



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Análisis energético y estrategias de optimización para el sistema de abastecimiento de agua potable de los sectores Virgen del cisne y 25 de Julio de la ciudad de Guayaquil (Ecuador).

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Coello Montoya, Ramiro Alberto

Tutor/a: Gómez Sellés, Elena

Cotutor/a: Del Teso March, Roberto

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS ENERGÉTICO Y ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LOS SECTORES “VIRGEN DEL CISNE” y “25 DE JULIO” DE LA CIUDAD DE GUYAQUIL (ECUADOR)

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

RAMIRO ALBERTO COELLO MONTOYA

Tutor:

ELENA GÓMEZ SELLÉS

Cotutor/es:

ROBERTO DEL TESO MARCH

SEPTIEMBRE, 2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

RESUMEN DEL TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Datos del proyecto	
Alumno: RAMIRO ALBERTO COELLO MONTOYA	E-mail: racoemon@posgrado.upv.es
Título del TFM en español: Análisis energético y estrategias de optimización para el sistema de abastecimiento de agua potable de los sectores "Virgen del Cisne" y "25 de Julio" de la ciudad de Guayaquil (Ecuador)	
Título del TFM en inglés: Energy analysis and proposal for improving the drinking water supply system of the "Virgen del Cisne" y "25 de Julio" sectors of the Guayaquil city (Ecuador)	
Título del TFM en Valenciano: Anàlisi energètica i estratègies d'optimització per al sistema de proveïment d'aigua potable dels sectors "Verge del Cigne" i "25 de Juliol" de la ciutat de *Guayaquil (l'Ecuador)	
Tutor: ELENA GÓMEZ SELLES	
Cotutor: ROBERTO DEL TESO MARCH	
Fecha de Lectura: SEPTIEMBRE, 2022	

Resumen
<p>Ante el estrés hídrico y el deterioro del medio ambiente debido a los gases de efecto de invernadero, se hace imperativo trabajar sobre estos dos ejes, que históricamente no han sido trabajados de forma unificada.</p> <p>El uso de energía en los sistemas de agua potable tiene un peso importante, ya que usamos energía para su captación, potabilización, conducción y distribución hasta los usuarios. Cuando se usa energía para abastecer a los usuarios del líquido vital, en sectores con deficiencia hídrica, así como energética, se da lugar a un gasto del recuso limitado que afecta ambientalmente, y económicamente a las empresas gestoras del servicio de agua potable.</p> <p>El presente trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo analizar la gestión hídrica y energética de un abastecimiento de agua potable y presentar alternativas de optimización; mediante cuatro fases: diagnóstico de la red, auditoría al sistema de abastecimiento, propuesta de medidas correctivas y análisis del costo-beneficio de estas medidas.</p> <p>El caso de estudio analiza la eficiencia hídrica y energética de un sistema de abastecimiento de agua potable de dos sectores de la ciudad de Guayaquil (Ecuador), denominados como Virgen del Cisne y 25 de Julio.</p> <p>La red de agua potable de "Virgen del Cisne", se abastece mediante un tanque de almacenamiento, que recibe el agua desde un sistema de bombeo ubicado en un punto bajo de la red. Por su parte el sector de "25 de Julio" se abastece mediante sistema booster, el mismo que capta agua del tanque ya mencionado. Estos sistemas de abastecimiento de agua potable presentan presiones de servicio muy por encima de la mínima requerida de 15 mca. La zona de Virgen del Cisne cuenta con un rendimiento del 78% y presiones promedio que van desde los 15 mca. hasta 45 mca. Así mismo, la red de 25 de Julio tiene un rendimiento del 53% y las presiones promedio varían de 15 mca a 100 mca.</p>

En la fase de diagnóstico se definirá el margen de mejora de estos abastecimientos, para posteriormente, mediante el uso de un modelo matemático de la red realizar la auditoria a dicho abastecimiento.

Mediante el uso del programa EPANET se pretende representar la realidad de campo para construir y calibrar dicho modelo, y en el cual se representará diferentes estrategias de optimización hídrica y energética para estos sistemas. Al final del trabajo se evaluará el costo-beneficio de estas estrategias asociadas a su impacto en la reducción de las pérdidas de agua potable y por consecuencia en el consumo energético.

Palabras clave: Energía, hídrica, eficiencia, Guayaquil, agua

Abstract

Given the water stress and the deterioration of the environment due to greenhouse gases, it is imperative to work on these two axes, which historically have not been worked on in a unified way.

The use of energy in drinking water systems has an important weight, since we use energy for its collection, potabilization, conduction and distribution to users. When energy is used to supply the users of the vital liquid, in sectors with water and energy deficiency, it results in a limited resource expenditure that affects environmentally and economically the companies that manage the drinking water service.

The objective of this Master's thesis is to analyze the water and energy management of a drinking water supply and to present optimization alternatives; through four phases: diagnosis of the network, audit of the supply system, proposal of corrective measures and cost-benefit analysis of these measures.

The case study analyzes the water and energy efficiency of a drinking water supply system in two sectors of the city of Guayaquil (Ecuador), called Virgen del Cisne and 25 de Julio.

The drinking water network of "Virgen del Cisne" is supplied by a storage tank, which receives water from a pumping system located at a low point of the network. The "25 de Julio" sector is supplied by a booster system, which draws water from the aforementioned tank. These potable water supply systems have service pressures well above the required minimum of 15 mca. The Virgen del Cisne area has an efficiency of 78% and average pressures ranging from 15 mca. to 45 m.c.a. Likewise, the 25 de Julio network has an efficiency of 53% and average pressures varying from 15 mca. to 100 m.c.a.

In the diagnostic phase, the margin for improvement of these supplies will be defined, in order to later, through the use of a mathematical model of the network, carry out the audit of said supply.

Through the use of the EPANET program, we intend to represent the field reality to build and calibrate this model, and in which different water and energy optimization strategies for these systems will be represented. At the end of the work, the cost-benefit of these strategies associated to their impact on the reduction of drinking water losses and consequently on energy consumption will be evaluated.

Keywords: Energy, hydric, efficiency, Guayaquil, water

Resum

Davant l'estrés hídric i la deterioració del medi ambient degut als gasos d'efecte d'hivernacle, es fa imperatiu treballar sobre aquests dos eixos, que històricament no han sigut treballats de forma unificada.

L'ús d'energia en els sistemes d'aigua potable té un pes important, ja que usem energia per a la seua captació, potabilització, conducció i distribució fins als usuaris. Quan s'usa energia per a proveir als usuaris del líquid vital, en sectors amb deficiència hídrica, així com energètica, es dona lloc a una despesa del recuse limitat que afecta ambientalment, i econòmicament a les empreses gestores del servei d'aigua potable.

El present treball de Fi de Màster té com a objectiu analitzar la gestió hídrica i energètica d'un proveïment d'aigua potable i presentar alternatives d'optimització; mitjançant quatre fases: diagnòstic de la xarxa, auditoria al sistema de proveïment, proposta de mesures correctives i anàlisi del cost-benefici d'aquestes mesures.

El cas d'estudi analitza l'eficiència hídrica i energètica d'un sistema de proveïment d'aigua potable de dos sectors de la ciutat de Guayaquil (l'Equador), denominats com a Verge del Cigne i 25 de Juliol.

La xarxa d'aigua potable de "Verge del Cigne", es proveeix mitjançant un tanc d'emmagatzematge, que rep l'aigua des d'un sistema de bombament situat en un punt baix de la xarxa. Per la seua part el sector de "25 de Juliol" es proveeix mitjançant sistema booster, el mateix que capta aigua del tanc ja esmentat. Aquests sistemes de proveïment d'aigua potable presenten pressions de servei molt per damunt de la mínima requerida de 15 mca. La zona de Verge del Cigne compta amb un rendiment del 78% i pressions mitjanes que van des dels 15 mca. fins a 45 mca. Així mateix, la xarxa de 25 de Juliol té un rendiment del 53% i les pressions mitjanes varien de 15 mca a 100 mca.

En la fase de diagnòstic es definirà el marge de millora d'aquests proveïments, per a posteriorment, mitjançant l'ús d'un model matemàtic de la xarxa realitzar l'auditoria a aquest proveïment.

Mitjançant l'ús del programa EPANET es pretén representar la realitat de camp per a construir i calibrar aquest model, i en el qual es representarà diferents estratègies d'optimització hídrica i energètica per a aquests sistemes. Al final del treball s'avaluarà el cost-benefici d'aquestes estratègies associades al seu impacte en la reducció de les pèrdues d'aigua potable i per conseqüència en el consum energètic.

Paraules clau: Energia, hídrica, eficiència, Guayaquil, aigua

INDICE DE CONTENIDO

1.	OBJETIVOS.....	1
1.1	OBJETIVO GENERAL.....	1
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
2	JUSTIFICACIÓN.....	2
3	MARCO TEÓRICO.....	5
3.1	MODELO HIDRÁULICO DE LA RED.....	5
3.2	AUDITORÍA HÍDRICA.....	8
3.3	AUDITORÍA ENERGÉTICA.....	11
3.4	ESTRATEGIAS PARA GESTIÓN DE PÉRDIDAS.....	18
3.4.1	SECTORIZACIÓN.....	18
3.4.2	REGULACIÓN DE PRESIONES.....	19
3.4.3	REGULACIÓN DE ESTACIONES DE BOMBEO.....	19
4	MODELO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE.....	21
4.1	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	21
4.2	INFORMACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	23
4.2.1	CAUDAL INYECTADO.....	24
4.2.2	DEPÓSITO.....	25
4.2.3	ESTACIÓN DE BOMBEO.....	25
4.2.4	VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESIÓN.....	27
4.2.5	INFORMACIÓN COMERCIAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	27
4.3	TOPOLOGÍA DE LA RED.....	28
4.4	ASIGNACIÓN DE DEMANDAS.....	30
4.4.1	ASIGNACIÓN DE DEMANDAS INDEPENDIENTES DE LA PRESIÓN.....	30
4.4.2	ASIGNACIÓN DE DEMANDAS DEPENDIENTES DE LA PRESIÓN.....	32
4.5	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELO HIDRAULICO.....	33
4.5.1	CALIBRACIÓN DE MODELO HIDRÁULICO.....	33
4.5.2	VALIDACION DE MODELO HIDRAULICO.....	40
5	ANÁLISIS DE CONDICIÓN ACTUAL DEL SISTEMA.....	42
5.1	ESTADO DE INFRAESTRUCTURA DEL SISTEMA.....	42
5.2	ANÁLISIS DE PRESIONES.....	43
5.3	ANÁLISIS DE PÉRDIDAS UNITARIAS.....	44
5.4	AUDITORÍA HÍDRICA.....	45
5.5	AUDITORÍA ENERGÉTICA.....	49
6	ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL SISTEMA.....	53
6.1	ESTRATEGIA 1: SECTORIZACION DE RED.....	53
6.2	ESTRATEGIA 2: REGULACION DE PRESION.....	59

