 Wc	CRITERIO 3 Wh	CRITERIO 4 Wo
	PRESIÓN DE SERVICIO (mca)	NÚMERO TOTAL DE CLIENTES	HORAS DE SUMINISTRO	FACILIDAD EN EL AISLAMIENTO DEL SECTOR
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
Total	2.676	2.520	1.565	8.238

4.6.5. ELECCIÓN DEL SECTOR QUE MODIFICARÁ SU HORARIO.

Para una mejor comprensión del procedimiento, se describirá el cálculo del escenario 2 (volumen de restricción de salida del depósito = 350 m³), de esta forma se tendrá una idea general de los pasos seguidos en los otros escenarios.

El proceso de optimización para la elección de los horarios de suministro óptimos cuenta con 360 variables y 414 restricciones, calculados en base a los 15 sectores desglosados en 24 horas.

Se parte de la matriz de variables $V \text{ m} \times \text{n}$, que es resultado del proceso de programación lineal con variables binarias; esta matriz solamente muestra la hora de inicio del suministro de agua en cada sector indicando con 1, cuando no es el mejor horario corresponde 0.

Tabla 4.6.11. Matriz de variables V.

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	0	0	0	0	0	0
Σv	1														

El resultado debe verificar que se cumplan las restricciones del problema:

$$\sum_{m=1}^m v_{m1} = 1; \sum_{m=1}^m v_{m2} = 1; \dots; \sum_{m=1}^m v_{mn} = 1$$

Para facilitar la creación de los periodos de suministro, se definen las matrices cuadradas U para cada uno de los sectores, en este caso se calculará para el sector S01-05, que tiene 5 horas de suministro en 24 horas. Esta matriz se multiplicará por la primera fila de la matriz V dando como resultado un vector X que representa el horario de suministro del sector:

Tabla 4.6.12. 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 ₁
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	0	1	1	1	1	1
21	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
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	1
23	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
24	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

$$X_1 = \left(\sum_{m=1}^m v_{m1} \cdot u_{m1}^{(1)}, \sum_{m=1}^m v_{m1} \cdot u_{m2}^{(1)}, \dots, \sum_{m=1}^m v_{m1} \cdot u_{mp}^{(1)} \right) = (x_{11}, x_{21}, \dots, x_{m1})$$

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 serán utilizados como base de la función objetivo:

Tabla 4.6.13. Vector X de cada sector.

HORA	X1 S01-05	X2 S01-06	X3 S01-07	X4 S01-08	X5 S01-10	X6 S01-11	X7 S01-09	X8 S01-13	X9 S01-14	X10 S01-15	X11 S01-16	X12 S02	X13 M02	X14 S01-12	X15 S01-18	TOTAL
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
22	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	6
23	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	6
24	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
Total	5	5	5	5	5	5	8	8	8	8	11	12	14	5	4	

Debe cumplirse la restricción del número máximo de sectores trabajando en simultáneo, en este caso SS=15.

$$\sum_{n=1}^n x_{1n} \leq SS ; \sum_{n=1}^n x_{2n} \leq SS ; \dots ; \sum_{n=1}^n x_{mn} \leq SS$$

Se calcula el volumen por hora de cada sector (V_{s_n}):

Tabla 4.6.14. Volumen por hora que ingresa a cada sector.

SECTOR	VOLUMEN DIARIO QUE INGRESA AL SECTOR (m ³ /día)	HORAS DE SUMINISTRO	V _s VOLUMEN POR HORA QUE INGRESA AL SECTOR (m ³ /hr)
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 Vs por cada uno de los vectores columna X se obtiene el volumen de cada sector ubicado en un horario de suministro correspondiente:

Tabla 4.6.15. Vector M de cada sector.

HORA	VOLUMEN POR HORAS DE CADA SECTOR															TOTAL VOLUMEN DE ENTRADA AL SISTEMA (m ³ /hr)
	M ₁ S01-05	M ₂ S01-06	M ₃ S01-07	M ₄ S01-08	M ₅ S01-10	M ₆ S01-11	M ₇ S01-09	M ₈ S01-13	M ₉ S01-14	M ₁₀ S01-15	M ₁₁ S01-16	M ₁₂ S02	M ₁₃ M02	M ₁₄ S01-12	M ₁₅ S01-18	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	118.19	0.00	259.35
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	0.00	141.16
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	0.00	141.16
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	0.00	141.16
5	15.20	46.09	0.00	36.42	27.93	22.02	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	0.00	288.81
6	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	24.50	0.00	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	0.00	314.72
7	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	24.50	0.00	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	0.00	0.00	314.72
8	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.41	10.16	0.00	0.00	250.79
9	15.20	46.09	68.57	36.42	27.93	22.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.41	10.16	0.00	0.00	250.79
10	0.00	0.00	68.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.16	0.00	0.00	78.73
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.77	0.00	10.16	118.19	42.16	187.27
22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	42.67	0.00	0.00	16.77	24.41	10.16	118.19	42.16	254.35
23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	42.67	0.00	0.00	16.77	24.41	10.16	118.19	42.16	254.35
24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.50	42.67	11.46	11.19	16.77	24.41	10.16	118.19	42.16	301.50
Total:	75.99	230.46	342.86	182.08	139.65	110.1	196.03	341.32	91.7	89.54	184.46	292.88	142.18	590.97	168.62	3178.84

Otra de las restricciones está relacionada con el volumen máximo de salida del depósito de almacenamiento, que será igual a la suma de los volúmenes de ingreso a los sectores en cada hora, en este escenario VS=350 m3/hr. Esta es una de las restricciones más importante en el modelo.

$$\sum_{n=1}^n m_{1n} \leq VS ; \sum_{n=1}^n m_{2n} \leq VS ; \dots ; \sum_{n=1}^n m_{mn} \leq VS$$

En base al horario de suministro actual de cada uno de los sectores, se definirá la matriz S, donde se representa con 1 la hora con suministro y con 0 la hora sin suministro.

Tabla 4.6.16. Matriz, S, utilizada para priorizar el horario de suministro actual.

HORA	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
	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

Finalmente, con todos los valores calculados, se procede a armar la función objetivo:

Maximizar:

$$\sum_{i=1}^{i=m} \left(\sum_{j=1}^{j=n} wp_i \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^{j=n} wc_i \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^{j=n} wh_i \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^{j=n} wo_i \cdot x_{ij} + \sum_{j=1}^{j=n} s_{ij} \cdot x_{ij} + t_i \cdot \sum_{j=1}^{j=n} x_{ij} + s_{ix} \cdot x_{iy} \right)$$

Resumida en la siguiente tabla:

Tabla 4.6.17. Función objetivo a maximizar

HORA	VOLUMEN DE INGRESO AL DEPÓSITO EN CADA PERIODO (m3/hr)	FUNCIÓN OBJETIVO
1	210.24	23.38
2	256.03	21.28
3	227.01	21.20
4	192.08	21.19
5	185.31	36.98
6	211.43	36.35
7	183.16	35.71
8	13.11	23.09
9	0.00	23.09
10	0.00	4.19
11	0.00	0.00
12	0.00	0.00
13	0.00	0.00
14	0.00	0.00
15	0.00	0.00
16	5.29	0.00
17	116.22	0.00
18	123.31	0.00
19	139.97	0.00
20	183.51	0.00
21	321.49	10.97
22	324.29	15.82
23	292.90	15.63
24	193.48	26.52
FUNCIÓN OBJETIVO, Máx.:		315.40

Como se indicó anteriormente, la restricción más importante está relacionada con el volumen total de salida del depósito Agua de Castilla; cuando este valor disminuye, los horarios de los sectores van reorganizándose para cumplir con todas las restricciones y buscando optimizar el horario de cada uno de ellos. Asimismo, la función objetivo considera los sectores que trabajan en cascada, en el caso del sistema de la zona sur de la ciudad de Oruro, el sector M02 trabaja en cascada con el S01-08.

De esta forma, se adoptaron diferentes valores para la restricción del volumen de salida del depósito y se resumen los resultados de cada uno de los escenarios generados en la siguiente tabla:

Tabla 4.6.18. Escenarios analizados para diferentes volúmenes de salida del depósito.

ESCENARIO	VOLUMEN MÁXIMO DE SALIDA DEL DEPÓSITO, RESTRICCIÓN (m ³)	NÚMERO MÁXIMO DE SECTORES EN SIMULTÁNEO, RESTRICCIÓN	VOLUMEN MÁXIMO DE SALIDA DEL DEPÓSITO CALCULADO (m ³)	CAUDAL MÁXIMO DE SALIDA DEL DEPÓSITO CALCULADO (l/s)	VOLUMEN DEL DEPÓSITO (m ³)	NÚMERO MÁXIMO DE SECTORES QUE TRABAJEN SIMULTÁNEAMENTE	NÚMERO DE SECTORES QUE MODIFICAN SU HORARIO DE SUMINISTRO	DESCRIPCIÓN DE SECTORES QUE MODIFICAN SU HORARIO DE SUMINISTRO
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)

Graficando cada uno de los escenarios, 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.

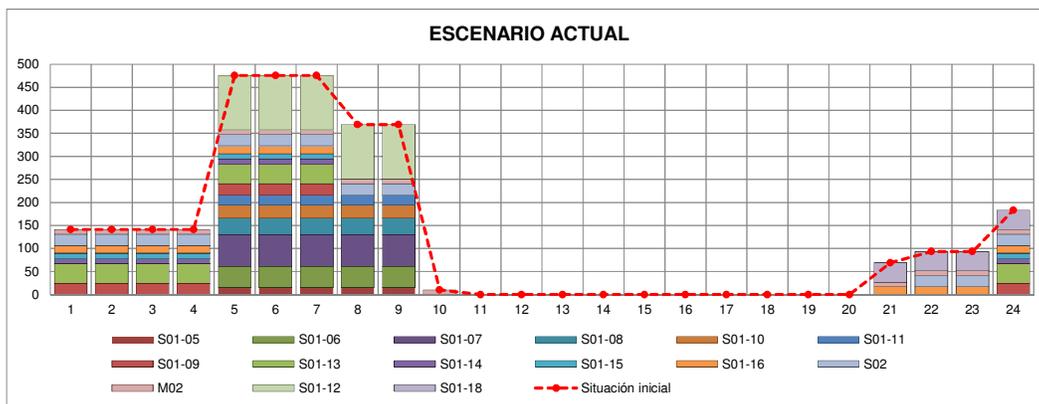


Figura 4.6.1. Escenario actual, $Q_{maxh}=132.10$ l/s

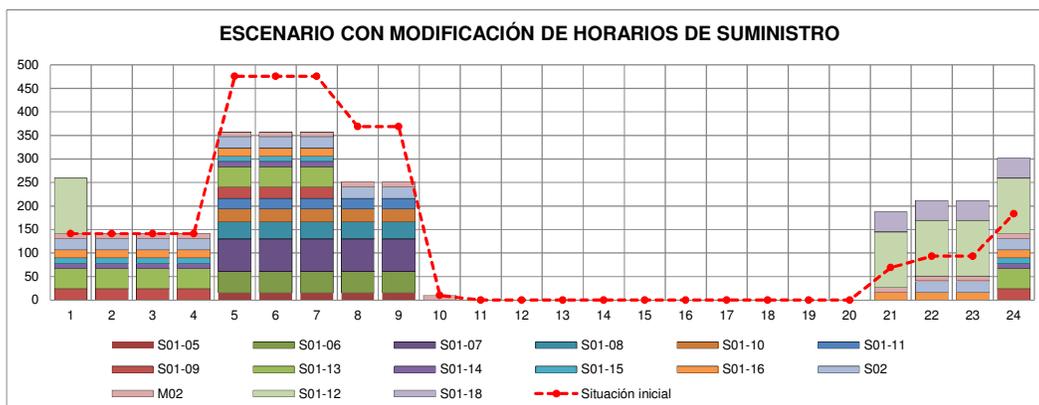


Figura 4.6.2. Escenario 1, $VS=450$ m³/h, $Q_{maxh}= 99.27$ l/s.

En el escenario 1 solamente se modifica el horario de suministro del sector S01-12, lo cual permite reducir el caudal máximo que se produce en la hora pico, reduciendo también el número de sectores que modifican su horario.

Para establecer la influencia de la reducción del caudal punta, se grafican los nuevos horarios, remarcando a los sectores que modifican su periodo de suministro.

Tabla 4.6.19. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 1, $VS=450 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{\text{maxh}}= 99.27 \text{ l/s}$.

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																								

Como es evidente, el nivel del agua en el depósito se modifica, lo cual también modifica la altura piezométrica de salida en la hora pico.

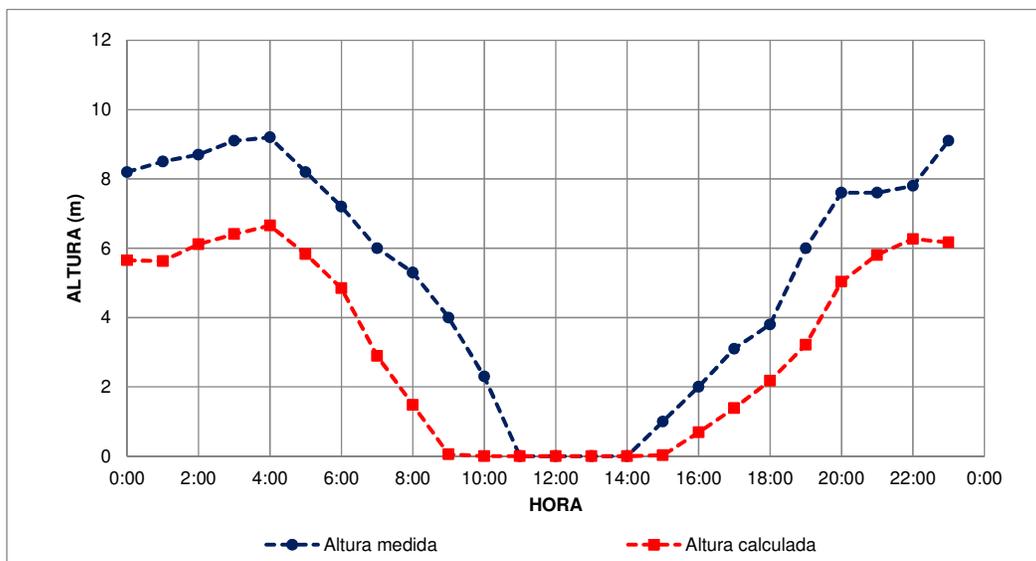


Figura 4.6.3. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 1

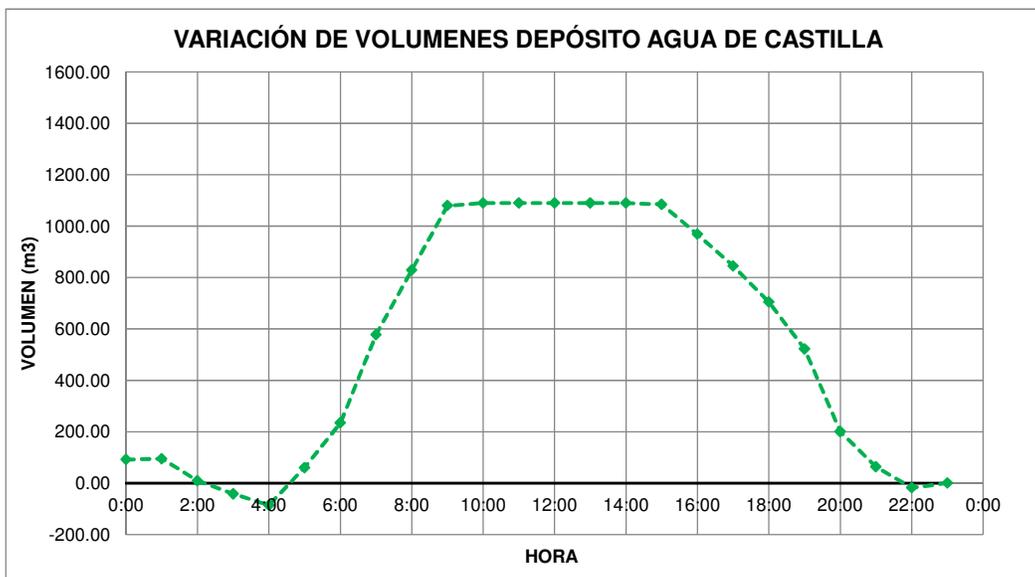


Figura 4.6.4. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 1, $V = 1176.19 \text{ m}^3$