6.2.1	Ajuste de Válvulas reguladoras de presión.....	60
6.2.2	Instalación de nuevas válvulas reguladoras de presión.....	61
6.3	ESTRATEGIA 3: CAMBIO DE BOMBAS.....	65
6.4	RESULTADOS OBTENIDOS.....	70
6.5	EVALUACION ECONOMICA.....	73
6.5.1	ESTRATEGIA 1: SECTORIZACIÓN.....	73
6.5.2	ESTRATEGIA 2: REGULACIÓN DE PRESIONES.....	74
6.5.3	ESTRATEGIA 3: CAMBIO DE BOMBAS.....	74
6.5.4	AHORRO POR REDUCCION DE AGUA Y ENERGIA.....	74
6.5.5	TIR Y VAN.....	75
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	76
8	BIBLIOGRAFÍA.....	78

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Tendencias en la producción de energía en las regiones del mundo	2
Figura 2.2: Demanda mundial de agua (extracción de agua dulce): escenario de referencia, 2000 y 2050	2
Figura 2.3: Consumos de energía en las diferentes etapas del ciclo del agua	4
Figura 3.1: Volumen de control para auditoría energética	12
Figura 3.2: Notación utilizada para los nudos y líneas de la red de distribución	14
Figura 3.3: Componentes de la energía entregada a los usuarios	16
Figura 4.1: Imagen satelital del área de estudio	21
Figura 4.2: Esquema de abastecimiento de agua potable	22
Figura 4.3: Plano referencial de sectores en la zona de estudio	23
Figura 4.4: Curva de bomba, modelo 430 -2.5 x 3 x 12.....	26
Figura 4.5: Curva de bomba, modelo 420 -2 x 4 x 9.....	27
Figura 4.6: Topología de la red en modelo hidráulico.....	29
Figura 4.7: Modelo digital del terreno de la zona de estudio.....	30
Figura 4.8: Polígonos de Thiessen usados para asignación de demandas	31
Figura 4.9: Patrón del caudal inyectado al sistema a gravedad.....	31
Figura 4.10: Patrón del caudal inyectado al sistema de bombeo directo a red	32
Figura 4.11: Embalse para calibración de sistema con bombeo directo a red	33
Figura 4.12: Comprobación de calibración en iteración 0 en sistema a gravedad para determinación del coeficiente emisor de fuga	34
Figura 4.13: Comprobación de calibración en iteración 0 en sistema de bombeo directo a red para determinación del coeficiente emisor de fuga	35
Figura 4.14: Comprobación de calibración en iteración 4 para calibración del sistema a gravedad para determinación del coeficiente emisor de fuga.....	36
Figura 4.15: Comprobación de calibración en iteración 4 en sistema de bombeo directo a red para determinación del coeficiente emisor de fuga	36
Figura 4.16: Comprobación de la calibración de la iteración 1 en sistema a gravedad para estimación del patrón de consumo.....	38
Figura 4.17: Comprobación de la calibración de la iteración 1 en sistema de bombeo directo a red para estimación del patrón de consumo.....	38
Figura 4.18: Comprobación de la calibración de la iteración 3 en sistema a gravedad para estimación del patrón de consumo.....	39
Figura 4.19: Comprobación de la calibración de la iteración 3 en sistema de bombeo directo a red para estimación del patrón de consumo.....	39
Figura 5.1: Distribución de cota en zona de implantación de red en estudio	42
Figura 5.2: Presión mínima en red de distribución	43
Figura 5.3: Presión máxima en red de distribución.....	44
Figura 5.4: Pérdidas unitarias promedio m/km en red de distribución	45
Figura 5.5: Balance energético del sistema.....	50
Figura 6.1: Cota máxima para abastecimiento desde reservorio	54
Figura 6.2: Plano de nueva sectorización.....	55
Figura 6.3: Presión mínima en red de distribución con nueva sectorización.....	57
Figura 6.4: Presión máxima en red de distribución con nueva sectorización	58
Figura 6.5: Modulación de caudal en el sistema a Gravedad con la nueva sectorización....	59

Figura 6.6: Modulación de caudal en el sistema bombeo directo a red con la nueva sectorización.....	59
Figura 6.7: Presión mínima en red de distribución con instalación de VRP	62
Figura 6.8: Presión máxima en red de distribución con instalación de VRP	63
Figura 6.9: Modulación de caudal en el sistema a Gravedad con estrategia de VRP	64
Figura 6.10: Modulación de caudal en el sistema bombeo directo a red con estrategia de VRP	64
Figura 6.11 Curva de bomba PENTAIR PVM(X)5-15	66
Figura 6.12: Zona útil de la bomba PENTAIR PVM(X)5-15	66
Figura 6.13: Curva de bomba PENTAIR PVM(X)10-10	67
Figura 6.14: Zona útil de la bomba PENTAIR PVM(X)10-10	68
Figura 6.15: Presión mínima en red de distribución con regulación de estación de bombeo	69
Figura 6.16: Presión máxima en red de distribución con regulación de estación de bombeo	70
Figura 6.17: Disminución de caudal en el sistema con la aplicación de estrategias	71

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Nivel de precisión de ajuste.....	7
Tabla 3.2: Balance hídrico de la IWA	8
Tabla 3.3: Indicadores pérdidas de agua operacionales	9
Tabla 3.4: Matriz objetivo de pérdidas físicas.....	11
Tabla 3.5: Balance energético obtenido a partir de la ecuación integral de la energía	15
Tabla 3.6: Indicadores de eficiencia energética.....	15
Tabla 4.1: Información de sectorización	23
Tabla 4.2: Información de caudal inyectado por sistema.....	24
Tabla 4.3: Información del depósito	25
Tabla 4.4: Detalle de bomba de estación baja.....	25
Tabla 4.5: Detalle de bomba de estación directa a red.....	26
Tabla 4.6: Información de válvulas reguladoras de presión.....	27
Tabla 4.7: Información comercial de la zona de estudio.....	28
Tabla 4.8: Información de la red existente.....	28
Tabla 4.9: Parámetros iniciales para cálculo de coeficiente emisor de fuga	32
Tabla 4.10: Determinación de coeficiente emisor global de fuga en iteración 0.....	34
Tabla 4.11: Iteración 4 para determinación de coeficiente emisor de fuga	35
Tabla 4.12: Determinación del nudo representativo de presión promedio	37
Tabla 4.13: Nivel de precisión del parámetro de caudal	40
Tabla 4.14: Nivel de precisión del parámetro de presión.....	40
Tabla 5.1: Diferencia de cota en sectores hidráulicos	42
Tabla 5.2: Balance hídrico IWA. Sistema a gravedad “Virgen del Cisne”	46
Tabla 5.3: Balance hídrico IWA. Bombeo directo a red “25 de julio”.....	47
Tabla 5.4: Balance hídrico IWA. Sistema total.....	48
Tabla 5.5: Indicadores de pérdidas físicas o reales.....	49
Tabla 5.6: Balance energético del sistema total en kWh/semana.....	50
Tabla 5.7: Componentes de la energía útil entregada a usuarios.....	51
Tabla 5.8: Indicadores de eficiencia energética.....	51
Tabla 5.9: Detalle de energía en sistemas de bombeo.....	52
Tabla 6.1: Datos para cálculo de cota máxima de abastecimiento por el sistema a gravedad	53
Tabla 6.2: Identificación de tubería cerradas y adicionadas	55
Tabla 6.3: Diferencia de cota en nueva sectorización	56
Tabla 6.4: Auditoría hídrica con nueva sectorización	58
Tabla 6.5: Detalle de presiones en horario de máximo consumo	60
Tabla 6.6: Ajuste de válvulas reguladoras de presión existente.	61
Tabla 6.7: Válvulas reguladoras de presión nuevas	61
Tabla 6.8: Auditoría hídrica con instalación de VRP.....	63
Tabla 6.9 Detalle de bomba 1 de estación directa a red.....	65
Tabla 6.10: Detalle de bomba 2 de estación directa a red.....	67
Tabla 6.11: Balance hídrico IWA. Sistema total.....	71
Tabla 6.12: Indicadores de pérdidas físicas o reales.....	72
Tabla 6.13: Disminución de la energía suministrada al sistema con la aplicación de estrategias	72
Tabla 6.14: Presupuesto referencial de sectorización	73

Tabla 6.15: Presupuesto referencial de instalación de válvula reguladora de presión.....	74
Tabla 6.16: Presupuesto referencial de instalación de bombas con variador de frecuencia	74
Tabla 6.17: Ahorro en producción de agua potable.....	74
Tabla 6.18: Ahorro en consumo energético.....	74
Tabla 6.19: Datos para cálculo de TIR y VAN	75

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Proponer estrategias de optimización del sistema de abastecimiento de agua potable de los sectores “Virgen del Cisne” y “25 de Julio” de la ciudad de Guayaquil (Ecuador)

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

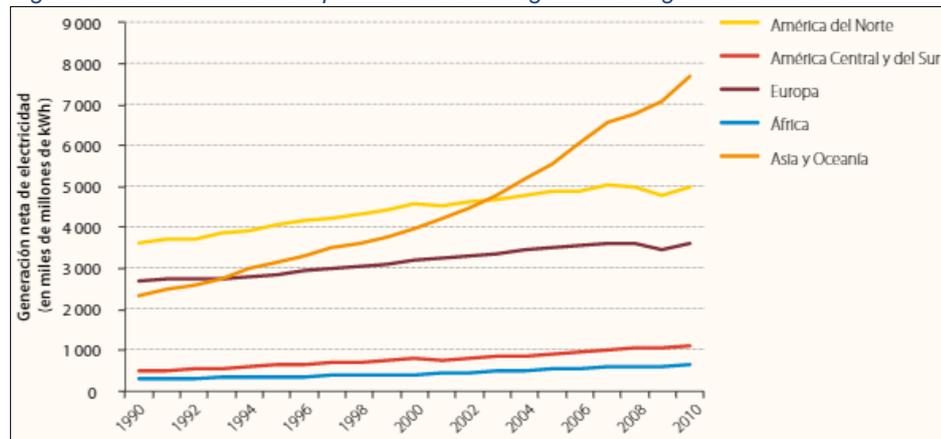
- Construir y calibrar el modelo matemático del sistema de abastecimiento de agua potable de los sectores “Virgen del Cisne” y “25 de Julio” de la ciudad de Guayaquil.
- Realizar el análisis de la situación actual en cuanto a su dimensionamiento, caudales y presiones y pérdidas unitarias.
- Realizar la auditoría hídrica del abastecimiento de agua potable.
- Realizar la auditoría energética del abastecimiento de agua potable.
- Proponer estrategias de mejora para el sistema de abastecimiento.

2 JUSTIFICACIÓN

Es indiscutible que el desarrollo industrial y económico trae consigo un acelerado crecimiento de la demanda sobre los recursos naturales y también representa un factor agravante sobre el medio ambiente puesto que la emisión de gases de efecto invernadero acusa los efectos del cambio climático que en algunos países ya se refleja con estrés hídrico, por lo que a priori se intuye una futura lucha por los recursos disponibles.

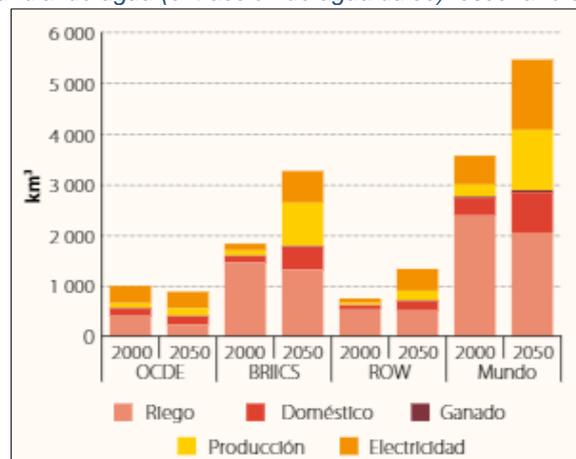
La Figura 2.1 muestra, por ejemplo, el incremento en la demanda de energía eléctrica en las diferentes regiones del mundo, en mayor o menor proporción, la tendencia ha sido incrementar. A la vez que en la Figura 2.2 se encuentra la proyección de demanda de agua a 2052, a nivel mundial es evidente que la tendencia también se encuentra en aumento.

Figura 2.1: Tendencias en la producción de energía en las regiones del mundo



Fuente: UNECA, con datos de US Energy Information Administration 'International Energy Statistics'
Tomado de: (NACIONES UNIDAS, 2014)

Figura 2.2: Demanda mundial de agua (extracción de agua dulce): escenario de referencia, 2000 y 2050



Fuente: OECD (Organization for Economic Co-operation and Development).
Tomado de: (NACIONES UNIDAS, 2014)

Se prevé que la demanda mundial de extracción de agua aumentará cerca de un 55% para el año 2050 de manera que la disponibilidad de agua dulce estará sometida a mayor presión, con lo cual, para ese año, más de un 40% de la población mundial vivirá en zonas con severos problemas hídricos (NACIONES UNIDAS, 2014).

La Asociación internacional de energía, señala que para el 2035 el consumo mundial de energía crecerá en un 35% y el consumo de agua del sector eléctrico se incrementará en un 85%, especialmente en países en desarrollo (BANCO MUNDIAL, 2014).

Pero, por otro lado, a pesar del desarrollo económico, existen todavía millones de personas en el mundo que no tienen acceso a servicios básicos como agua potable y energía.

A nivel mundial se estima que 768 millones de personas no tienen acceso a una fuente mejorada de suministro de agua y más de 1300 millones de personas todavía carecen de acceso a la electricidad (NACIONES UNIDAS, 2014).

Estos dos recursos agua y energía, son interdependientes ya que se requiere de agua para la generación de energía y de energía para la dotación de agua a los usuarios, es decir existe el nexo agua-energía y este a su vez interactúa con el cambio climático, debido a que el consumo de energía aumenta la emisión de gases de efecto invernadero (Cabrera et al., 2011).

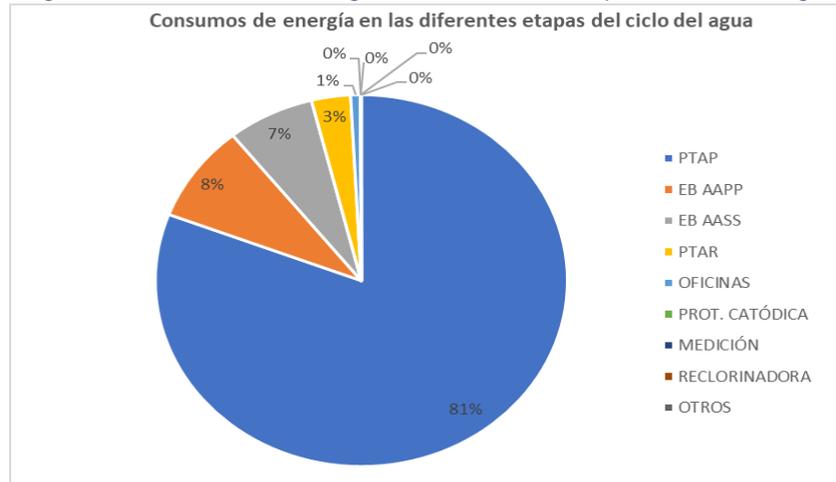
Según el Registro de Gestión de Agua Potable y Alcantarillado del 2019, para ese año, en Ecuador existen un total de 1184 fuentes de agua cruda registradas, el 45% son fuentes superficiales y el 55% son fuentes subterráneas, entre las principales fuentes están pozos profundos, vertientes, quebradas, ríos y arroyos.

De acuerdo a la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) hasta junio del 2019, Ecuador posee una capacidad instalada de producción eléctrica de 8668.62 MW, donde la generación hidráulica es la más elevada con representación del 58.53% de la capacidad nacional de producción eléctrica (Palacios, 2019).

Un sistema de agua potable implica captar agua desde una fuente sea ésta superficial o subterránea y transportarla hasta una planta de tratamiento para su potabilización, una vez el agua esté apta para su consumo se distribuye a la población. Este proceso desde su captación hasta su distribución demanda un consumo energético, que dependiendo de la estructura de la red y la topografía de la zona, puede ser representativa en mayor o menor proporción para cada proceso.

En la ciudad de Guayaquil, Ecuador, el mayor consumo energético corresponde al proceso de captación y potabilización, otros procesos como distribución representan menos del 10% de la energía consumida.

Figura 2.3: Consumos de energía en las diferentes etapas del ciclo del agua



Fuente: VEOLIA-ECUADOR

Siendo conscientes que el llevar agua potable hasta el grifo de cada usuario trae detrás los insumos químicos que se emplearon para su tratamiento, el gasto en personal técnico y administrativo para control del proceso, gasto en energía eléctrica consumido por equipos de bombeo principalmente, entonces es deducible que si existen pérdidas de agua potable en el sistema, se pierde también todo aquello.

Según el boletín estadístico de la Agencia de Regulación y Control de Agua (ARCA), en Ecuador el promedio nacional del porcentaje de agua no contabilizada asciende al 47.69%, un porcentaje sumamente considerable, prácticamente la mitad del agua se está perdiendo (ARCA, 2020).

Para gestionar las pérdidas de agua potable es indispensable contar con un modelo matemático de la red, el cual permita obtener una auditoría hídrica y energética para conocer la disposición final de agua y energía respectivamente y a partir de este análisis plantear las estrategias más adecuadas para la optimización del sistema de manera tal que su funcionamiento garantice un uso adecuado de dichos recursos.

En base a todo lo expuesto, se justifica el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 MODELO HIDRÁULICO DE LA RED

Un modelo hidráulico de una red simula mediante ecuaciones matemáticas el comportamiento del sistema, las cuales proporcionan información sobre el caudal y presión de la red. La fiabilidad de que un modelo hidráulico refleje la realidad tiene que ver con el ajuste del mismo, proceso que se conoce como calibración, el mismo que depende de los datos recopilados en el campo y a su vez de dicha fiabilidad irá ligada al uso que se va a dar al modelo (Hirrel, 2008).

Para la elaboración del modelo hidráulico existen hoy en día varios programas, sin embargo, para el desarrollo de este trabajo se usa Epanet 2.0 dado que es de libre acceso.

Epanet es un programa que permite realizar simulaciones del comportamiento hidráulico de una red de suministro de agua a presión, así como la calidad del agua. Una red de suministro está constituida por bombas, válvulas, uniones, tuberías y fuentes (ya sea esta un embalse o un depósito), todo esto puede representarse en dicho programa y con la configuración de sus respectivos parámetros (Rossman et al., 2001).

Para construir un modelo matemático, (Fuertes et al., 2002) refiere las siguientes fases:

- Recopilación de información (aquí aplica planos de la red, planos topográficos, sistemas de bombeo, base de usuarios, consumos facturados, etc)
- Esqueletización de la red, esto es simplificar la red real de tuberías.
- Análisis y asignación de consumos tanto registrados como no registrados. En cuanto a estos últimos, implica estudiar cómo se hará la simulación de la distribución de fugas, errores de medición, acometidas ilegales, etc.
- Mediciones de presión y caudal en algunos puntos de la red.
- Ajuste del modelo a partir de las mediciones realizadas sobre la red, a fin de lograr que el modelo reproduzca con cierto grado de fiabilidad las condiciones reales del sistema de abastecimiento. Este último punto supone un proceso iterativo de ajuste de parámetros por ejemplo de los coeficientes que se utilizan para modelación de hidráulica de fugas, al final de dicho proceso se espera obtener un modelo calibrado.