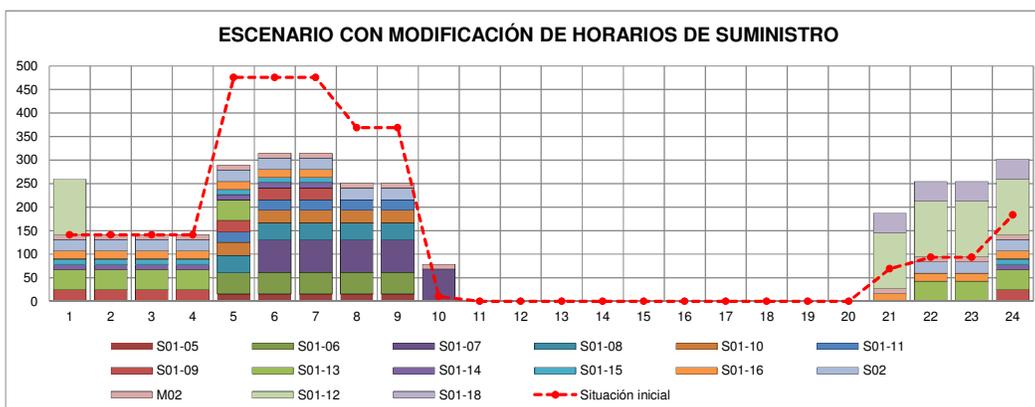


Figura 4.6.5. Escenario 2, $VS=350 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{maxh}=87.42 \text{ l/s}$.

Tabla 4.6.20. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 2, $VS=350 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{maxh}=87.42 \text{ l/s}$.

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																								

A menor valor de la restricción de salida del depósito, es mayor la cantidad de sectores que modifican su horario, esta reacomodación modifica los niveles de agua y el volumen de regulación en el depósito.

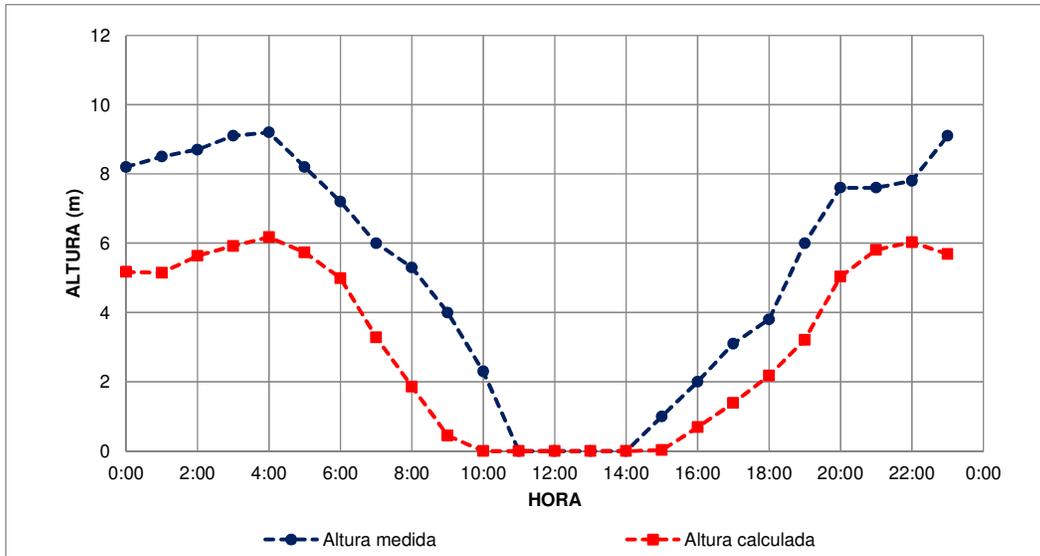


Figura 4.6.6. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 2

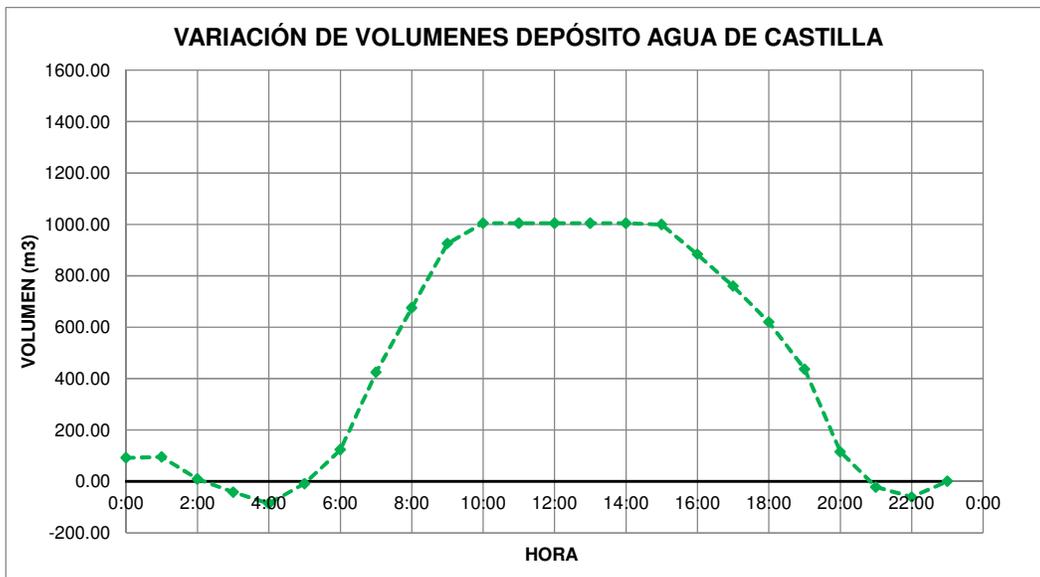


Figura 4.6.7. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 2

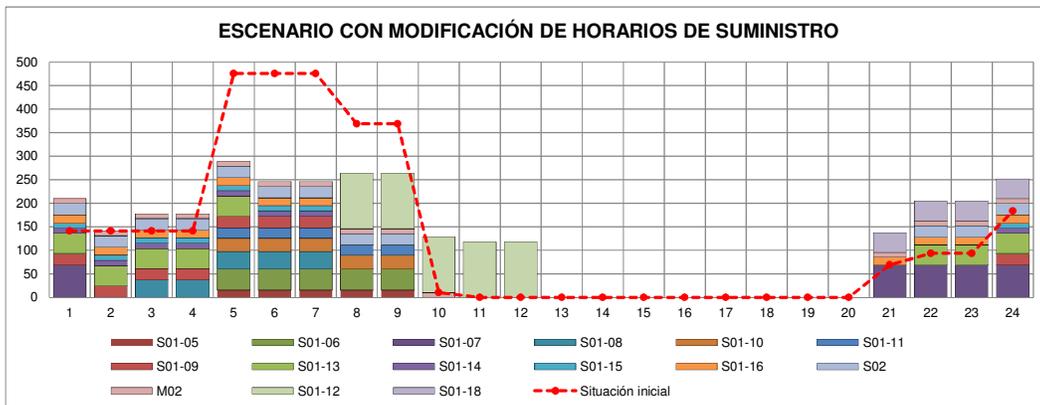


Figura 4.6.8. Escenario 3, $VS=300 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{maxh}=80.23 \text{ l/s}$.

Tabla 4.6.21. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 3, $VS=300 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{maxh}=80.23 \text{ l/s}$.

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																								

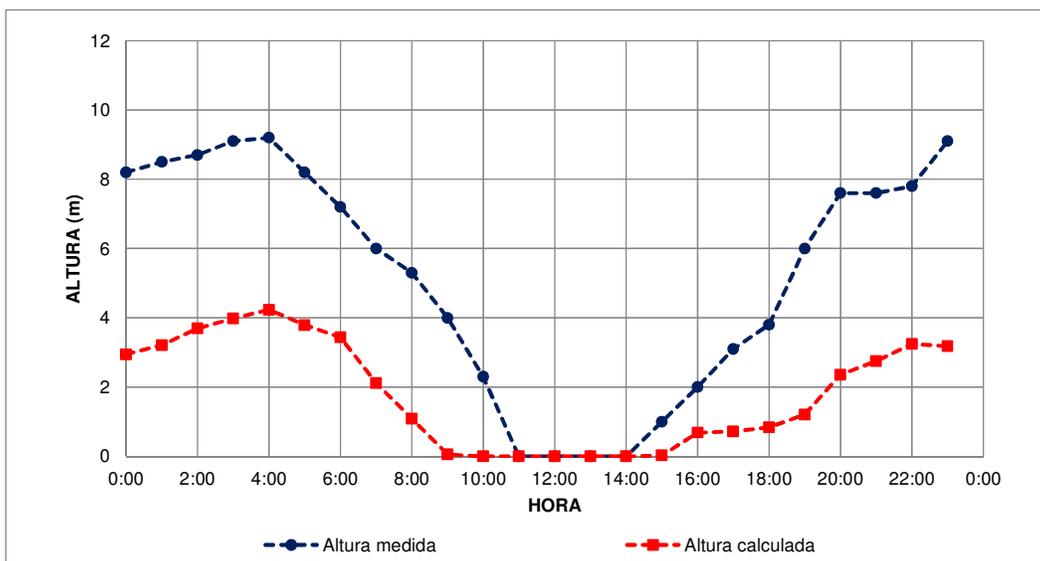


Figura 4.6.9. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 3

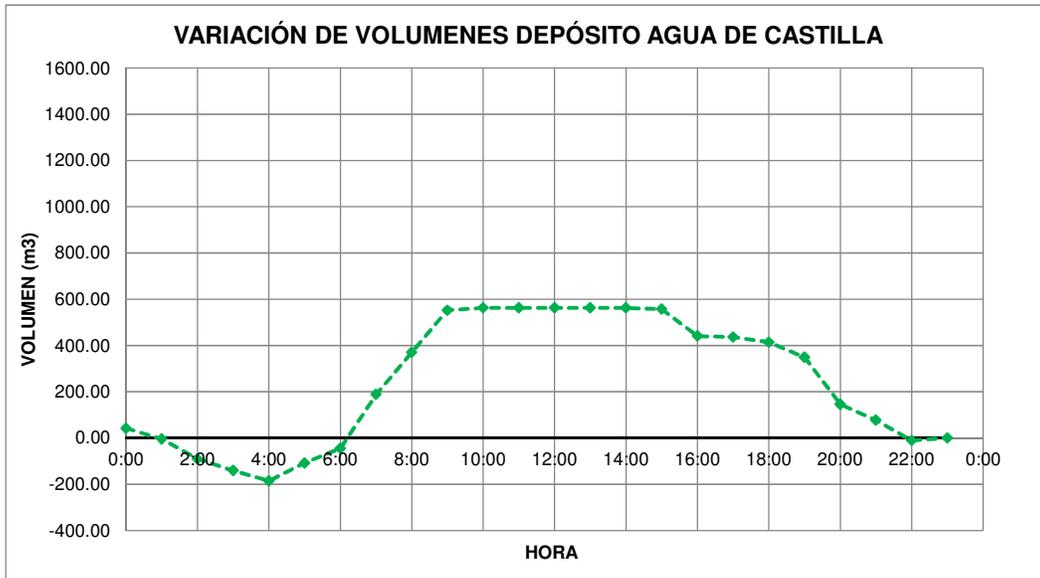


Figura 4.6.10. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 3

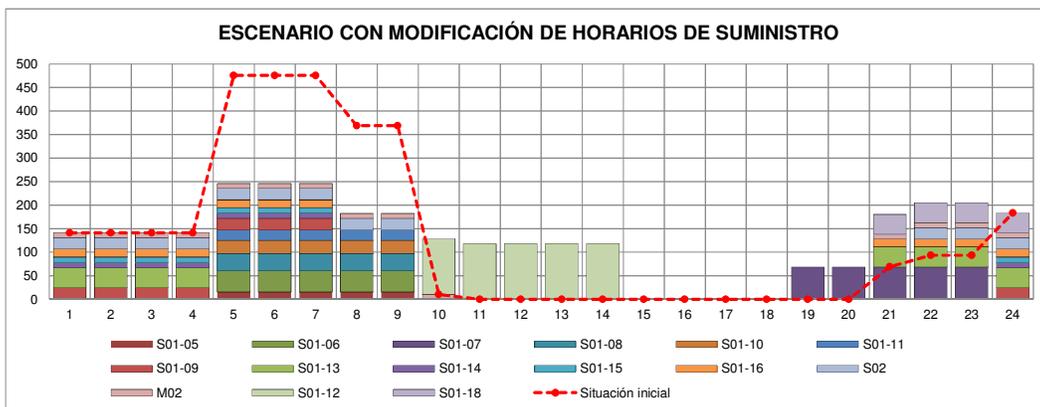


Figura 4.6.11. Escenario 4, $VS=250 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{maxh}= 68.38 \text{ l/s}$.

Tabla 4.6.22. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 4, $VS=250 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{maxh}=68.38 \text{ l/s}$.