La modelación de fugas en Epanet se realiza mediante emisores ya que responden a la hidráulica de fugas de descarga a través de un orificio. Los emisores son dispositivos asociados a los nudos que permiten modelar el caudal de salida a través de un orificio descargando a la atmósfera, el cual varía en función de la presión en el nudo, acorde con la ecuación 1 (Rossman et al., 2001):

$$Q = C p^\alpha \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde Q =caudal, p = presión, C =coeficiente de descarga y α es el exponente de la presión que puede ir entre 0.5 y 2 dependiendo si se trata de materiales rígidos o materiales plásticos respectivamente, puesto que el aumento de presión puede incrementar la sección de fuga y variar el coeficiente de descarga.

Según (Lalonde & -Veritec, 2010), para un área fija circular el exponente puede asumirse igual a 0.5 pero en un área de descarga variable en una tubería flexible este coeficiente es mayor o igual a 1.5.

En un estudio realizado en 1989 para controlar las sobrepresiones en una red, se adoptó que las fugas se distribuyen uniformemente a lo largo de una tubería y que pueden modelarse con la ecuación 2 (Germanopoulos & Jowitt, 1989).

$$Q = \beta_L L_{ij} (\bar{P}_{ij})^\alpha \quad [\text{Ec. 2}]$$

De la ecuación 2, se tiene que β_L es el coeficiente de fuga por unidad de longitud. L_{ij} es la longitud de la tubería con extremos i y j , \bar{P}_{ij} es la presión promedio entre los nudos i y j de la tubería y α es el exponente de fuga.

Existe en cantidad literatura sobre calibración de modelos, pero se referencia en este trabajo a (Molina, 2014) con "Metodología para la calibración preliminar de modelos de redes de distribución de agua mediante la utilización conjunta de demandas y consumos dependientes de la presión", porque fue aplicada con éxito a otros sectores hidráulicos del abastecimiento de la ciudad de Guayaquil. Este autor se enfoca en calibrar el coeficiente emisor global de fugas, determinar los coeficientes de modulación del patrón de consumo para la demanda base, ajustar los coeficientes de pérdidas y calibrar los emisores de fuga distribuidos en los nudos del modelo.

El resumen del proceso de calibración planteado por (Molina, 2014) se enlista a continuación:

1. Preparar los datos para calibración, verificando la mayor precisión posible y realizar la asignación de las demandas independientes de la presión es decir el consumo de los usuarios con su respectivo patrón, inicialmente determinado a partir del caudal inyectado al sistema.
2. Realizar una estimación inicial del emisor global de fugas y una primera simulación para obtener la presión promedio de toda la red en todos los instantes de simulación. Utilizar este valor junto con el teórico de agua no registrada para calcular el coeficiente emisor global de fugas y distribuirlo equitativamente a cada nudo del modelo. Nuevamente simular.
3. Revisar y evaluar la precisión de la estimación del caudal de fugas simulado, contrastando con el caudal teórico de agua no registrada. Si no es preciso se tendrá que ajustar el valor del coeficiente emisor mediante un factor de corrección. Se incorporan estos coeficientes emisores corregidos y se simula nuevamente. (Es un proceso iterativo hasta cumplir los criterios mencionados).

4. Determinar los coeficientes del patrón de consumo correspondiente a la demanda base, asignar ese patrón calculado y realizar una nueva simulación.
5. Repetir paso 3.
6. Distribuir espacialmente el coeficiente global de fugas entre los nudos del modelo hidráulico, a partir del coeficiente de fuga por unidad de longitud de tuberías, calculado para cada sector de la red. Simular nuevamente.
7. Revisar y evaluar la precisión de la estimación del caudal de fugas simulado, esto se compara con el caudal teórico de agua no registrada. De ser necesario, ajustar el valor de la sumatoria de los coeficientes emisores de fugas mediante un factor de corrección, Se incorpora estos emisores corregidos y nuevamente simular.
8. Evaluar la precisión de las presiones simuladas, comparando estos valores con los medidos.
9. Repetir paso 7.
10. Determinar una vez más los coeficientes del patrón de consumo para la demanda base, y asignar este nuevo patrón calculado. Realizar una nueva simulación.
11. Repetir el paso 7.

Una vez realizado el proceso descrito se obtendrá un modelo calibrado cuyo nivel de precisión puede ser validado bajo los lineamientos que establece la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Nivel de precisión de ajuste

Uso del modelo	Nivel de detalle	Tipo de simulación	Medidas presión	Exactitud en medidas presión	Medidas caudal	Exactitud en medidas caudal
Planificación	Bajo	Dinámico	10% de nudos	± 3.5 mca para el 100% de medidas	1% de tuberías	$\pm 10\%$
Diseño	Medio Alto	Dinámico	5% a 2% de nudos	± 1.4 mca para el 90% de medidas	3% de tuberías	$\pm 5\%$
Operación de red	Bajo Alto	Dinámico	10% a 2% de nudos	± 1.4 mca para el 90% de medidas	2% de tuberías	$\pm 5\%$
Calidad agua	Alto	Dinámico	2% de nudos	± 2.1 mca para el 70% de medida	5% de tuberías	$\pm 2\%$

Fuente: (Fuentes et al, 2002)

3.2 AUDITORÍA HÍDRICA

Una red de distribución de agua potable puede tener pérdidas de agua en sus tuberías, accesorios o en las acometidas que llegan hasta cada usuario. Por tanto, conocer el destino final del agua que ha sido introducida a la red, resulta conveniente a fin de determinar acciones a tomar.

Una herramienta para determinar el destino del agua dentro de la red, es el balance hídrico de la IWA (International Water Association) que se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Balance hídrico de la IWA

Volumen de entrada al sistema [m ³ /año]	Consumo autorizado [m ³ /año]	Consumo autorizado facturado [m ³ /año]	Consumo facturado medido (incluyendo agua exportada) [m ³ /año]	Agua facturada [m ³ /año]
			Consumo facturado no medido [m ³ /año]	
		Consumo autorizado no facturado [m ³ /año]	Consumo no facturado medido [m ³ /año]	Agua no facturada [m ³ /año]
			Consumo no facturado no medido [m ³ /año]	
	Pérdidas de agua [m ³ /año]	Pérdidas aparentes [m ³ /año]	Consumo no autorizado [m ³ /año]	
			Imprecisiones de medida [m ³ /año]	
		Pérdidas reales [m ³ /año]	Pérdidas reales en conducciones de agua bruta y en tareas de tratamiento (si procede) [m ³ /año]	
			Fugas en transporte y/o conducciones de distribución [m ³ /año]	
Fugas y desbordamientos en transporte y/o depósitos de almacenamiento [m ³ /año]				
Fugas en acometidas hasta el punto de medida [m ³ /año]				

Fuente: (Alegre y col, 2000). Tomado de (Cabrera Marcet, 2005)

Con medición continua del caudal suministrado a la red y con datos de los medidores de los usuarios, se puede obtener el desglose detallado de los consumos tal como requiere el balance de la IWA.

Este balance descompone el volumen de entrada al sistema en dos componentes principales, el consumo autorizado y las pérdidas de agua.

El consumo autorizado a su vez se divide en dos componentes en función de la facturación o no facturación y las pérdidas de agua se componen tanto por pérdidas aparentes como pérdidas reales.

Las pérdidas aparentes se subdividen en consumo no autorizado (debido al robo de agua y conexiones ilegales) e imprecisiones de medida o manejo erróneo de datos, mientras que las pérdidas reales se constituyen por fugas en tuberías y acometidas, al igual que reboses en depósitos de almacenamiento (GIZ & VAG, 2011).

Siendo para las empresas gestoras uno de los principales objetivos, proveer agua potable de calidad y cantidad adecuada, con la presión de servicio requerida y en cualquier momento, las fugas representan una barrera para cumplir ese objetivo debido a que tiene impactos negativos sobre el sistema en aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales (GIZ & VAG, 2011).

Para monitorear y gestionar las pérdidas de agua, es necesario emplear indicadores. En base al manual de desempeño de la IWA, la empresa Interagua Cia. Ltda tiene como referencia los siguientes indicadores.

Tabla 3.3: Indicadores pérdidas de agua operacionales

Indicador	Descripción	Unidades	Valor admisible
IPF 1: Pérdidas reales por longitud	Pérdidas reales, expresadas en términos del volumen diario medio perdido por longitud de red.	l/s/km	0.12
IPF 2: Pérdidas reales por longitud y presión	Pérdidas reales, expresadas en términos del volumen diario medio perdido por longitud de red y presión promedio	l/s/km/bar	0.04
IPF 3: Pérdidas reales por acometida	Pérdidas reales, expresadas en términos del volumen diario medio perdido por acometida.	l/conexión/h	5
Índice de fugas estructural	Relación entre las pérdidas reales actuales y una estimación de las pérdidas reales mínimas que podrían lograrse técnicamente con la presión de funcionamiento del sistema, la longitud media de las acometidas y la densidad de acometidas	adimensional	4

Fuente: Interagua Cia. Ltda, con base en (IWA, 2017)

En cuanto al índice de fugas estructural, es necesario describir su composición, este se determina mediante la ecuación 3.

$$IFE = \frac{VIF}{UMF} \quad [\text{Ec. 3}]$$

La idea base de este indicador es relacionar el precedente nivel real de pérdidas de un sistema con el valor de otro indicador referido al estado óptimo de ese sistema, el UMF. Desde el punto de vista de las fugas, el IFE representa la capacidad de mejora

de un sistema (Cabrera et al., 2013). Es decir, este indicador sirve para comparar un abastecimiento contra la mejor versión de sí mismo.

Para obtener este indicador previamente debe determinarse el volumen incontrolado fugado (VIF) y el umbral mínimo de fugas (UMF), mediante las ecuaciones 4 y 5.

$$VIF = \frac{V_{if}}{\text{día} * N_a} \quad [\text{Ec. 4}]$$

La ecuación 4 representa el volumen incontrolado fugado expresado en l/día/acometida.

$$UMF = \frac{(A * L_t + B * N_a + C * L_a) p}{N_a} \quad [\text{Ec. 5}]$$

Con:

A, B y C : Coeficiente que ponderan la influencia del parámetro que acompañan.

L_t : Longitud total de las tuberías de distribución de la red (km).

N_a : Número total de acometidas existentes.

L_a : Longitud total de las acometidas existentes (km).

p : Presión promedio del sistema (mca)

El umbral mínimo de fugas debe contemplar los factores de riesgo de un sistema para esas fugas, entre estos se consideran la longitud de red, número de acometidas, longitud total de acometidas y la presión promedio del sistema (Cabrera et al., 2013). La ponderación de esos factores se da mediante los coeficientes A, B y C .