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																								

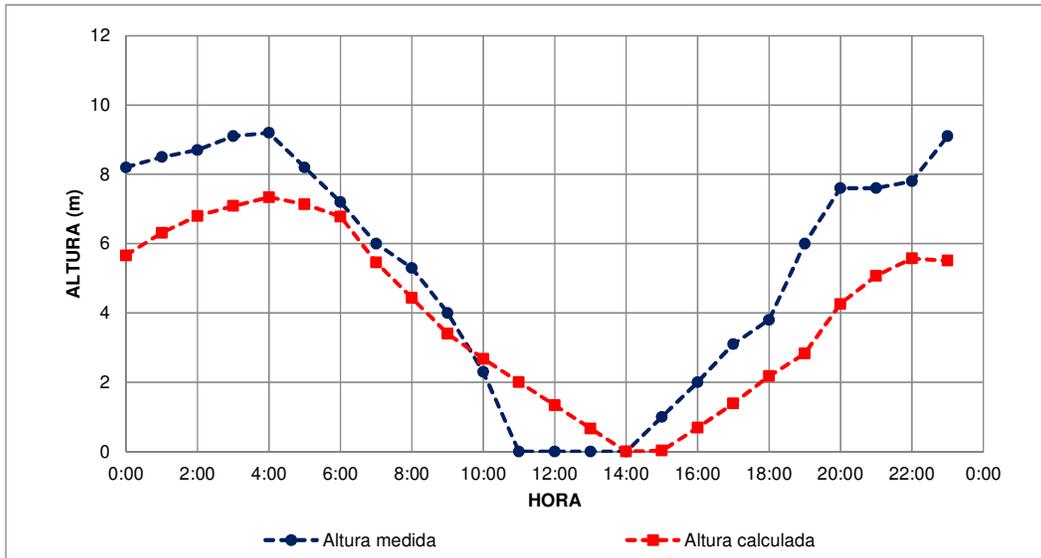


Figura 4.6.12. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 4

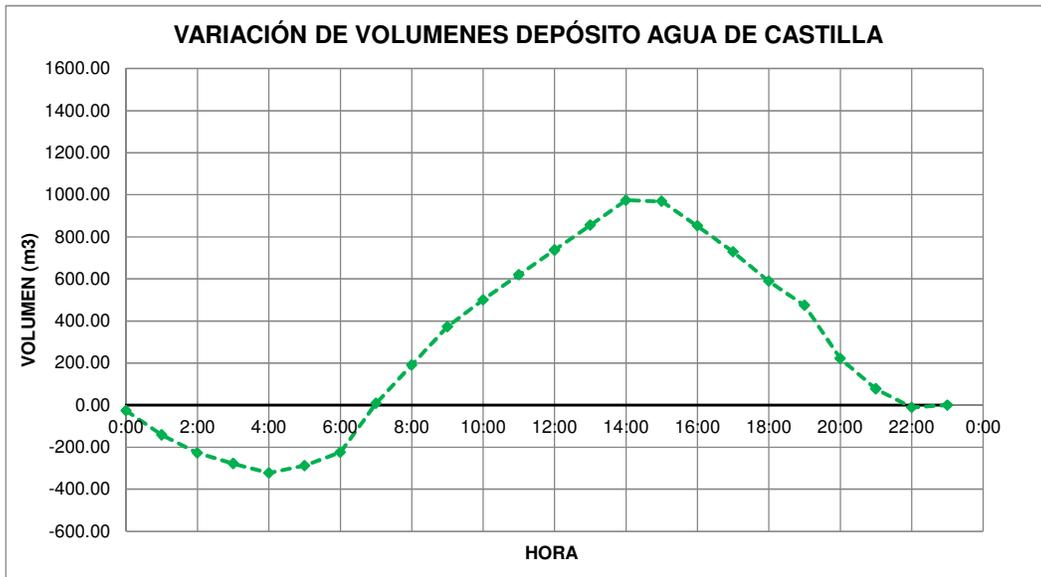


Figura 4.6.13. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 4

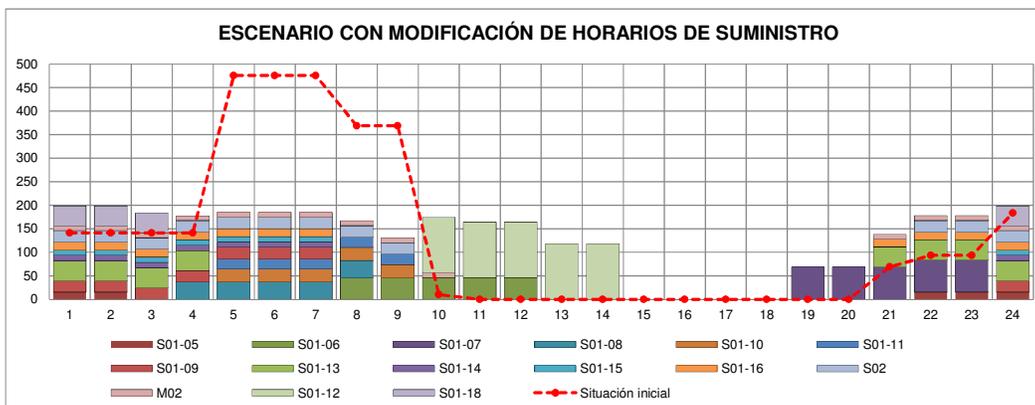


Figura 4.6.14. Escenario 5, VS=200 m³/h, Q_{maxh}=55.39 l/s.

Tabla 4.6.23. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 5, VS=200 m³/h, Q_{maxh}=55.39 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																								

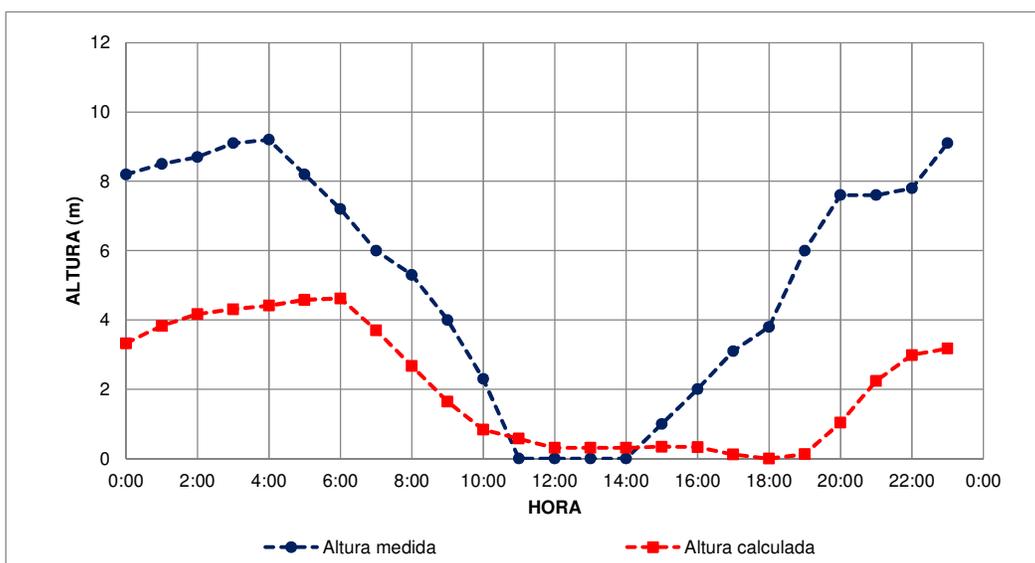


Figura 4.6.15. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 5

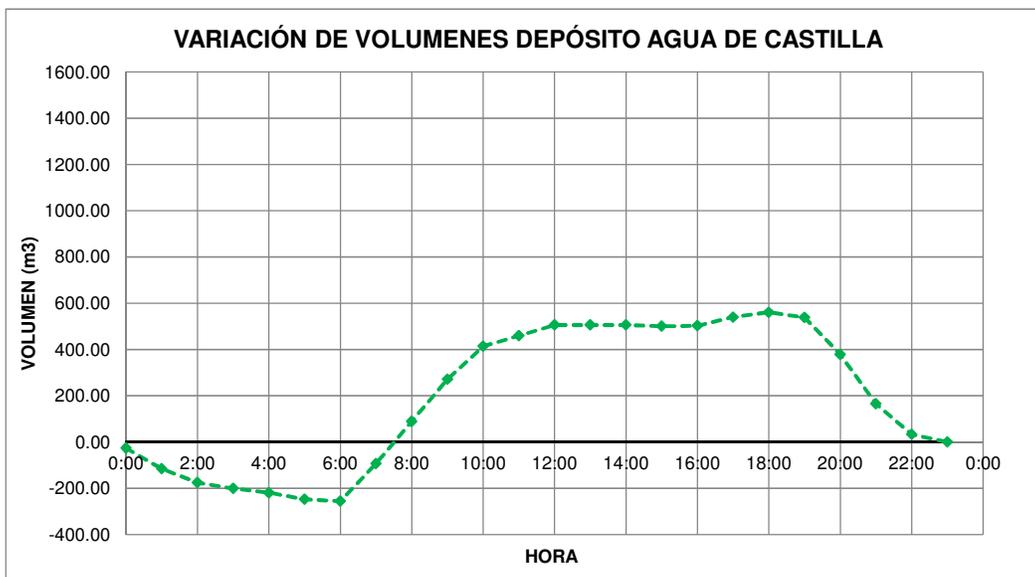


Figura 4.6.16. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 5

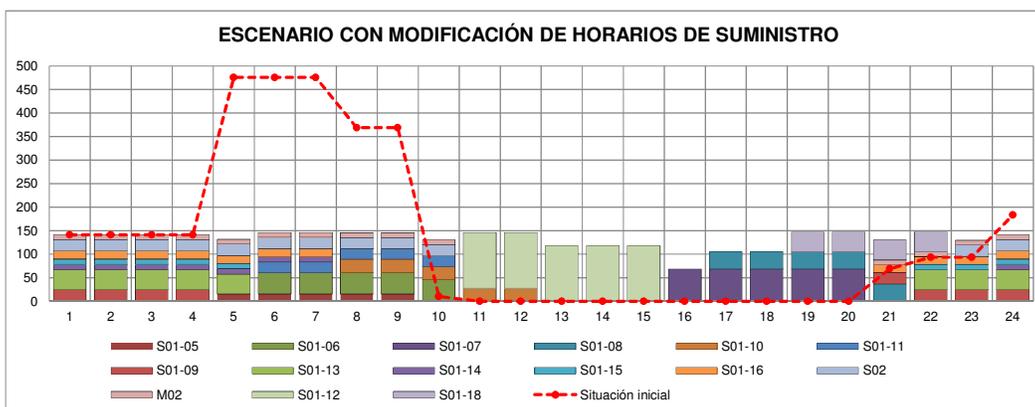


Figura 4.6.17. Escenario 6, $VS=150$ m³/h, $Q_{maxh}=40.96$ l/s.

Tabla 4.6.24. Modificación de los horarios de suministro en el escenario 6, $VS=150$ m³/h, $Q_{maxh}=40.96$ 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																								

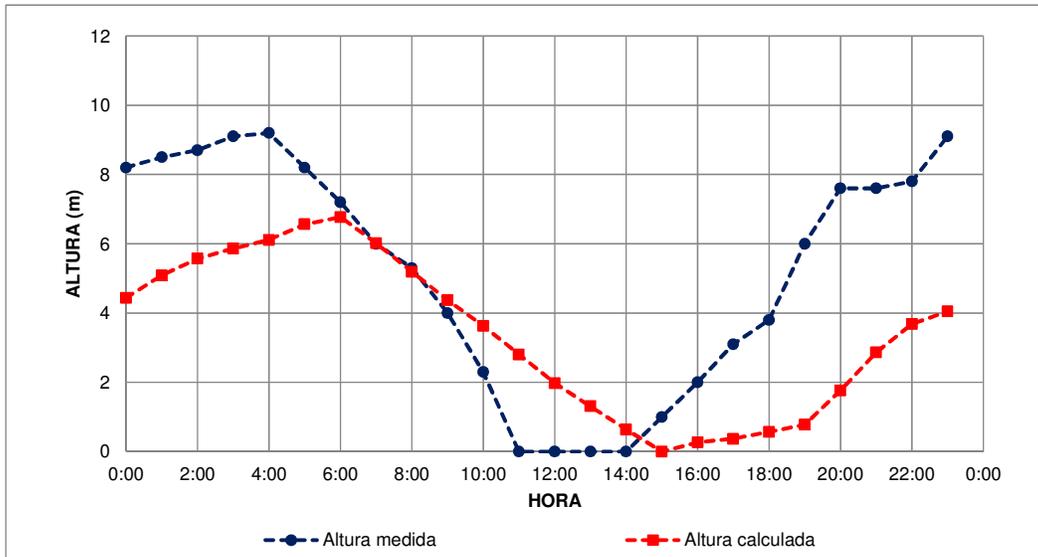


Figura 4.6.18. Modificación de la altura de agua en el depósito, escenario 6

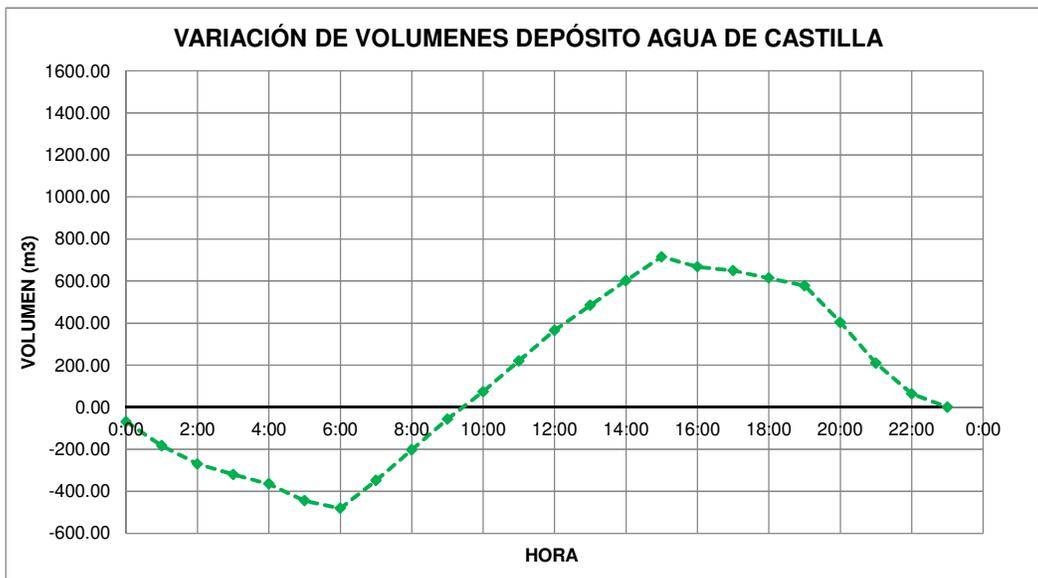


Figura 4.6.19. Modificación del volumen de regulación del depósito, escenario 6

La reorganización de los sectores tiende a un suministro horizontal, sin embargo, se tiene una mayor cantidad de sectores que modifican su horario, lo cual puede perjudicar a los usuarios.

4.7. CÁLCULO HIDRÁULICO

Para realizar el cálculo hidráulico en este sistema de suministro intermitente de la ciudad de Oruro, se utilizó el software WATERCAD, que cuenta con un componente para realizar el cálculo

PDD Pressure Dependent Demand (Bentley Systems, 2009), de esta forma la demanda depende de la presión y el modelo estático de la red de suministro intermitente se acerca más a la realidad.

Cuando el modelo es realizado en DDA (Demand Driven Analysis), con valores de demanda altos (sistemas intermitentes), las presiones en los nudos llegan a tener valores negativos los cuales no tienen significado físico en las redes, solamente indican que el agua no llega con esa demanda al nudo, sin embargo el caudal de demanda se sigue manteniendo y produce pérdidas de carga en tramos por los cuales no circularía, reduciendo aún más las presiones. El Análisis PDD permite evitar los valores de presión negativa y ajusta la demanda a las condiciones de presión disponible en la red.

Como el análisis que se realiza es estático, se utiliza la hora de mayor consumo, considerando que en este periodo las condiciones son las más desfavorables.