Las constantes A, B y C se calcularon a partir de un análisis estadístico de datos de 27 abastecimientos procedentes de 20 países diferentes (A.O. Lambert et al., 1999), resultando en:

$$A = 18$$

$$B = 0.8$$

$$C = 25$$

En países en desarrollo, el valor del IFE puede ser muy importante (Cabrera et al., 2013). De hecho, los valores referenciales que existen para este indicador, diferencian a los países desarrollados y aquellos en vías de desarrollo, tal como señala (Liemberger et al., 2007).

Tabla 3.4: Matriz objetivo de pérdidas físicas

CATEGORÍA DE RENDIMIENTO TÉCNICO	IFE	PÉRDIDAS FÍSICAS (l/conexión/día) (cuando el sistema está presurizado), en una presión promedio de:					
		10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	
PAÍSES DESARROLLADOS	A	1 - 2		<50	<75	<100	<125
	B	2 - 4		50 - 100	75 - 150	100 - 200	125 - 250
	C	4 - 8		100 - 200	150 - 300	200 - 400	250 - 500
	D	>8		>200	>300	>400	>500
PAÍSES EN VÍAS DE DESARROLLO	A	1 - 4	<50	<100	<150	<200	<250
	B	4 - 8	50 - 100	100 - 200	150 - 300	200 - 400	250 - 500
	C	8 - 16	100 - 200	200 - 400	300 - 600	400 - 800	500 - 1000
	D	>16	>200	>400	>600	>800	>1000

Fuente:(Liemberger et al., 2007)

Esta tabla tiene como enfoque el mostrar cómo la reducción de sobrepresiones puede reducir las pérdidas reales (físicas). La interpretación de las categorías según (Liemberger et al., 2007) es:

Categoría A: una mayor reducción de pérdidas puede ser antieconómica a menos que haya escasez.

Categoría B: posibilidades de mejora adicional.

Categoría C: mala gestión de fugas, tolerable sólo si los recursos son abundantes y baratos.

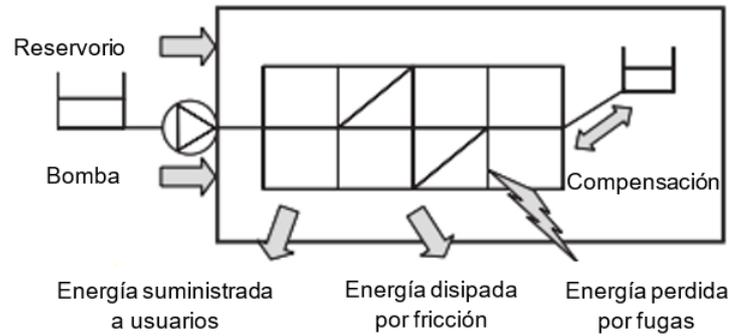
Categoría D: uso muy ineficiente de los recursos, indicativo de mantenimiento y sistema deficientes.

3.3 AUDITORÍA ENERGÉTICA

La auditoría energética contabiliza cómo se está consumiendo la energía que le es suministrada al sistema desde cabecera para que llegue hasta cada uno de los usuarios. Para conseguir esa descomposición se requiere previamente conocer el flujo del agua en la red, esto será a partir de un modelo matemático.

El trabajo "Energy Audit of Water Networks" (Cabrera et al., 2010), presenta la auditoría energética de una red de agua, obtenida a partir de la ecuación de la energía de forma integral y su integración a un determinado período extendido. Este trabajo indica las asunciones que pueden hacerse para una red de distribución de agua y las condiciones de contorno que aplican a un balance de potencias para el volumen definido.

Figura 3.1: Volumen de control para auditoría energética



Fuente: (Cabrera et al., 2010)

De tal manera, se obtiene la ecuación 6.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int \int \int_{CV} e \rho \delta V + \int \int_{CS} e \rho (\vec{v} * \vec{dA}) \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde $\frac{dE}{dt}$ representa la suma de intercambio térmico y de trabajo por unidad de tiempo entre el medio externo y el sistema, e es la energía total por unidad de masa y ρ es la densidad del agua.

Desarrollando el término de la energía unitaria se obtiene una nueva forma para la ecuación 6 que se considera más adecuada para el sistema analizado.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W_{eje}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int \int \int_{CV} \left(gz + u + \frac{v^2}{2} \right) \rho \delta V + \int \int_{CS} \left(\frac{p}{\rho} + gz + u + \frac{v^2}{2} \right) \rho (\vec{v} * \vec{dA}) \quad [\text{Ec. 7}]$$

La ecuación 7 se puede simplificar admitiendo las siguientes asunciones:

1. El agua es incompresible y su densidad ρ constante.
2. El flujo de calor a través de la superficie de control (las tuberías de la red) es nulo, es decir $\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$, hipótesis razonable pues generalmente el diferencial de temperatura entre el terreno que cubre la tubería y el flujo dentro de ésta, es prácticamente nulo. Si no hay transferencia de calor, la fricción aumentará ligeramente la temperatura del agua fluyendo.
3. El trabajo aportado por las bombas es el trabajo de eje, es decir $\frac{\partial W_{eje}}{\partial t} = \sum_i^{np} \gamma Q_i H_{pi}$.
4. El término cinético $\frac{v^2}{2}$ es despreciable, como en la mayoría de los análisis de redes.
5. El análisis energético que se realiza es cuasiestático con una integración de período extendido. En cada intervalo de cálculo, la energía dentro del volumen de control es constante en lo que concierne a tuberías y su variación temporal nula, mientras que la energía almacenada por depósitos internos puede cambiar.
6. El flujo es uniforme en las superficies de entrada y salida.

En estas condiciones la ecuación de la energía se escribe como muestra la ecuación 8.

$$\sum_i^{np} \gamma Q_i H_{pi} = \rho g \frac{\delta}{\delta t} \iiint_{V_C} z dV + \rho \sum_{Salidas} Q_{si} \left[\frac{P_{si}}{\rho} + g z_{si} + u_{si} \right] - \rho Q_E \left[\frac{P_E}{\rho} + g z_E + u_E \right]$$

[Ec. 8]

La energía aportada por los embalses se considera como energía natural al igual que la proporcionada por depósitos, con la diferencia que esta última tiene una cota variable en el tiempo, por el contrario, la energía que proviene de las bombas se considera una energía artificial (Cabrera et al., 2010).

En cuanto a los flujos de energía que salen por los nudos, la energía se refleja en la altura piezométrica, resultando así para un nudo de demanda i , $H_{si} = \frac{P_{si}}{\gamma} + z_{si}$. Este valor depende de la referencia del sistema para las cotas, siendo aconsejable utilizar como referencia $z = 0$, el nudo más bajo del sistema (Cabrera et al., 2010).

A partir de lo expuesto, para un sistema que se alimenta desde n_N embalses, con n_p bombeos y con n_C depósitos de compensación, se obtiene la ecuación 9.

$$P_o = \sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni} + \sum_i^{n_p} \gamma Q_{Pi} H_{Pi} = \sum_{Salidas} \gamma Q_{Si} H_{Si} + \rho \left[\sum_{Salidas} Q_{Si} u_{Si} - Q_N u_N \right] + \gamma \frac{\delta}{\delta t} \iiint_{V_C} z dV$$

[Ec. 9]

La ecuación 9 puede expresarse de forma más compacta, tal como sugiere la ecuación 10.

$$P_N + P_P = P_U + P_L + P_F \pm \Delta P_C \quad [\text{Ec. 10}]$$

Los términos se relacionan entre las ecuaciones 9 y 10 de la siguiente manera:

- La potencia natural que los embalses y depósitos entregan al sistema es:

$$P_N = \sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni}$$

- La potencia suministrada por las bombas es:

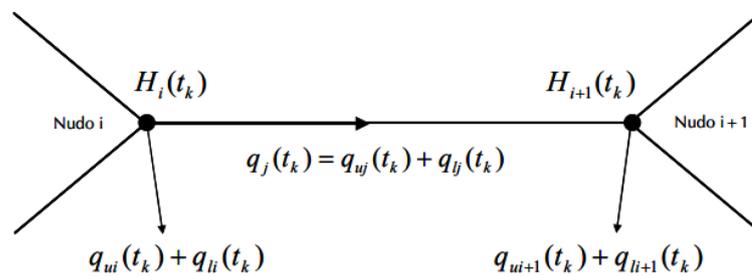
$$P_P = \sum_i^{n_p} \gamma Q_{Pi} H_{Pi}$$

- La potencia total suministrada, P_o es la suma de las dos anteriores.

- El término $\sum_{Salidas} \gamma Q_{Si} H_{Si}$ es la potencia que sale por medio de los nudos del sistema, suma de la potencia entregada a los usuarios (potencia útil, P_U) más las pérdidas de potencia resultantes de las fugas de la red, P_L .
- El término $\rho[\sum_{Salidas} Q_{Si} u_{Si} - Q_N u_N]$ es la variación con el tiempo de la energía interna del agua en el interior del sistema. Como no se consideró intercambio de calor con el entorno, ese aumento en la energía interna corresponde a las pérdidas por fricción, P_F .
- Finalmente, el término $\Delta P_C = \gamma \frac{\delta}{\delta t} \iiint_{V_C} z dV$ representa la variación unitaria en el tiempo de la energía potencial de los depósitos que están dentro del sistema.

La ecuación 10 puede integrarse en el tiempo, convirtiendo los términos de potencia en términos de energía, considerando una notación que permita identificar el origen de cada término, el elemento de la red y el intervalo de tiempo en referencia, todo esto de acuerdo con la Figura 3.2.

Figura 3.2: Notación utilizada para los nudos y líneas de la red de distribución



Fuente: (Cabrera et al., 2010)

En esta notación, se refieren los significados de los diferentes términos:

1. $q_{ui}(t_k), q_{li}(t_k)$ representan el caudal suministrado y caudal de fuga entregado en el nudo i en el momento t_k .
2. $q_{uj}(t_k), q_{lj}(t_k)$ representan el caudal suministrado y caudal de fuga que circula en línea j en el momento t_k .
3. $H_i(t_k)$ es la altura piezométrica en el nudo i en el momento t_k .

De manera tal que se obtiene la ecuación 11.

$$E_{entrada} = E_N(t) + E_p(t) = E_U(t) + E_L(t) + E_F(t) + E_{wp}(t) + \Delta E_C(t) \quad [\text{Ec. 11}]$$

De la ecuación 11, se describe a continuación cada uno de los términos:

E_U : es la energía entregada en los nudos de consumo, para cumplir con el caudal demandado a la presión suministrada.

E_L : es la energía embebida en fugas.

E_F : es la energía disipada por la fricción del agua con la tubería y elementos del sistema.

E_{wp} : es la energía que se pierde en función del rendimiento de las bombas.

ΔE_C : es la energía que se almacena en los depósitos, cuando éstos existen en la red.

Estos términos que se han descrito pueden ser calculados haciendo uso de las fórmulas de la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Balance energético obtenido a partir de la ecuación integral de la energía

ENERGÍA CONSUMIDA kWh	Energía útil	Energía útil entregada a los usuarios $E_u(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left(\sum_{i=1}^n q_{ui}(t_k) \cdot h_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k$
	Pérdidas de energía	Energía perdida en fugas $E_l(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left(\sum_{i=1}^n q_{li}(t_k) \cdot h_i(t_k) \right) \cdot \Delta t_k$
		Energía perdida por fricción $E_f(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left(\sum_{j=1}^{nl} (q_{ij}(t_k) + q_{lj}(t_k)) \Delta h_j(t_k) \right) \cdot \Delta t_k$
		Energía perdida en estaciones de bombeo $E_{wp}(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left(\sum_{i=1}^{np} q_{pi}(t_k) \cdot h_{pi}(t_k) \left(1 - \frac{1}{\eta_{pi}(t_k)} \right) \right) \cdot \Delta t_k$
ENERGÍA ENTREGADA kWh	Energía suministrada por las bombas $E_p(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left(\sum_{i=1}^n \frac{q_{pi}(t_k) \cdot h_{pi}(t_k)}{\eta_{pi}(t_k)} \right) \cdot \Delta t_k$	
	Energía suministrada natural $E_n(t_p) = \gamma \cdot \sum_{t_k=0}^{t_k=t_p} \left(\sum_{i=1}^n q_{ni}(t_k) \cdot h_{ni}(t_k) \right) \cdot \Delta t_k$	
	Energía de compensación $\Delta E_c(t_p) = \frac{\gamma A}{2} (z^2(t_f) - z^2(t_i))$	

Fuente: (Tomás Pérez, 2019)

Este balance puede utilizarse para obtener indicadores que permitan evaluar el sistema desde el punto de vista energético. A partir de estos indicadores, es posible identificar las acciones de mejora que harán que el sistema sea más eficiente. Por tal motivo se revisa los indicadores de eficiencia energética.

Tabla 3.6: Indicadores de eficiencia energética

Indicador	Descripción	Fórmula
I_1	Exceso de energía suministrada	Energía entregada / Energía mínima requerida
I_2	Eficiencia energética de la red	Energía útil / Energía entregada
I_3	Energía disipada por fricción	Energía disipada por fricción / Energía entregada
I_4	Energía perdida por fugas	Energía disipada por fugas / Energía entregada
I_5	Cumplimiento de estándares	Energía útil / Energía mínima requerida

Fuente: (Cabrera et al., 2010)

El indicador I_1 es la relación entre la energía que entra en el sistema y la energía mínima requerida, esto permite ver la relación entre el total de energía entregada y la energía estrictamente necesaria.

I_2 es una medida de la eficiencia del uso de la energía entregada al sistema, respecto a qué fracción de la energía total aportada es útil.

I_3 mide la energía disipada por fricción por tanto representa la capacidad hidráulica de la red.

I_4 mide la pérdida de energía debido a las fugas, que resulta de la suma de la pérdida de energía a través del agua fugada y la energía adicional necesaria para superar la fricción con el aumento del caudal necesario para superar las fugas.

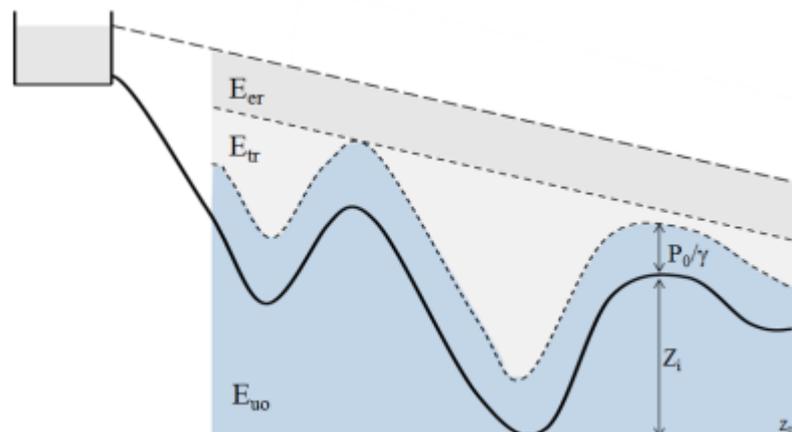
Por último, I_5 se trata de un indicador a nivel de red que promedia el estado general del sistema. Relaciona la energía útil entregada a los usuarios con la energía mínima requerida.

Como es notorio, dos indicadores hacen referencia a la energía mínima requerida, por lo que ahora se verá de dónde proviene este término.

La energía útil debería ser la mínima requerida para así evitar, en lo posible, suministrar más presión de la requerida. Por otro lado, es necesario conocer que la energía entregada a los usuarios tiene tres componentes que son: energía mínima requerida (E_{uo}), energía topográfica (E_{tr}) y energía de exceso (E_{er}) (del Teso et al., 2017), tal como muestra la Figura 3.3.

E_{uo} es la energía que debe suministrarse a los usuarios para cumplir con el volumen demandado a la presión de servicio requerida (zona azul de la Figura 3.3), E_{tr} es la demanda energética del sistema debido a las irregularidades del terreno por ende la que se debe aportar para alcanzar, con la presión de servicio requerida, la cota del nudo crítico, pero afectando a los nudos de menor cota por someterlos a una sobrepresión (zona gris claro) y finalmente E_{er} es el exceso sobre la energía mínima requerida en el nudo crítico y por consecuencia en los nudos restantes (del Teso et al., 2017).

Figura 3.3: Componentes de la energía entregada a los usuarios



Fuente: (del Teso et al., 2017)

Acorde con (del Teso et al., 2019), las siguientes ecuaciones permiten obtener los términos que componen la energía útil entregada a los usuarios.

Energía mínima requerida:

$$E_{uo} = \gamma \sum_{j=1}^n v_{c,j} \left[(z_j - z_l) + \frac{p_{o,j}}{\gamma} \right] \quad [\text{Ec. 12}]$$

Donde:

γ = peso específico del agua

n = número de usuarios

$v_{c,j}$ = volumen consumido por el nudo j durante el período considerado

z_j = cota del nudo j

z_l = cota del nudo más bajo del sistema (referencia)

$\frac{p_{o,j}}{\gamma}$ = presión de servicio requerida en el nudo j

Energía topográfica:

$$E_{tr} = \gamma \sum_{j=1}^n v_{g,j} \left[\frac{p_j}{\gamma} + \frac{p_{o,j}}{\gamma} \right] - E_{er,j} \quad [\text{Ec. 13}]$$

Donde:

γ = peso específico del agua

n = número de usuarios

$v_{g,j}$ = volumen consumido más volumen fugado en el nudo j durante el período considerado

$\frac{p_j}{\gamma}$ = presión suministrada en el nudo j

$\frac{p_{o,j}}{\gamma}$ = presión de servicio requerida en el nudo j

$E_{er,j}$ = energía de exceso

Energía de exceso:

$$E_{er} = \gamma \sum_{j=1}^n v_{g,j} \left[\frac{P_{min}}{\gamma} + \frac{p_{o,j}}{\gamma} \right] \quad [\text{Ec. 14}]$$

Donde:

γ = peso específico del agua

n = número de usuarios

$v_{g,j}$ = volumen consumido más volumen fugado en el nudo j durante el período considerado

$\frac{p_{\min}}{\gamma}$ = presión mínima en el sistema

$\frac{p_{o,j}}{\gamma}$ = presión de servicio requerida en el nudo j

Cuando un sistema es abastecido por una fuente de energía variable, esto es que su altura de suministro puede gestionarse y variar en función de las necesidades de los usuarios a lo largo del tiempo (ejemplo una estación de bombeo directo a red con variadores de frecuencia), toda presión por encima de la presión de servicio del nudo más desfavorable se considera presión de exceso y por ende energía de exceso suministrada (del Teso March, 2020).

Por el contrario, si se trata de una fuente de energía rígida, como un depósito, ese exceso se considera que no puede ser gestionado desde la fuente de suministro, por lo tanto, la energía suministrada por encima de la mínima requerida por el nudo más desfavorable se considere energía topográfica y no energía de exceso (del Teso March, 2020).

3.4 ESTRATEGIAS PARA GESTIÓN DE PÉRDIDAS

Para gestionar las pérdidas tanto de agua como de energía, es necesario por un lado tener un mayor control operativo de la red de distribución que permita tener información para la toma de decisiones. Por tanto, en cuanto a gestión de pérdidas reales, dos estrategias que se pueden implementar son la sectorización y regulación de presiones.

En cuanto a gestionar pérdidas de energía, al gestionar las pérdidas reales estamos en consecuencia gestionado pérdida de energía disipada por fugas y fricción, además se puede también gestionar las pérdidas en la estación de bombeo mediante su regulación, teniendo allí una tercera estrategia disponible.

Se describe brevemente a continuación, en qué consiste cada estrategia.

3.4.1 SECTORIZACIÓN

La sectorización consiste en dividir una red de distribución en un área limitada e independiente con un abastecimiento controlado, esto con el fin de tener un mayor control operativo y detectar cualquier anomalía (Campbell, 2013), entre los objetivos que se persiguen con esta estrategia están:

- Realizar auditorías para monitorear el rendimiento de la red.
- Estudiar y caracterizar demandas.
- Estudiar la evolución del caudal mínimo nocturno lo cual facilitará la detección de fugas.