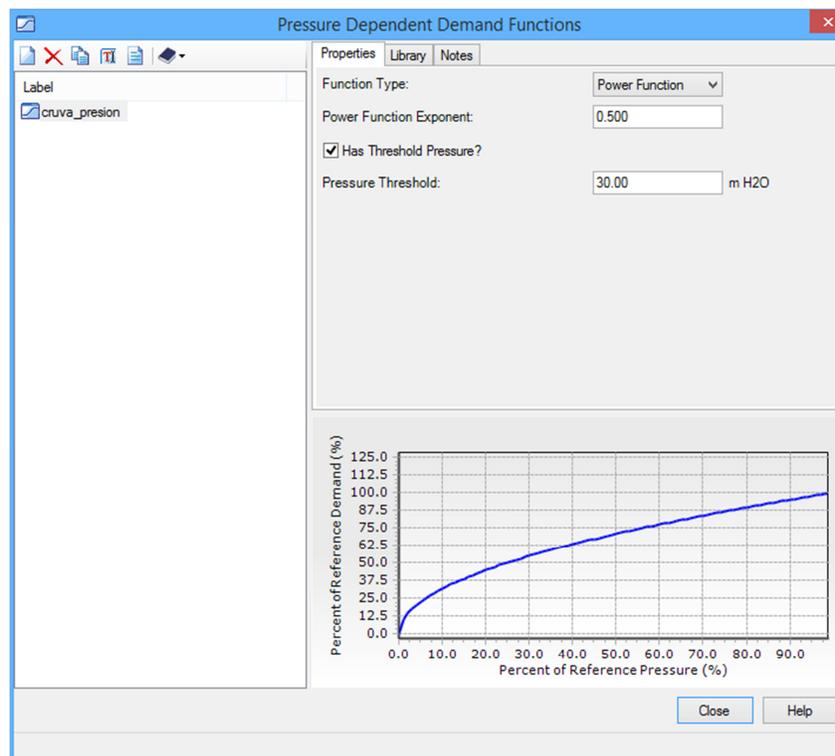


Figura 4.7.1. Ventana de introducción de parámetros de análisis PDD en WATERCAD

Para el cálculo hidráulico PDD se utilizó un exponente 0.5 y un umbral de presión de 30 mca, en el entendido de que valores mayores tienden a independizar la demanda de la presión.

La altura de agua en el depósito Agua de Castilla irá variando según el escenario, los valores de la altura utilizados para el cálculo hidráulico son los siguientes:

Tabla 4.7.1. Altura del nivel del agua en el depósito en la hora de caudal punta de cada escenario

ESCENARIO	ALTURA NIVEL DE AGUA, HORA DE CAUDAL PUNTA (m)
Escenario actual	4.2
Escenario 1	2.9
Escenario 2	3.3
Escenario 3	3.8
Escenario 4	5.5
Escenario 5	4.6
Escenario 6	6.0

4.7.1. SITUACIÓN ACTUAL.

Como se utilizó el caudal medio del periodo para la optimización de los horarios de suministro, estos valores deben ser incrementados para el cálculo hidráulico, asumiendo que se desea dotar de agua en las condiciones más críticas.

Se adoptó un valor de 1.3 como factor punta del periodo de suministro, es decir que el caudal medio del periodo es multiplicado por este valor, por lo que los caudales que son introducidos al modelo son:

Tabla 4.7.2. Cálculo del caudal máximo del periodo en cada sector

SECTOR	VOLUMEN DIARIO (m ³ /día)	HORAS DE SUMINISTRO	VOLUMEN HORARIO (m ³ /hr)	CAUDAL MEDIO DEL PERIODO (l/s)	CAUDAL MÁXIMO DEL PERIODO (l/s)
S01-05	75.99	5	15.20	4.22	5.49
S01-06	230.46	5	46.09	12.80	16.64
S01-07	342.86	5	68.57	19.05	24.76
S01-08	182.08	5	36.42	10.12	13.15
S01-10	139.65	5	27.93	7.76	10.09
S01-11	110.1	5	22.02	6.12	7.95
S01-09	196.03	8	24.50	6.81	8.85
S01-13	341.32	8	42.67	11.85	15.41
S01-14	91.7	8	11.46	3.18	4.14
S01-15	89.54	8	11.19	3.11	4.04
S01-16	184.46	11	16.77	4.66	6.06
S02	292.88	12	24.41	6.78	8.81
M02	142.18	14	10.16	2.82	3.67
S01-12	590.97	5	118.19	32.83	42.68
S01-18	168.62	4	42.16	11.71	15.22
	3178.84		517.73	143.81	186.96

Solamente con fines de comparación, se resumen en la siguiente tabla el escenario utilizando el criterio de cálculo DDA y PDD.

Tabla 4.7.3. Comparación de las demandas y presiones calculadas con el criterio DDA y PDD

SECTOR	DEMANDA DATO (l/s)	DEMANDA CALCULADA DDA (l/s)	DEMANDA CALCULADA PDD (l/s)	PRESIONES MEDIDAS (mca)	PRESIONES CALCULADAS DDA (mca)	PRESIONES CALCULADAS PDD (mca)
S01-05	5.49	5.49	5.49	38.00	20.71	40.03
S01-06	16.64	16.64	12.49	22.00	-60.69	16.83
S01-07	24.76	24.76	19.97	20.00	-29.99	19.44
S01-08	13.15	13.15	11.31	20.00	-62.00	22.10
S01-10	10.09	10.09	8.27	20.00	-83.00	20.06
S01-11	7.95	7.95	5.03	11.00	-111.70	11.95
S01-09	8.85	8.85	8.85	25.00	21.49	30.02
S01-13	15.41	15.41	5.94	6.00	-117.81	4.44
S01-14	4.14	4.14	2.99	16.00	-88.04	15.56
S01-15	4.04	4.04	2.93	15.00	-105.19	15.67
S01-16	6.06	6.06	0.00	4.00	-119.83	0.00
S02	8.81	8.81	8.81	43.00	33.17	41.70
M02	3.67	3.67	3.43	32.00	-56.68	26.12
S01-12	42.68	42.68	11.06	3.00	-197.08	2.01

En base a estos caudales y la topología de la red, se obtiene la presión en cada nudo, valores que son ajustados con las presiones medidas en la red, en los horarios de suministro de la simulación. Para realizar el ajuste se fue modificando el coeficiente de rugosidad de la tubería, considerando que el agua transportada es dura, se fue reduciendo el coeficiente C (Hazen Williams) de la tubería.

Tabla 4.7.4. Ajuste de las presiones calculadas con las presiones medidas

SECTOR	CAUDAL DATO (l/s)	CAUDAL CALCULADO WATERCAD (l/s)	Q/Qi	PRESIONES MEDIDAS (mca)	PRESIONES CALCULADAS (mca)	DIFERENCIA (mca)
S01-05	5.49	5.49	100.03%	38.00	40.03	2.03
S01-06	16.64	12.49	75.04%	22.00	16.83	-5.17
S01-07	24.76	19.97	80.65%	20.00	19.44	-0.56
S01-08	13.15	11.31	86.01%	20.00	22.1	2.1
S01-10	10.09	8.27	82.00%	20.00	20.06	0.06
S01-11	7.95	5.03	63.26%	11.00	11.95	0.95
S01-09	8.85	8.85	100.02%	25.00	30.02	5.02
S01-13	15.41	5.94	38.55%	6.00	4.44	-1.56
S01-14	4.14	2.99	72.24%	16.00	15.56	-0.44
S01-15	4.04	2.93	72.49%	15.00	15.67	0.67
S02	8.81	8.81	99.96%	43.00	41.7	-1.3
M02	3.67	3.43	93.53%	32.00	26.12	-5.88
S01-12	42.68	11.06	25.91%	3.00	2.01	-0.99

Con un valor $C=103$ se alcanzan presiones que mejor se ajustan a los valores medidos, el valor bajo puede deberse a la dureza del agua suministrada que genera incrustaciones en las paredes de la tubería y también debido a la edad de la red; en el siguiente gráfico se muestra el ajuste respectivo de las presiones:

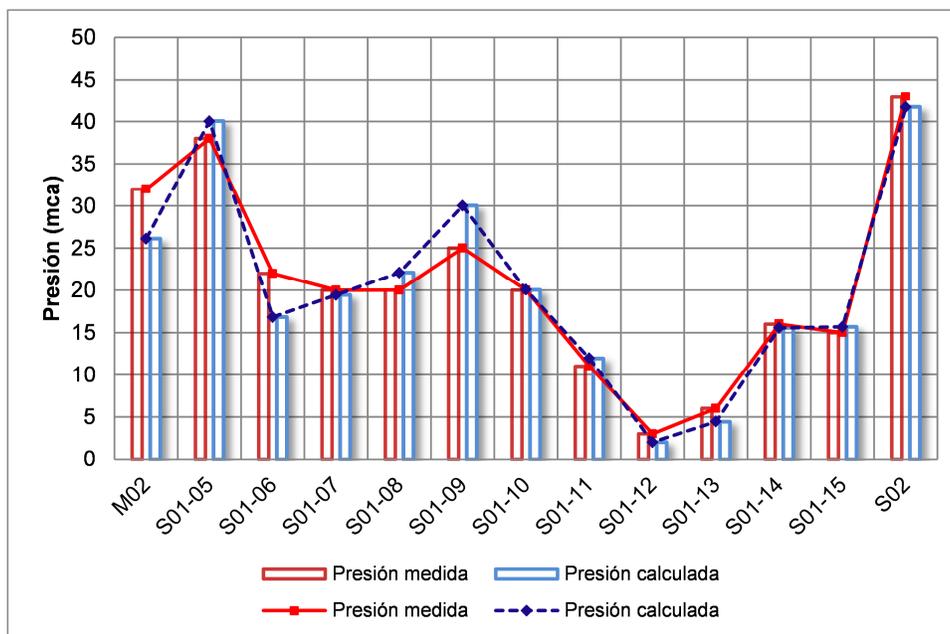


Figura 4.7.2. Ajuste de las presiones medidas y calculadas del modelo hidráulico.

4.7.2. CÁLCULO HIDRÁULICO EN LOS ESCENARIOS PROPUESTOS

Ya con la red ajustada, se calcularán las presiones y demandas en las horas pico de cada uno de los escenarios propuestos; como se observa, tanto presiones como caudales van mejorando a medida que se reducen el caudal pico y se optimizan los horarios de suministro, los valores de presión y de caudal cero indican que estos sectores no tienen suministro en las horas pico.

Tabla 4.7.5. Cálculo de la presión (mca) en la hora pico de los escenarios propuestos

SECTOR	ACTUAL SIN PDD	ACTUAL PDD	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4	ESCENARIO 5	ESCENARIO 6
S01-05	25.11	40.03	39.71	40.59	43.60	45.19	46.62	48.82
S01-06	-43.63	16.83	19.22	22.06	25.17	26.23	0.00	35.99
S01-07	-20.94	19.44	19.77	20.42	0.00	0.00	0.00	0.00
S01-08	-41.55	22.10	24.51	26.54	30.17	31.42	33.49	0.00
S01-10	-56.90	20.06	23.83	26.64	30.23	31.37	33.63	0.00
S01-11	-81.88	11.95	14.68	16.40	18.60	19.28	20.65	28.26
S01-09	23.41	30.02	29.33	29.81	31.44	33.09	0.00	0.00
S01-13	-91.90	4.44	6.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S01-14	-61.94	15.56	19.21	21.93	25.40	26.49	28.64	41.07
S01-15	-72.45	15.67	20.01	22.50	25.67	26.66	28.62	0.00
S01-16	-93.83	0.00	0.17	2.10	4.53	5.30	6.86	15.22
S02	35.09	41.70	40.87	41.47	43.12	44.77	47.04	48.80
M02	-36.23	26.12	28.94	31.31	35.50	36.74	38.81	50.21
S01-12	-163.98	2.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

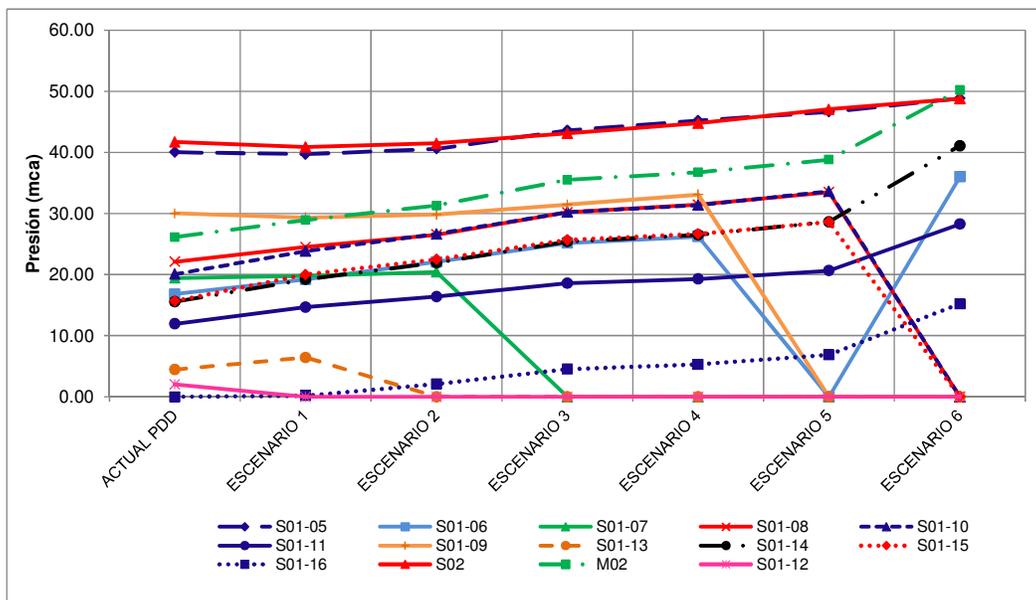


Figura 4.7.3. Cálculo de la presión (mca) en la hora pico de los escenarios propuestos

Como las presiones van mejorando y se utilizó el criterio de la demanda dependiente de la presión, los caudales demandados también tenderá a crecer según vaya mejorando el escenario.