- Promover la gestión de presión, instalando válvulas reductoras de presión en sus entradas.
- Detectar fraude, posibles errores de medición y submedición.
- Establecer planes de inversión para intervenir en sectores con menor rendimiento.

3.4.2 REGULACIÓN DE PRESIONES

La presión excesiva agrava el riesgo de nuevas roturas en una red de agua potable. Como se conoce de la hidráulica de fugas, de acuerdo con la ecuación 1, es evidente que tener presión excesiva en la red ocasiona excesivo caudal de fuga, por lo tanto, si se reduce la presión en la red se puede reducir las fugas.

La regulación de presión comprende en un ajuste de este parámetro a un nivel óptimo que permita cumplir con la presión de servicio requerida en el punto crítico de la red, considerando que éste puede variar dependiendo las condiciones del sistema a lo largo del tiempo, por otro lado, evitar las presiones excesivas en horas de bajo consumo disminuirá el riesgo de roturas (GIZ & VAG, 2011).

La regulación de presiones se puede conseguir mediante la instalación de válvulas reguladoras de presión al ingreso de los sectores hidráulicos y también mediante la regulación de una estación de bombeo en caso de que se abastezca directamente a la red (GIZ & VAG, 2011).

3.4.3 REGULACIÓN DE ESTACIONES DE BOMBEO

La regulación de estaciones de bombeo permite optimizar tanto el rendimiento hidráulico de la red como el rendimiento energético del sistema. Para esto, se busca que las bombas trabajen en zona de máximo rendimiento y su presión de salida se ajuste a la curva de consigna del sistema. (Martínez et al., 1996)

La curva de consigna de un sistema es la altura piezométrica mínima requerida en cabecera para asegurar la presión de servicio requerida en el punto crítico de la red.

Existen cuatro métodos de regulación, los cuales se detallan a continuación:

La regulación de una estación de bombeo se puede realizar instalando una válvula a la salida de la estación para provocar pérdidas con el objetivo de reducir la presión a la salida de la estación de bombeo. Como este método busca provocar pérdidas/disipar energía por medio de la válvula no es eficiente energéticamente, aunque logra reducir las presiones elevadas en la red. (Martínez et al., 1996)

Otro método de regulación de bombas consiste en la instalación de una tubería de by-pass junto con una válvula, en este caso la bomba se mantiene entregando el mismo caudal en un punto de funcionamiento alto rendimiento y el exceso de caudal no

demandado por la red es recirculado hacia el depósito de aspiración. (Martínez et al., 1996).

La tercera forma de regulación es mediante la combinación en paralelo de varias bombas de velocidad fija. Este método de regulación presenta mejor rendimiento que los dos anteriores, pero para caudales bajos puede presentar bajo rendimiento. En curvas de bombas que no se tenga recubrimiento es necesario la utilización de calderín. Esta forma de regulación permite acercarse mejor a la curva de consigna. (Fuertes et al., 2002)

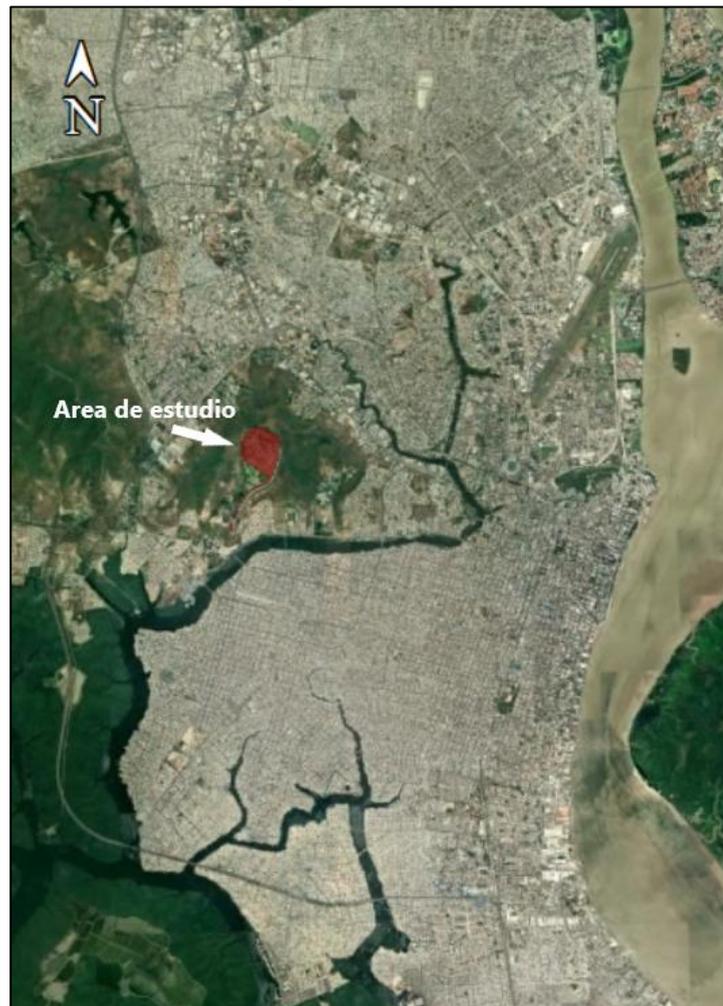
Por último, se tiene la regulación de estación de bombeo mediante el uso de bombas con variador de frecuencia, que permiten modificar la velocidad de giro de las bombas para cumplir con la curva de consigna. Cuando la velocidad de giro se aleja de la velocidad nominal por cumplir caudales bajos, el rendimiento de la bomba disminuye considerablemente, por lo que se combinan bombas en paralelo para cumplir con los caudales mínimos. La combinación de bombas en paralelo puede ser de una bomba fija con variables o todas las bombas variables. (Fuertes et al., 2002)

4 MODELO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE

4.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el oeste de la ciudad de Guayaquil, se ubican los sectores denominados “Virgen del Cisne” y “25 de Julio”, los cuales abarcan un área total de 40 hectáreas y se encuentran asentados sobre zona de topografía irregular. Como parte del proyecto de expansión del sistema de agua potable de la ciudad de Guayaquil, en el año 2014 se instalaron redes de material PEAD, se instaló una estación de bombeo para abastecer a un nuevo reservorio y una estación de bombeo directo a red.

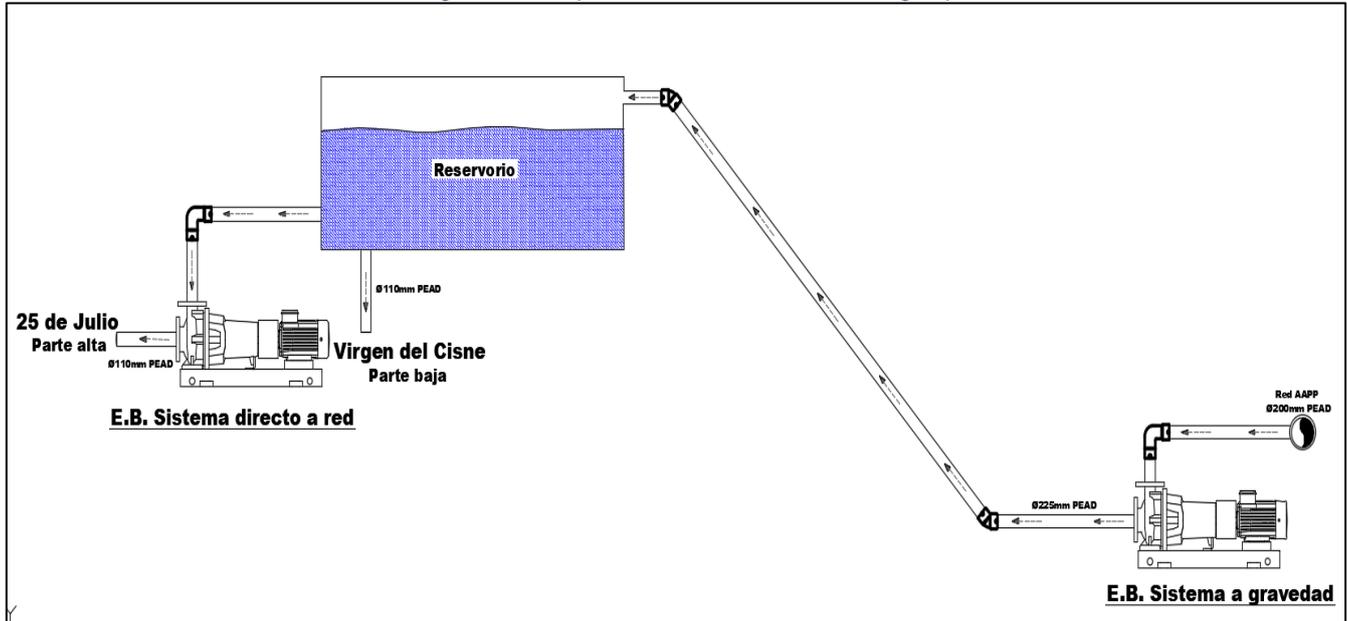
Figura 4.1: Imagen satelital del área de estudio



Fuente: Google Earth

Los usuarios que habitan el sector de “Virgen del Cisne” se abastecen por gravedad mediante el reservorio ubicado en cota 106 m.s.n.m., y de este mismo reservorio se alimenta el sistema de bombeo directo a la red del sector “25 de Julio”. En la parte más baja de la zona se ubica la estación de bombeo que alimenta al reservorio mediante una línea de conducción de 225 mm de diámetro y material PEAD.