Tabla 4.7.6. Cálculo de caudales de demanda (l/s) en la hora pico de los escenarios propuestos

SECTOR	DATOS	ACTUAL SIN PDD	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	5.49
S01-06	16.64	16.64	12.49	13.35	14.30	15.27	15.59	0.00	16.64
S01-07	24.76	24.76	19.97	20.14	20.47	0.00	0.00	0.00	0.00
S01-08	13.15	13.15	11.31	11.91	12.39	13.15	13.15	13.15	0.00
S01-10	10.09	10.09	8.27	9.01	9.53	10.09	10.09	10.09	0.00
S01-11	7.95	7.95	5.03	5.57	5.89	6.27	6.39	6.61	7.73
S01-09	8.85	8.85	8.85	8.77	8.84	8.85	8.85	0.00	0.00
S01-13	15.41	15.41	5.94	7.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S01-14	4.14	4.14	2.99	3.32	3.55	3.82	3.90	4.05	4.14
S01-15	4.04	4.04	2.93	3.31	3.51	3.74	3.82	3.95	0.00
S01-16	6.06	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	8.81
M02	3.67	3.67	3.43	3.61	3.67	3.67	3.67	3.67	3.67
S01-12	42.68	42.68	11.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S01-18	15.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

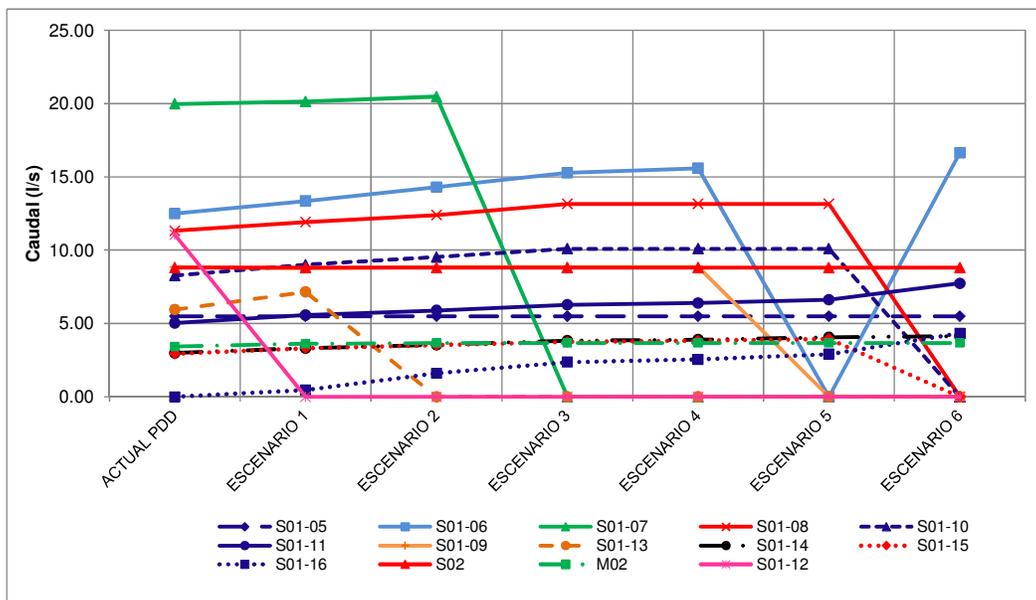


Figura 4.7.4. Cálculo de caudales de demanda (l/s) en la hora pico de los escenarios propuestos

Como ejemplo, para mayor detalle se muestran las variaciones en la presión y caudal en tres sectores importantes; el sector S01-05 muestra que por más que se incrementa la presión, la demanda no se modifica, debido a que las presiones calculadas son superiores a la presión umbral y aseguran cualquier demanda solicitada, este sector es uno de los más cercanos al depósito Agua de Castilla.

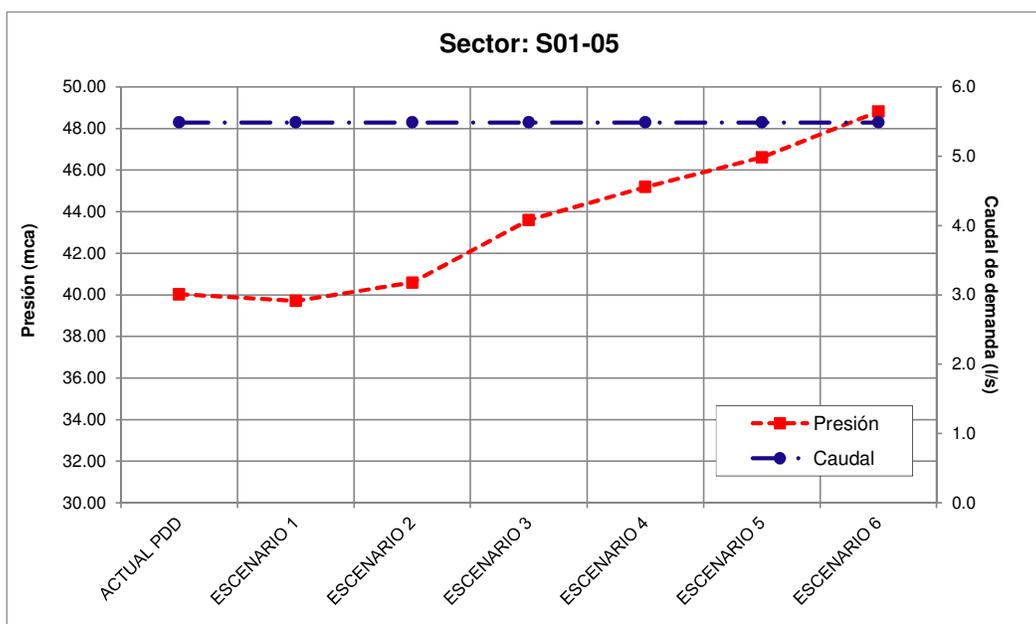


Figura 4.7.5. Variación de la presión y el caudal en el sector S01-05, en la hora pico de los escenarios propuestos

En el sector S01-08 se van incrementado tanto la presión como la demanda, hasta que la presión supera el umbral definido de 30 mca, a partir de donde la demanda se mantiene constante, asegurando todo el caudal demandado.

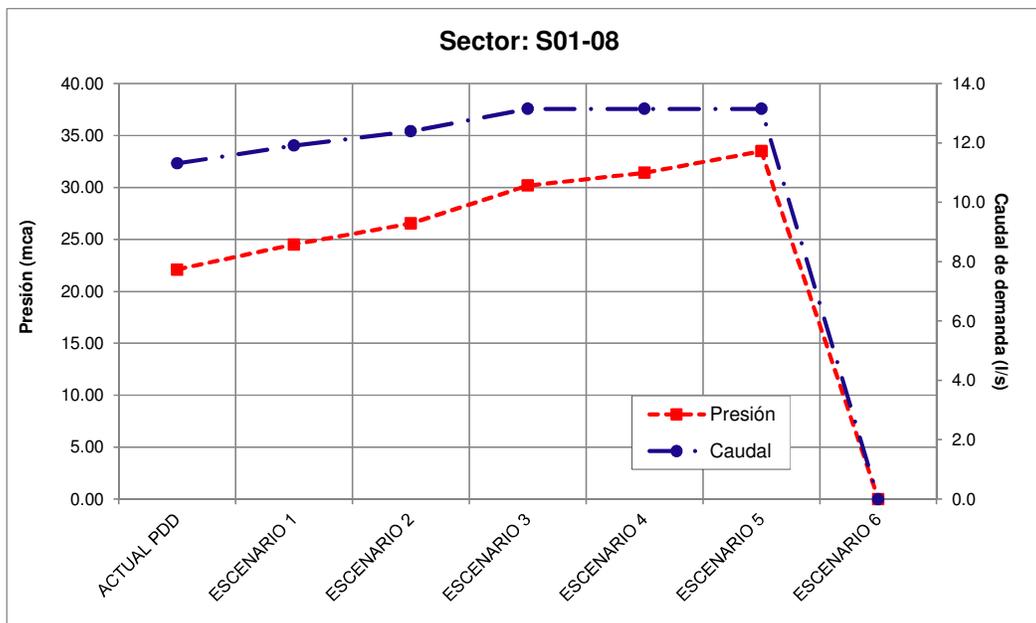


Figura 4.7.6. Variación de la presión y el caudal en el sector S01-08, en la hora pico de los escenarios propuestos

El sector S01-11 no logra llegar a cubrir toda la demanda a pesar de que mejoran las condiciones de presión, este problema se da por la configuración de la red, estos sectores pueden conseguir la demanda máxima en horas diferentes a la estudiada, cuando no se produzca la hora pico.

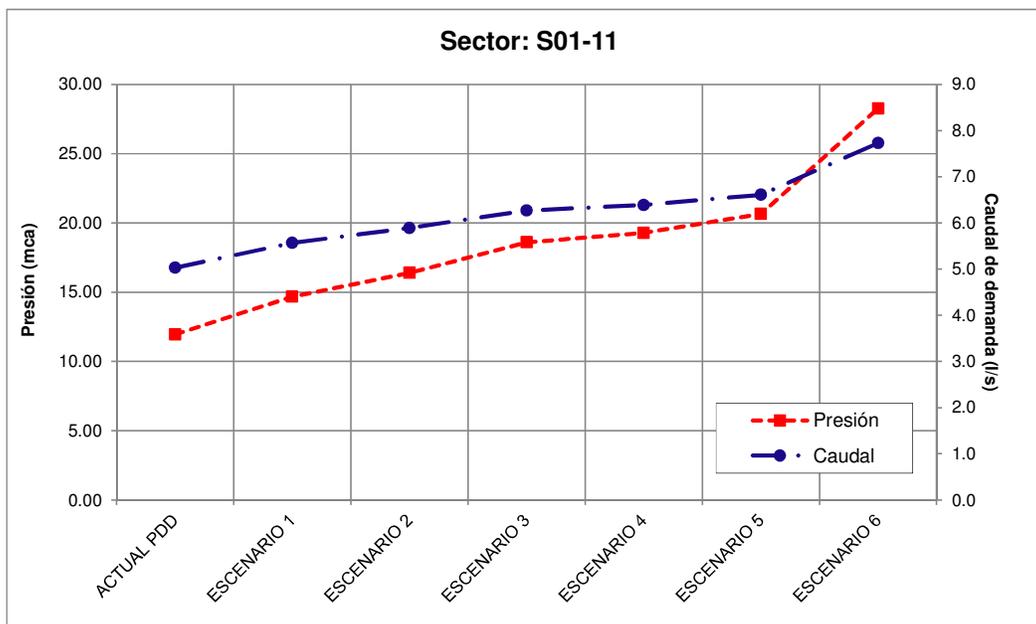


Figura 4.7.7. Variación de la presión y el caudal en el sector S01-11, en la hora pico de los escenarios propuestos

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las soluciones para mejorar los sistemas de suministro intermitente no siempre deben ir por el lado de la construcción de nueva infraestructura, ni 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 presente metodología busca ser un aporte en este sentido, una solución baja o nula en coste, que pueda implementarse a corto plazo, muy apropiada para sistemas de suministro intermitente con escasez económica.

La categorización del tipo de suministro intermitente es muy importante, pues este paso permitirá identificar y establecer las acciones que se adoptarán para la mejora del mismo. Dentro las categorías existen los tipos de escasez 1 y 2 (escasez debida a una mala gestión y escasez económica), en estos casos la presente metodología servirá como herramienta de mejora de la gestión y puede formar parte de un plan de transición hacia un sistema continuo; cuando se tiene un sistema de categoría 3 (escasez absoluta) la metodología puede ser parte de una mejora en la gestión técnica buscando un suministro más equitativo.

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. La presente metodología busca adaptarse a esta situación y ser aplicable, por lo que se asumen algunas simplificaciones que permiten la linealización del problema.

Como puede observarse, el factor pico en un sistema intermitente es muy superior al factor pico de un sistema continuo, otra característica importante del consumo en el suministro intermitente es la laminación que se produce debido a la presencia de los depósitos de almacenamiento en cada vivienda, de esta forma la demanda de cada usuario dependerá de la presión disponible en la red, por lo que se tiene un suministro inequitativo.

Usar la simplificación de la laminación del suministro en un sistema intermitente, permite realizar un análisis del cambio de horarios utilizando programación lineal, lo cual asegura que se encontrará el óptimo global, esta simplificación implica que los volúmenes de consumo de cada sector se mantienen.

Sin embargo, tanto las mediciones realizadas en Jordania (Battermann & Macke, 2001) como las mediciones realizadas en Oruro (Bolivia), muestran que en el suministro de un sistema intermitente existe un factor punta que varía entre 1.2 a 1.3, con el cual se corrige el consumo medio del periodo para realizar el cálculo hidráulico, de esta forma se tienen presiones y demandas más cercanas a la realidad.

La presente metodología considera que el cálculo hidráulico debe ser realizado en estado estático en la hora de mayor consumo, en esta situación se calculará la presión más baja. Realizar un análisis en DDA en un sistema de suministro intermitente, donde la demanda es constante aunque varíe la presión, puede arrojar valores de presión negativos, que no tienen un significado físico ni representan a la realidad, por lo que es recomendable elaborar el cálculo hidráulico con un análisis de Demanda Dependiente de la Presión, de esta forma se consiguen valores más cercanos a la realidad. El uso del factor punta de 1.2 a 1.3 ya mencionado permite acercarse al caudal de salida del depósito, debido a que los caudales demandados tenderán a bajar por la dependencia de la presión.

El desconocimiento del consumo facturado no medido, debido a la falta de contadores en varias acometidas, crea incertidumbre en la cantidad de pérdidas existentes en el sistema, por lo que resulta conveniente inicialmente distribuir estas cantidades desconocidas proporcionalmente con los volúmenes medidos conocidos.

La metodología permite incrementar las presiones de servicio; sin embargo debe considerarse también el efecto inducido sobre la cantidad de fugas, esta situación exige que se regulen los caudales de ingreso a los sectores de mayor presión, con el fin de evitar una distribución inequitativa y las pérdidas reales.

Se utiliza el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para establecer cada uno de los pesos de la función objetivo que permitirá la optimización de los horarios de suministro; asimismo, este método permite determinar los pesos de las variables cualitativas, en esta etapa del proceso intervienen los expertos de la empresa de agua quienes son los que mejor conocen el sistema.

La presencia del depósito de cabecera en esta metodología es importante, debido a que este se convierte en el elemento de equilibrio del sistema.

Como se mencionó anteriormente, en sistemas de suministro intermitente con escasez económica no se cuenta con los instrumentos necesarios para la medición, si no se tienen contadores o medidores de caudal en la salida e ingreso del depósito estudiado pueden medirse los niveles o altura de agua a cada hora, de esta forma se puede realizar un primer ajuste con las alturas de agua calculadas con el modelo.

Cuando se tiene un gran número de viviendas en un sector, el caudal demandado se incrementa, esta situación genera pérdidas en la presión de servicio, lo que repercute en la cantidad de agua suministrada que se ve disminuida, en esta situación se llega a un estado de escasez o déficit de agua, es recomendable estudiar esta zona de déficit con el fin establecer criterios para el diseño de sectores en sistemas que trabajen con suministro intermitente.

Los criterios utilizados para la optimización de la modificación de horarios de suministro son cualitativos y cuantitativos; es conveniente seleccionar la mayor cantidad de criterios técnicos cuantitativos; sin embargo en caso de existir criterios cualitativos, también pueden ingresar en el modelo utilizando técnicas de análisis multicriterio como el AHP. Adicionalmente, se incluye en la función objetivo el volumen de ingreso de agua y los sectores que trabajan en cascada.

El modelo de optimización en el caso de estudio, cuenta con 360 variables binarias (resultado de los 15 sectores por 24 horas) y 414 restricciones, aunque estos valores pueden crecer en función de la cantidad de sectores estudiados. Asimismo, se busca reducir la cantidad de usuarios perjudicados con el cambio de horas de suministro, tomando en cuenta criterios técnicos como operativos.

Como parte del problema de programación lineal se propone el uso de matrices de horarios, las cuales desempeñan un papel muy importante en su resolución, pues permiten modificar los horarios en bloques, de esta forma su uso es de gran ayuda para este tipo de problemas.

No siempre la mejora de las presiones es beneficiosa, el incremento de la presión está relacionado directamente con el incremento de las fugas, por lo que debe analizarse la reducción de las presiones en los circuitos que presentan mayor presión; pueden utilizarse técnicas de gestión de la presión o solamente regular la presión con las válvulas al ingreso de cada sector, de esta forma se reduce la distribución inequitativa. Asimismo, debe considerarse que el incremento de las presiones puede generar mayor desperdicio dentro las viviendas por parte de los usuarios.

Debido a la operación continua, apertura y cierre de válvulas en un sistema de suministro intermitente y el deterioro progresivo por los efectos de la intermitencia, se considera que las pérdidas más importantes son causadas por las fugas de fondo.

La mayoría de los sistemas intermitentes fueron diseñados para trabajar como continuos con una determinada capacidad, cuando el sistema empieza a trabajar como intermitente el sistema es sobreexplotado en algunas horas, lo cual se evidencia con la presencia caudales altos que producen presiones bajas, las cuales se convierten en un indicador de que la capacidad de la red fue superada y que debe corregirse su operación para tratar de reducir estos problemas. Otros elementos como los depósitos son infrautilizados, los cuales pueden estar por largos periodos sin agua y llegar a cubrir toda su capacidad por poco tiempo.

La reducción del caudal de punta genera la reducción de la altura de agua en el depósito, la cual incide en la altura de presión de partida, por lo que cuando se tienen reducciones pequeñas en el caudal punta, el incremento de la presión es muy bajo, a veces nulo, a mayor caudal reducido se observa que las presiones mejoran notablemente.

Según lo observado en el sistema de la ciudad de Oruro, las horas sin suministro en un sistema intermitente permiten que se realicen instalaciones clandestinas, las que se dificultarían o serían notorias en los sistemas continuos. También debido a este periodo sin suministro, el agua se queda en la tubería mayor tiempo, por lo que el efecto residual del cloro puede reducirse.

Generalmente, en sistemas intermitentes son necesarios los sectores, que son vitales para el suministro por horas; cuando el sistema tiene esta configuración, estos pueden ser muy importantes buscando en el futuro un sistema continuo, transformándose en Distritos Hidrométricos (DMA) no solamente para el control de las pérdidas. En caso de no tener sectorizada la red, deberá plantearse esta tarea como una de las prioritarias. La presente metodología considera que las redes de suministro intermitente están conformadas por sectores.

La modificación en los horarios de suministro define un nuevo volumen de regulación en el depósito, debido a una función objetivo en la cual se da prioridad a las horas de ingreso de agua, de esta forma el volumen de regulación va disminuyendo; sin embargo cuando más se reduce la restricción del volumen de salida del depósito el volumen de regulación tiende a subir.

Las tuberías principales deben estar configuradas como red mallada, de esta forma se lograrán presiones más homogéneas en los puntos de ingreso a cada sector, la actual configuración tipo red abierta del caso de estudio limita el caudal y presión a las zonas altas y alejadas del sistema, con todos los inconvenientes que trae consigo para la población, la operación y mantenimiento.

La metodología permite definir varios escenarios en los cuales se mejora la presión 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 punta implica mayor movimiento de los sectores, lo cual puede incrementar los costes de operación.

Es recomendable realizar la implementación del cambio de horarios, previa la socialización y explicación de los beneficios de la misma a la población, con el fin de evitar protestas u otro tipo de problemas sociales.

5.2. BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- 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.
- 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.
- Aznar, J., & Guijarro, F. (2012). *Nuevos métodos de valoración, modelos multicriterio*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Battermann, A., & Macke, S. (2001). A Strategy to Reduce Technical Water Losses for Intermittent Water Supply Systems. *M. Sc. Tesis*. Judayta, Jordania.
- Bentley Systems. (2009). *Bentley Watercad V8i User's guide*. Bentley Systems.
- 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-Bejar, 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-Bejar, J. A., Palma, J., Cerón, B., & De Jesús, M. (2009). Suministro intermitente de agua potable: caso Chilpancingo. *XXII Congreso Nacional de Hidráulica*. Acapulco.
- Charalambous, B. (2012). The Effects of Intermittent Supply on Water Distribution Networks. *Water Loss 2012*. Manila, Philippines.
- 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*.
- Corcos, 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.

- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH and VAG Armaturen GmbH. (2012). *Guidelines for water loss reduction, A focus on pressure management*. GIZ.
- 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
- Farley, M. (2001). *Leakage Management and Control, a best practice training manual*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- 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>
- Fuertes, V., Izquierdo, J., Iglesias, P., Cabrera, E., & García-Serra, J. (1997). Llenado de tuberías con aire atrapado. *Ingeniería del Agua - Vol.4 - Num.3*, 53 - 63.
- 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.
- Iglesias, P., Vicente, M., & Pérez, R. (2010). *Fluidos incompresibles, flujo transitorio en conductos cerrados*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- 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). *Insituto 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)
- 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.

- Islam, S., & Alekal, P. (2009). *Achieving 24x7 water and waterloss management in intermittent supply environment*. Recuperado el 15 de Oct de 2013, de iwawaterwiki.org: <http://www.iwawaterwiki.org/xwiki/bin/view/Articles/Achieving24x7waterandwaterlossmanagementinintermittentsupplyenvironment>
- 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.
- Lambert, A. O., & Hirner, W. (2000). Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. *International Water Association*.
- 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.
- 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.
- Milanes, Y., & Álvarez, A. (2006). *Tesis*. Granma, Cuba, Universidad de Granma. Recuperado el 16 de Oct. de 13
- 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.
- 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.

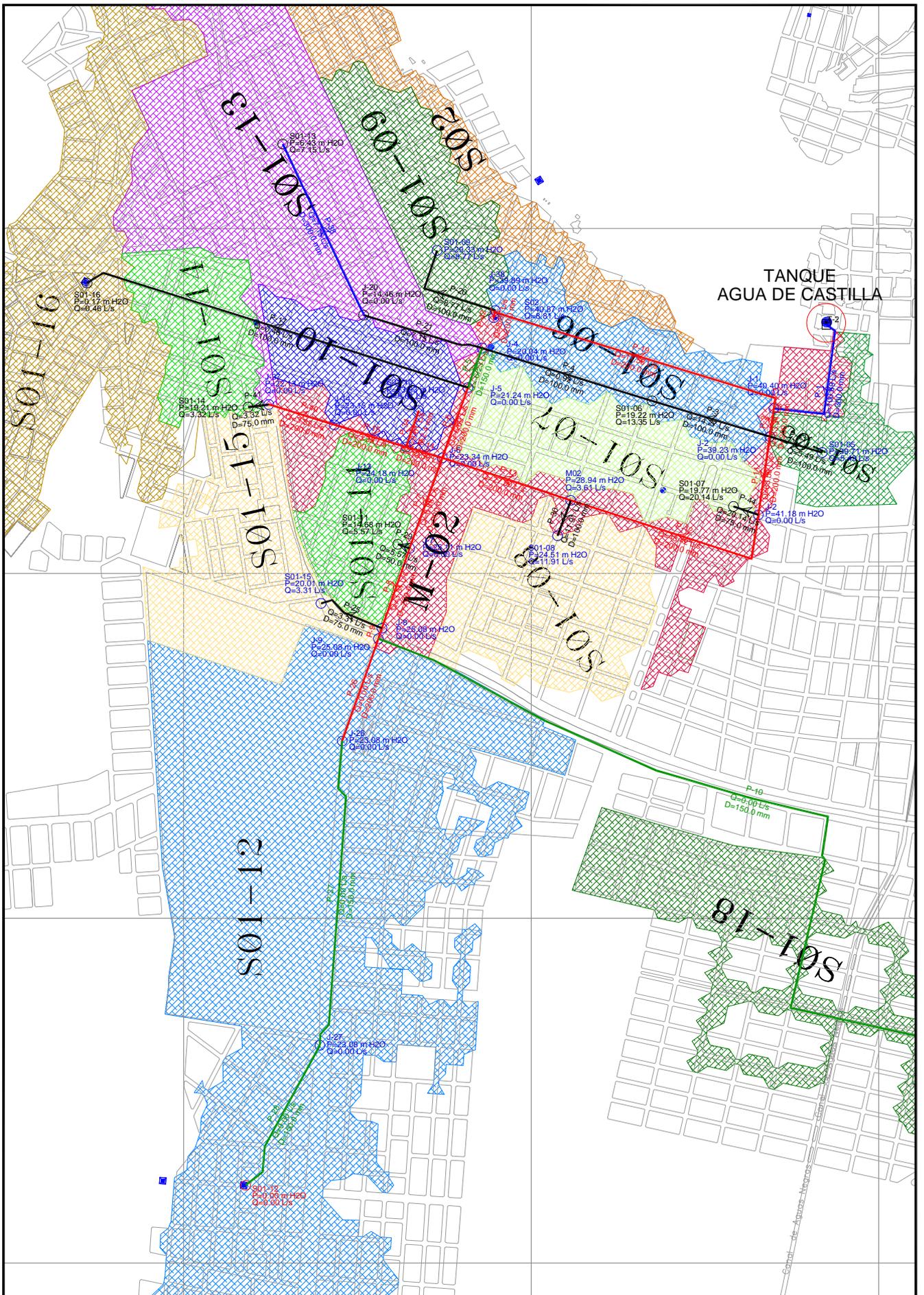
- Moreno-Jimenez, J. (1996). Metodología multicriterio en el Plan Nacional de Regadíos.
- Morrison, J., Tooms, S., & Rogers, D. (2007). District Metered Areas Guidance Notes. En *International Water Association (IWA), specialist group on efficient operation and management of urban water distribution systems, water loss task force*. London, U.K.
- Pérez, R., Iglesias, P., & Fuertes, V. (2005). *Flujo estacionario de fluidos incompresibles en tuberías*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Rossman, L. (2000). *Epanet 2 - Users Manual*. Cincinnati, U.S.A.: EPA.
- Saaty, T., & Vargas, L. (2012). *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. New York: Springer.
- Sanjay, & Dahasahasra, V. (2007). A model for transforming an intermittent into a 24x7 water supply system. *Geospatial today*, 34-39.
- SCIDE-GEOBOL. (1981). *Proyecto de investigación de fuentes de abastecimiento de agua para la ciudad de Oruro*. Oruro: GEOBOL.
- 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.
- SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia. (2013). *Datos climáticos mensuales*. Obtenido de www.senamhi.gob.bo: <http://www.senamhi.gob.bo/meteorologia/formularioboletinmensual.php>
- Soltanjalili, M.-J., Haddad, O. B., & Mariño, M. (2013). Operating Water Distribution Networks during Water Shortage Conditions Using Hedging and Intermittent Water Supply Concepts. *Journal of water resources planning and management - ASCE*, 644 - 659.
- Sotelo Ávila, G. (1999). *Hidráulica general*. México D.F.: Limusa.
- 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 doctorado*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- 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.

- Totsuka, N., Trifunovic, N., & Vairavamoorthy, K. (2004). Intermittent urban water supply under water starving situations. *30th WEDC International Conference*, (págs. 505 - 512). Vientiane, Lao.
- 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.
- 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.
- Van den Berg, C., & Danilenko, A. (2011). *The IBNET Water Supply and Sanitation Performance Blue Book*. Washington D.C.: The World Bank.
- 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. M., Chase, D., Savic, D., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). *Advanced water distribution modeling and management*. Haestad press.
- World Health Organization & UNICEF. (2013). *Progress on sanitation and drinking-water - 2013 update*. WHO - UNICEF.
- 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^o 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 WaterWorks Association*, 33.

ANEXO 1

PLANOS

- 1. Tuberías principales y sectores, red de distribución zona sur de Oruro**
- 2. Dotación media por sector**
- 3. Criterio 1: Presión de servicio**
- 4. Peso normalizado del Criterio 1: Presión de servicio**
- 5. Criterio 2: Número de usuarios o clientes**
- 6. Peso normalizado del Criterio 2: Número de usuarios o clientes**
- 7. Criterio 3: Horas de suministro**
- 8. Peso normalizado del Criterio 3: Horas de suministro**
- 9. Peso normalizado del Criterio 4: Facilidad en la operación del sector**



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

LÁMINA:

TUBERÍAS PRINCIPALES Y SECTORES
RED DE DISTRIBUCIÓN, ZONA SUR DE ORURO
PRESIONES Y CAUDALES ESCENARIO 1

FUENTE:

SeLA - ORURO

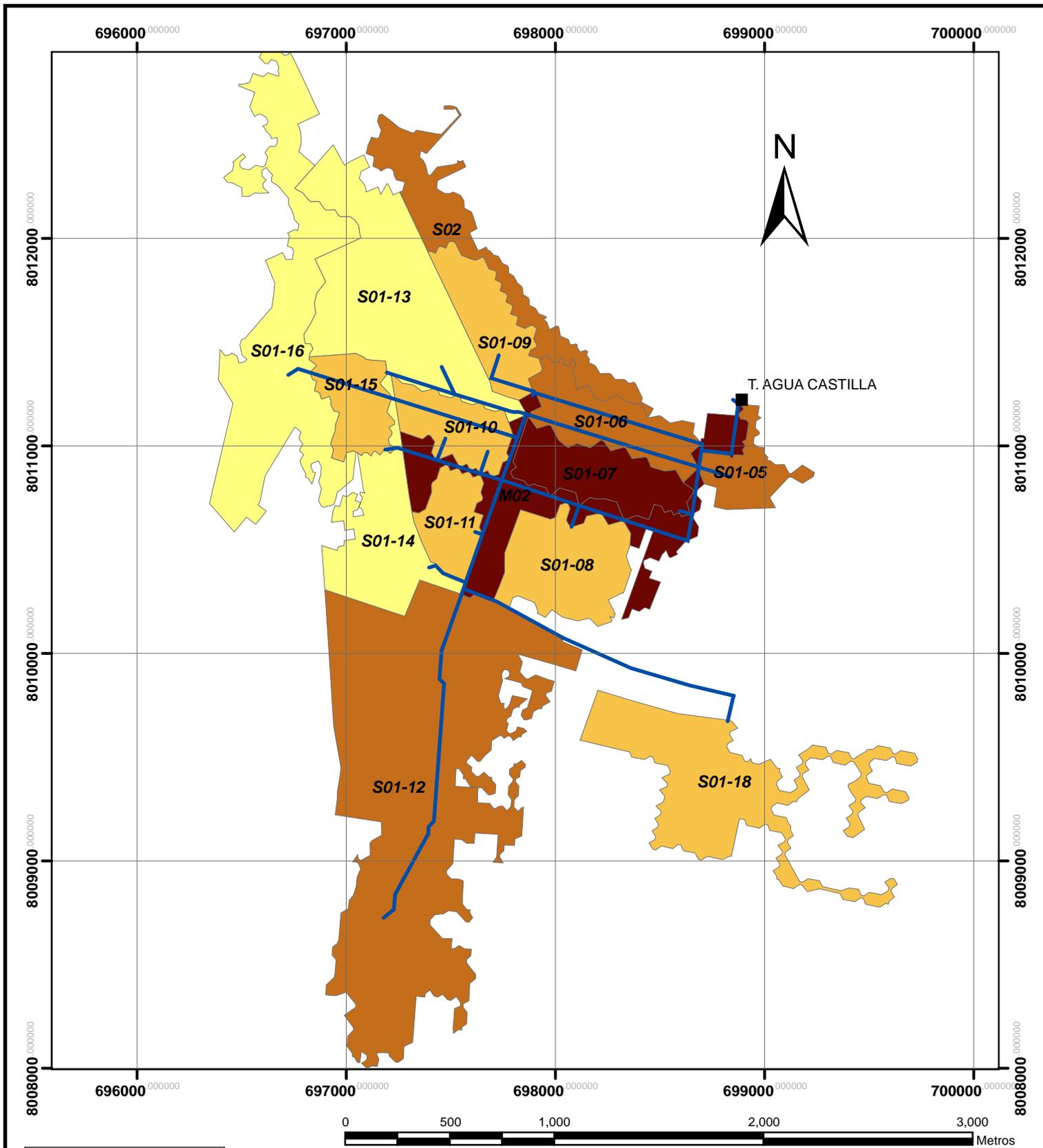
ESCALA:

1:15,000

TÍTULO:

METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO EN SISTEMAS
DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE, CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO (BOLIVIA)

1/9



REFERENCIAS	
SECTORES	
Dotación (l/hab-día)	
	40.19 - 66.45
	66.45 - 90.24
	90.24 - 108.93
	108.93 - 119.98



LAMINA:

DOTACIÓN MEDIA POR SECTOR

METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE, CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO (BOLIVIA)

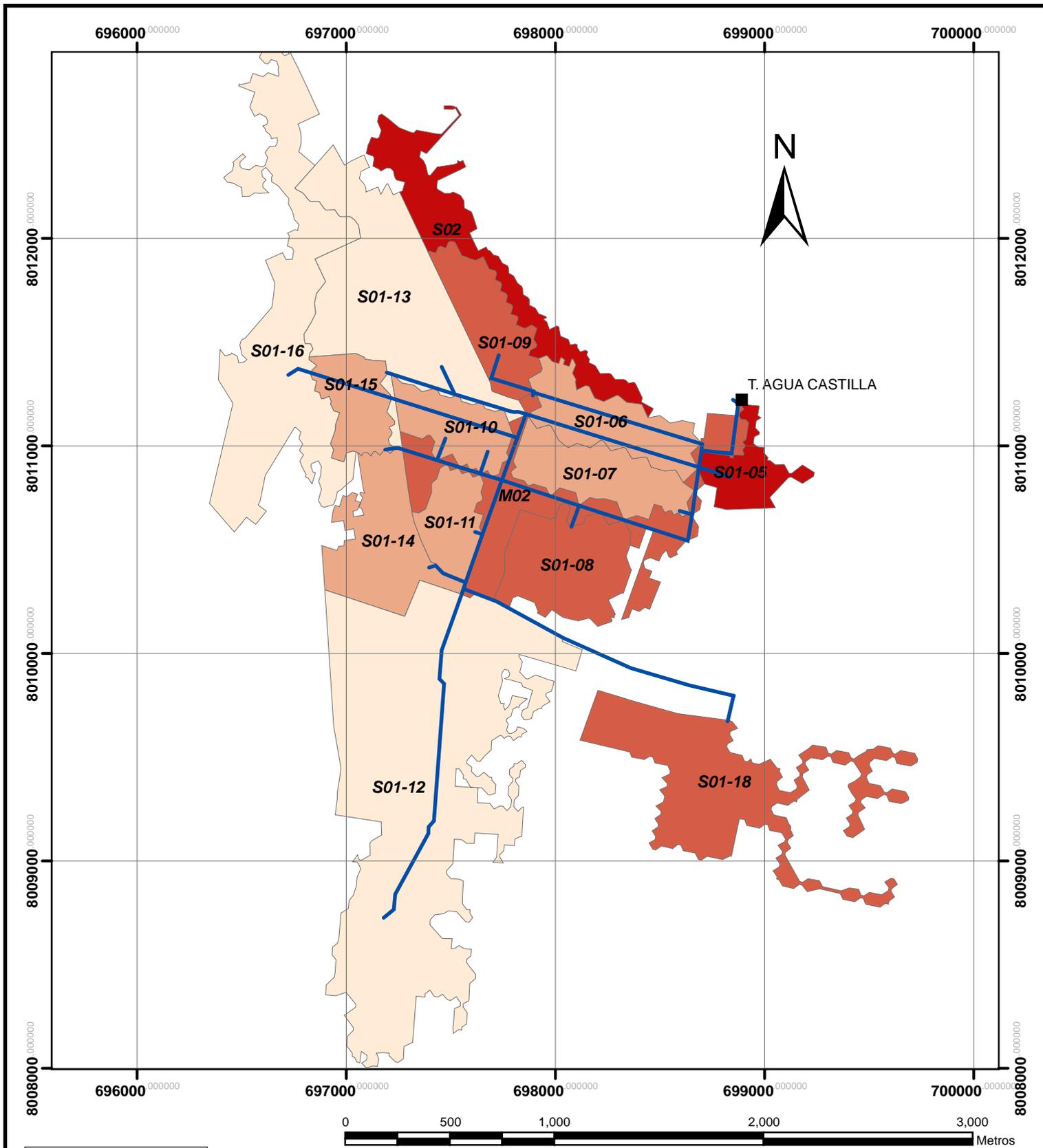
FECHA:

JULIO DE 2014

ESCALA:

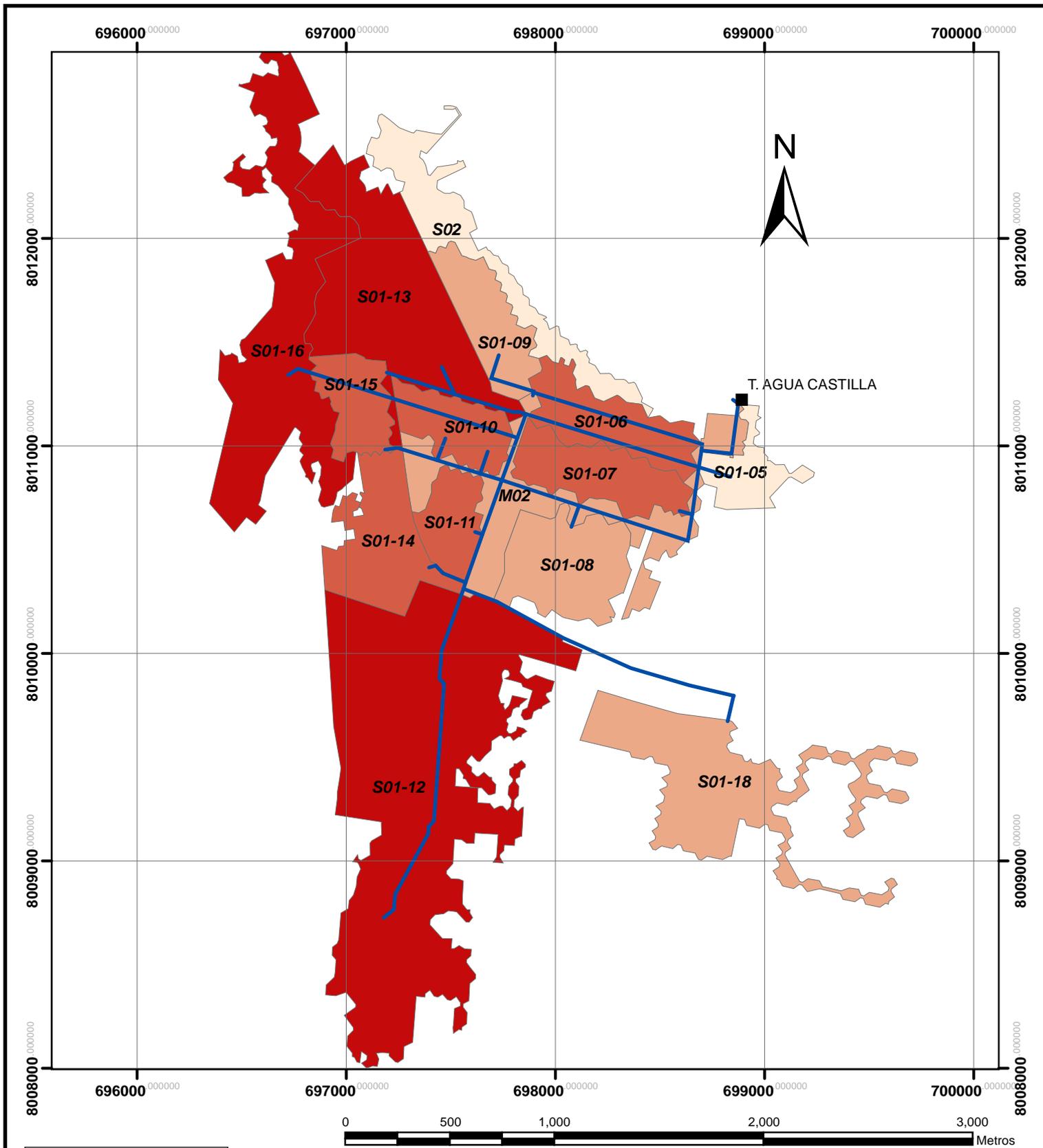
1:25,000

2/9



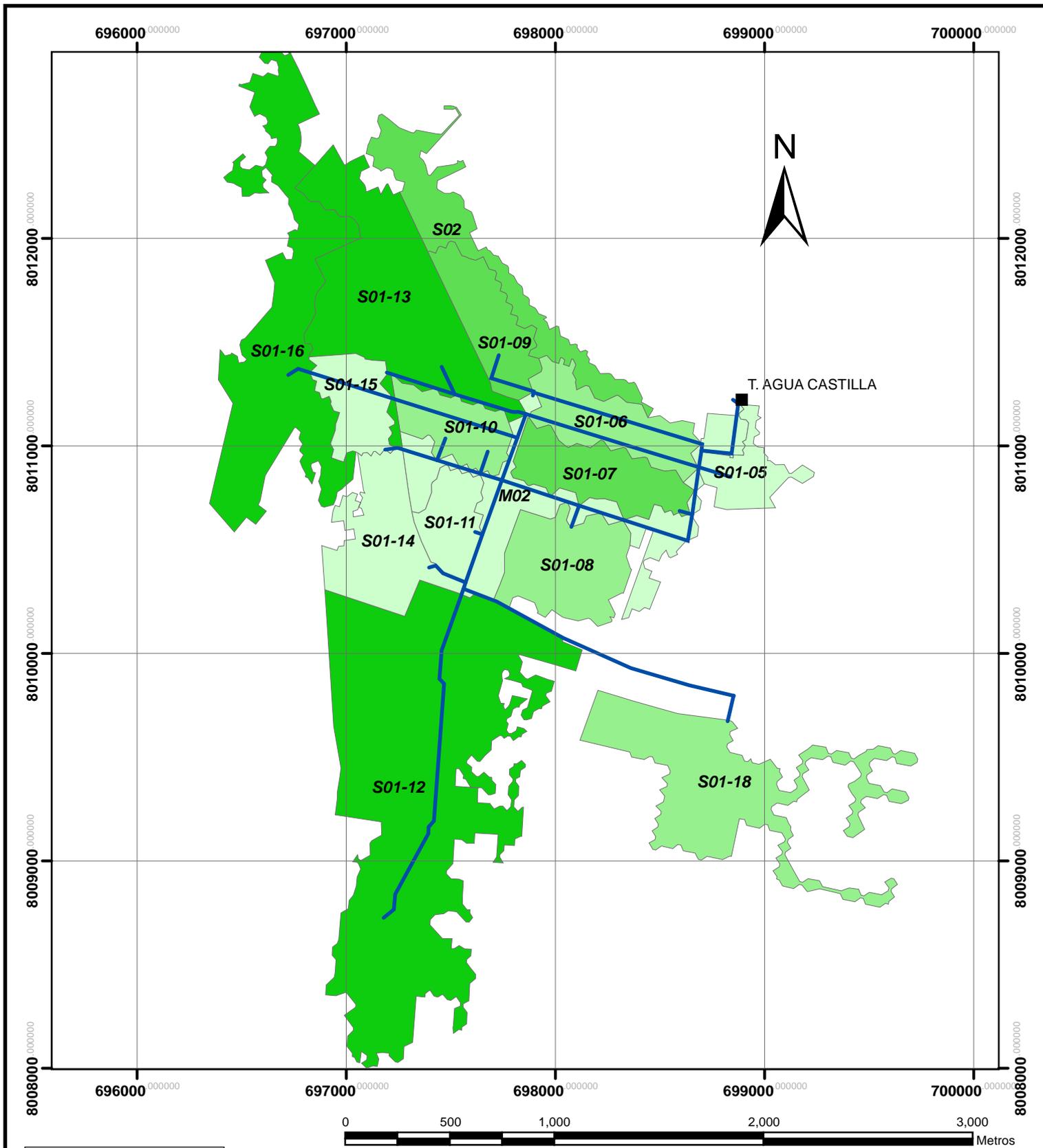
REFERENCIAS	
SECTORES	
Presión (mca)	
	0.00 - 4.44
	4.44 - 20.06
	20.06 - 30.02
	30.02 - 41.70

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	LAMINA:	CRITERIO 1: PRESIÓN DE SERVICIO
	METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE, CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO (BOLIVIA)	
FECHA:	ESCALA:	3/9
JULIO DE 2014	1:25,000	



REFERENCIAS	
SECTORES	
Peso criterio Presión	
	0.000 - 0.005
	0.005 - 0.059
	0.059 - 0.089
	0.089 - 0.125

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	LAMINA:	
	PESO NORMALIZADO DEL CRITERIO 1: PRESIÓN DE SERVICIO	
METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE, CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO (BOLIVIA)		
FECHA:	ESCALA:	4/9
JULIO DE 2014	1:25,000	



REFERENCIAS	
SECTORES	
Número de Usuarios	
	147 - 276
	276 - 467
	467 - 593
	593 - 1085



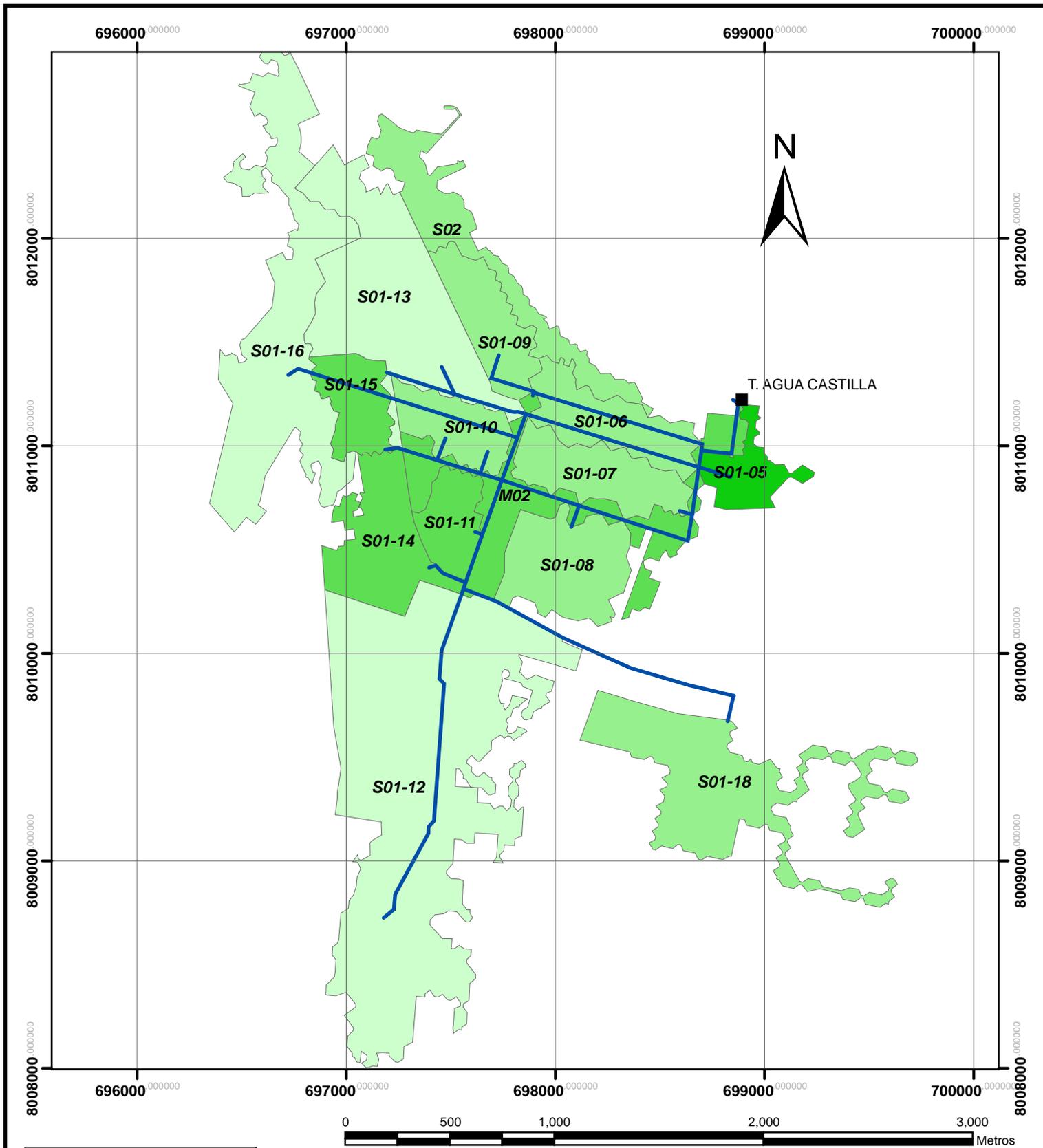
LAMINA:
CRITERIO 2: NÚMERO DE USUARIOS O CLIENTES

METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE,
CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO (BOLIVIA)

FECHA:
JULIO DE 2014

ESCALA:
1:25,000

5/9



REFERENCIAS	
SECTORES	
P. criterio Num. usuarios	
	0.022 - 0.026
	0.026 - 0.063
	0.063 - 0.114
	0.114 - 0.164



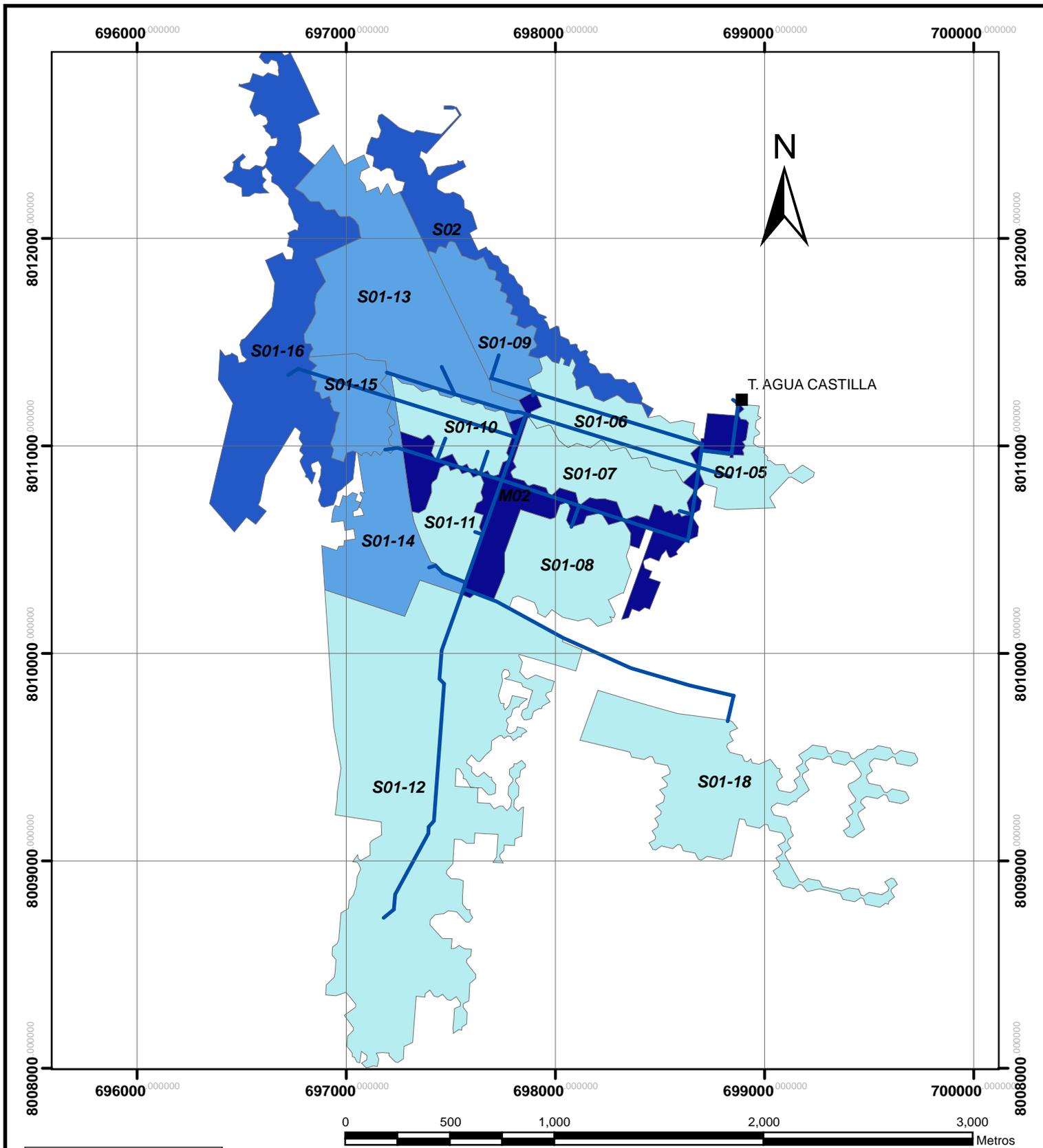
LAMINA: PESO NORMALIZADO DEL CRITERIO 2:
NÚMERO DE USUARIOS O CLIENTES

METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE,
CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO (BOLIVIA)

FECHA:
JULIO DE 2014

ESCALA:
1:25,000

6/9



REFERENCIAS	
SECTORES	
Horas de suministro	
	4 - 5
	5 - 8
	8 - 12
	12 - 14



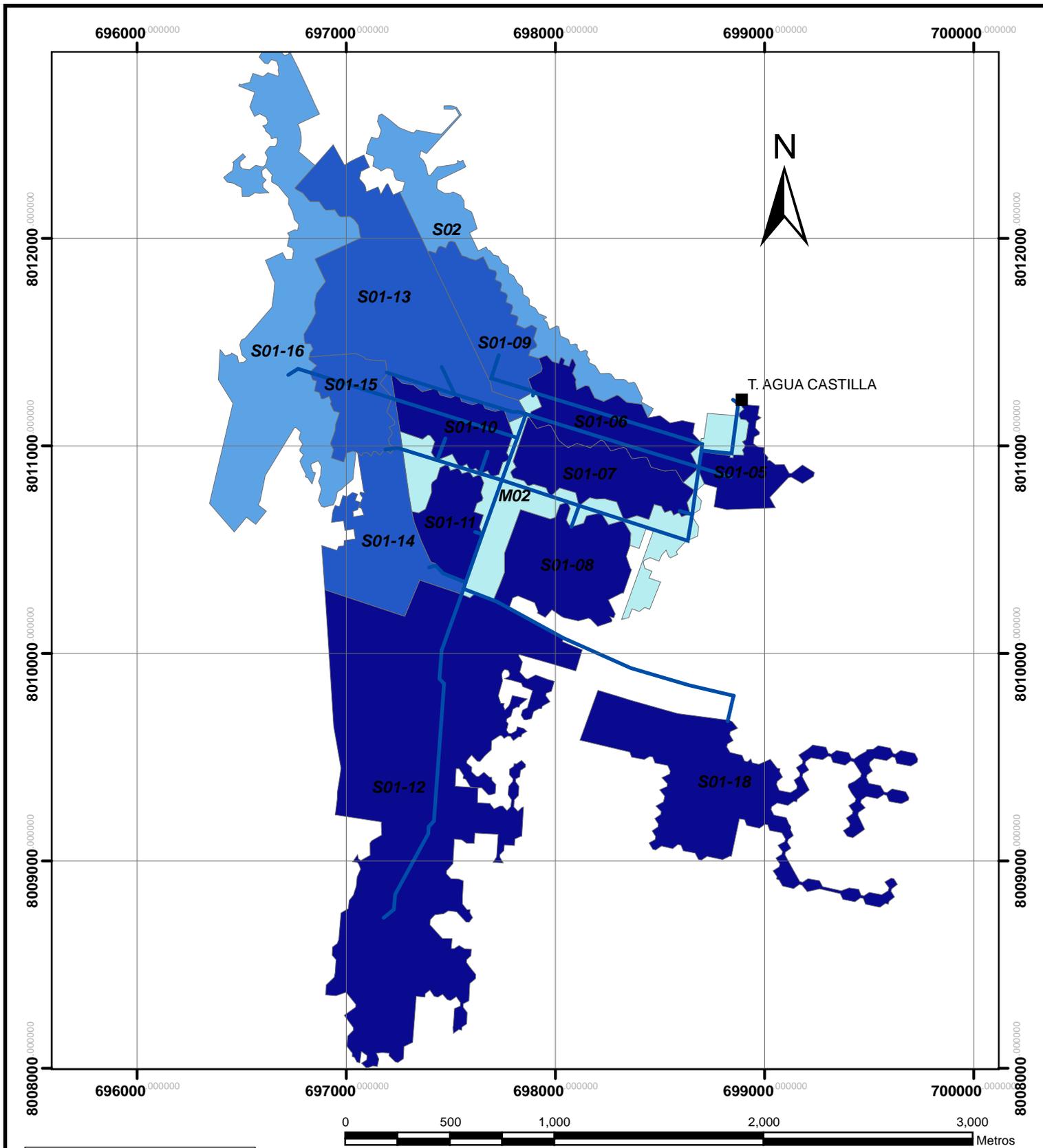
LAMINA: **CRITERIO 3: HORAS DE SUMINISTRO**

METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE, CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO (BOLIVIA)

FECHA: JULIO DE 2014

ESCALA: 1:25,000

7/9



REFERENCIAS

SECTORES

P. criterio Horas de sum.

- Menor a 0.029
- 0.029 - 0.038
- 0.038 - 0.052
- 0.052 - 0.104



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

LAMINA:

**PESO NORMALIZADO DEL CRITERIO 3:
HORAS DE SUMINISTRO**

**METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO EN
SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE,
CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO (BOLIVIA)**

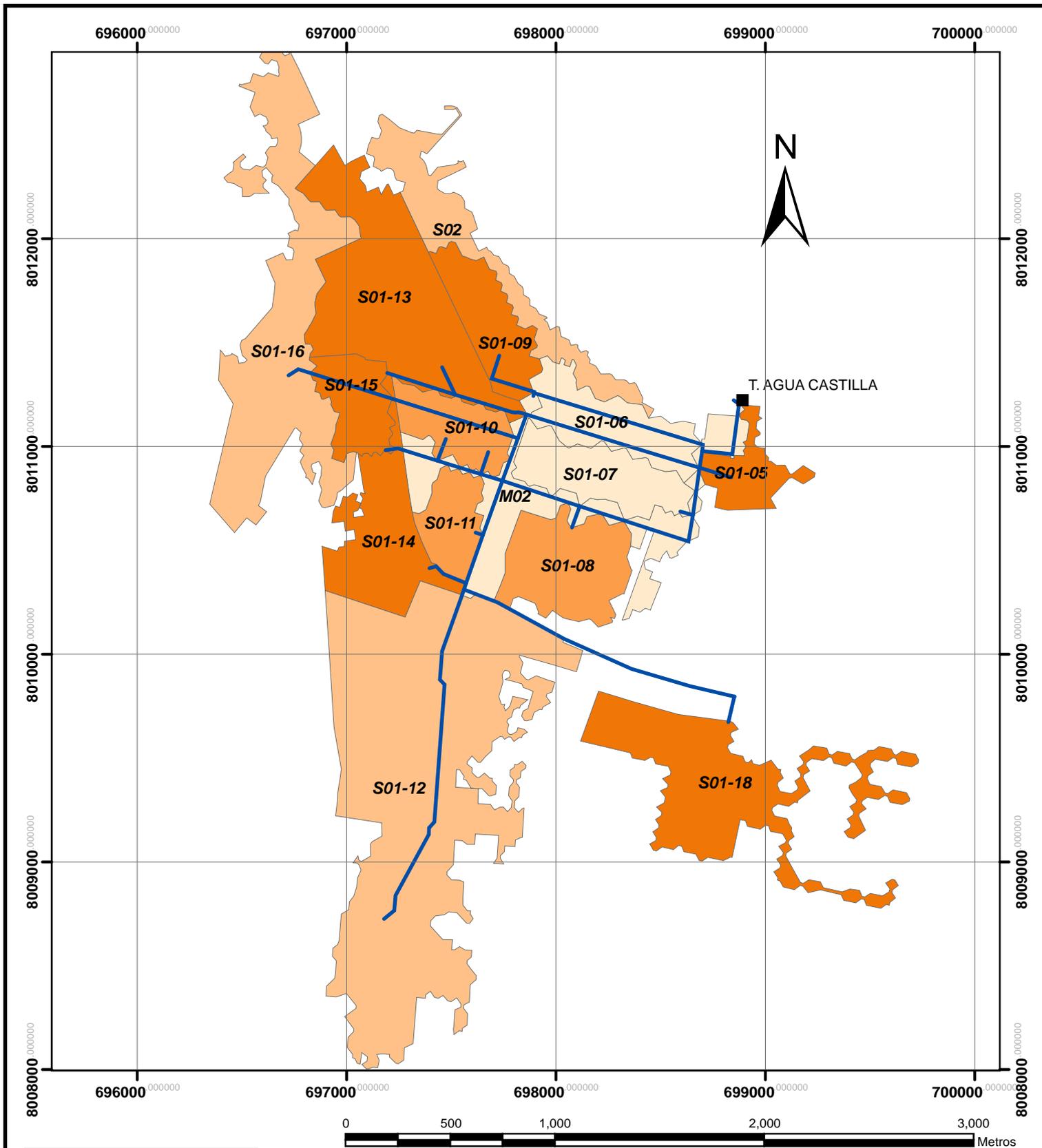
FECHA:

JULIO DE 2014

ESCALA:

1:25,000

8/9



REFERENCIAS

SECTORES

P. criterio Facilidad oper.

- 0.010 - 0.034
- 0.034 - 0.055
- 0.055 - 0.079
- 0.079 - 0.094



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

LAMINA:

PESO NORMALIZADO DEL CRITERIO 4:
FACILIDAD EN LA OPERACIÓN DEL SECTOR

METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN DE HORARIOS DE SUMINISTRO EN
SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO INTERMITENTE,
CASO DE ESTUDIO: ZONA SUR DE LA CIUDAD DE ORURO (BOLIVIA)

FECHA:

JULIO DE 2014

ESCALA:

1:25,000

9/9