Figura 4.2: Esquema de abastecimiento de agua potable



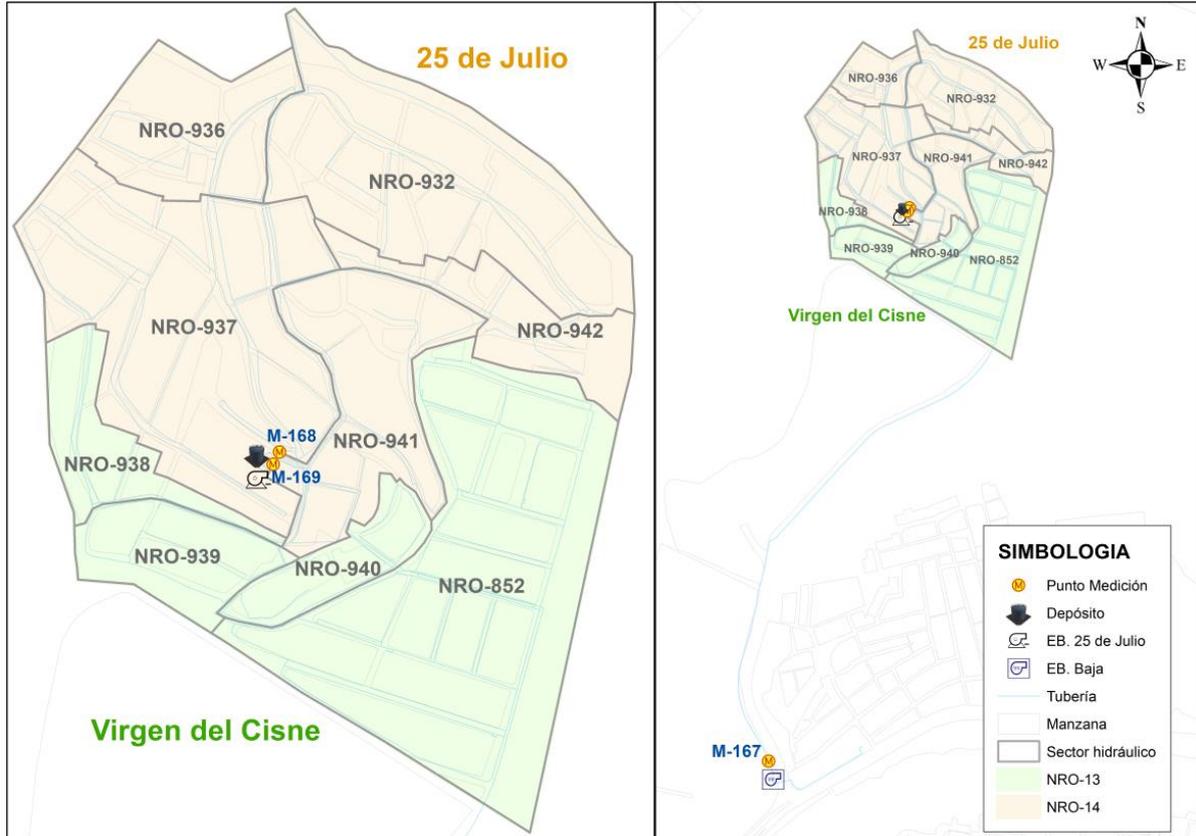
Elaborado por: Autor

La estación de bombeo baja, ubicada en la cota 7.85 m.s.n.m., está conformada por dos bombas en paralelo y se abastece directo desde la red de 200 mm de diámetro de PEAD. Esta estación de bombeo alimenta al reservorio mediante una línea de impulsión de 225 mm de diámetro PEAD, en la cual existe el medidor de código M-167 para registro del caudal bombeado.

El sector de “Virgen del Cisne”, alimentado desde el reservorio, se encuentra dividido en cuatro sectores hidráulicos, cada uno con su respectiva válvula de abastecimiento. Estos sectores hidráulicos se abastecen a través de tubería de conducción de 110 mm de diámetro PEAD. Los cuatro sectores hidráulicos conforman el distrito de medición NRO-13 que cuenta con el medidor de código M-168 para registrar el caudal inyectado.

El sector residencial “25 de Julio”, abastecido por bombeo directo a red, se encuentra dividido en cinco sectores hidráulicos, cada uno con su respectiva válvula de abastecimiento, y con dos válvulas reguladoras de presión. Estos sectores hidráulicos se abastecen mediante tubería de conducción de 110 mm de diámetro y material PEAD, en la cual existe una válvula reguladora de presión. Los cinco sectores hidráulicos conforman el distrito de medición NRO-14 que cuenta con el medidor de código M-169 para registro del caudal inyectado.

Figura 4.3: Plano referencial de sectores en la zona de estudio



Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

Tabla 4.1: Información de sectorización

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Distrito de medición	Punto de medición	Sector hidráulico
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-13	M-168	NRO-852
				NRO-938
				NRO-939
				NRO-940
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-14	M-169	NRO-932
				NRO-936
				NRO-937
				NRO-941
				NRO-942

Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

4.2 INFORMACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se ha obtenido la información de diferentes bases de datos de la empresa Interagua Cia. Ltda., encargada del abastecimiento de agua potable de la ciudad de Guayaquil, con el fin de elaborar el modelo hidráulico en el programa Epanet 2.0. De igual forma se usan los programas ArcGIS, AutoCAD y WaterCAD con el fin de tratar la información existente.

Se recopiló información del periodo de octubre 2020 a septiembre 2021 con el fin de trabajar con el valor anual debido a la estacionalidad del consumo. Dentro de la información recopilada se tiene:

- Consumo mensual facturado por cliente.
- Tipo de facturación (diferencia de lectura, promedio histórico)
- Categoría de consumo (residencial, comercial, oficial e industrial)
- Volumen suministrado al sistema
- Presión en salida de estaciones de bombeo
- Presión de succión en punto de conexión
- Nivel del reservorio
- Horas de trabajo de los grupos de bombeo

Adicionalmente, se recopiló información de la base de información geográfica tales como: topología de la red, curvas de nivel y la georreferenciación de los usuarios.

4.2.1 CAUDAL INYECTADO

En la Tabla 4.2 se muestra el caudal mensual inyectado a cada sistema de abastecimiento en l/s.

Tabla 4.2: Información de caudal inyectado por sistema

Parámetro	Caudal (l/s)	
	M168	M169
Punto de medición		
Sistema abastecimiento	Gravedad	Bombeo directo a red
Octubre – 2020	3.28	4.49
Noviembre – 2020	3.36	4.59
Diciembre – 2020	3.46	4.30
Enero – 2021	3.61	4.23
Febrero – 2021	3.87	4.70
Marzo – 2021	3.76	4.58
Abril – 2021	3.91	4.38
Mayo – 2021	3.56	4.84
Junio – 2021	3.29	4.35
Julio – 2021	3.39	4.57
Agosto – 2021	3.21	5.57
Septiembre – 2021	3.61	4.23
Promedio	3.52	4.60

*Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor*

4.2.2 DEPÓSITO

El reservorio AQUASTORE es un depósito circular que tiene un volumen total de 1,058 m³ y el nivel máximo del tanque se encuentra en 5.719 metros. Actualmente los niveles de operación se encuentran en nivel bajo de 3.40 m (encendido de bomba), y nivel alto en 3.75 m (apagado de bomba).

Tabla 4.3: Información del depósito

Producto	AQUASTORE
Modelo	5019 WT
Diámetro nominal	15.348 m
Altura nominal	5.871 m
Capacidad	1,058 m ³
Altura máxima	5.719 m

*Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor*

4.2.3 ESTACIÓN DE BOMBEO

4.2.3.1 Estación de bombeo de sistema a gravedad

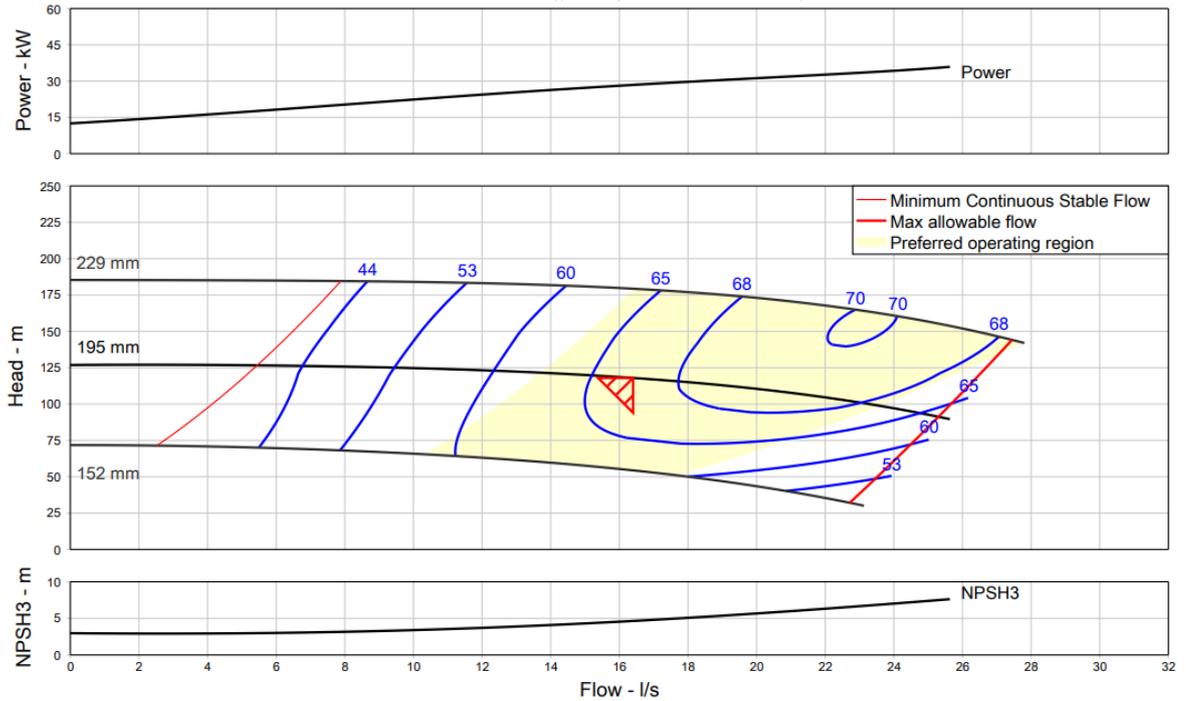
En la estación de bombeo baja existen dos bombas de carcasa dividida de dos etapas, conectadas en paralelo, cada una cuenta con variador de frecuencia. Las características de estas bombas se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Detalle de bomba de estación baja

Marca	PENTAIR
Modelo	430 - 2.5 x 3 x 12
Altura nominal	118 m
Caudal nominal	16.40 l/s
Eficiencia	66.60 %
Diámetro Impulsor	195 mm
Frecuencia	60 Hz
Velocidad	3500 rpm
NPSH requerido	4.64 m

*Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor*

Figura 4.4: Curva de bomba, modelo 430 -2.5 x 3 x 12



Fuente: Interagua Cia. Ltda,

4.2.3.2 Estación de bombeo directo a red

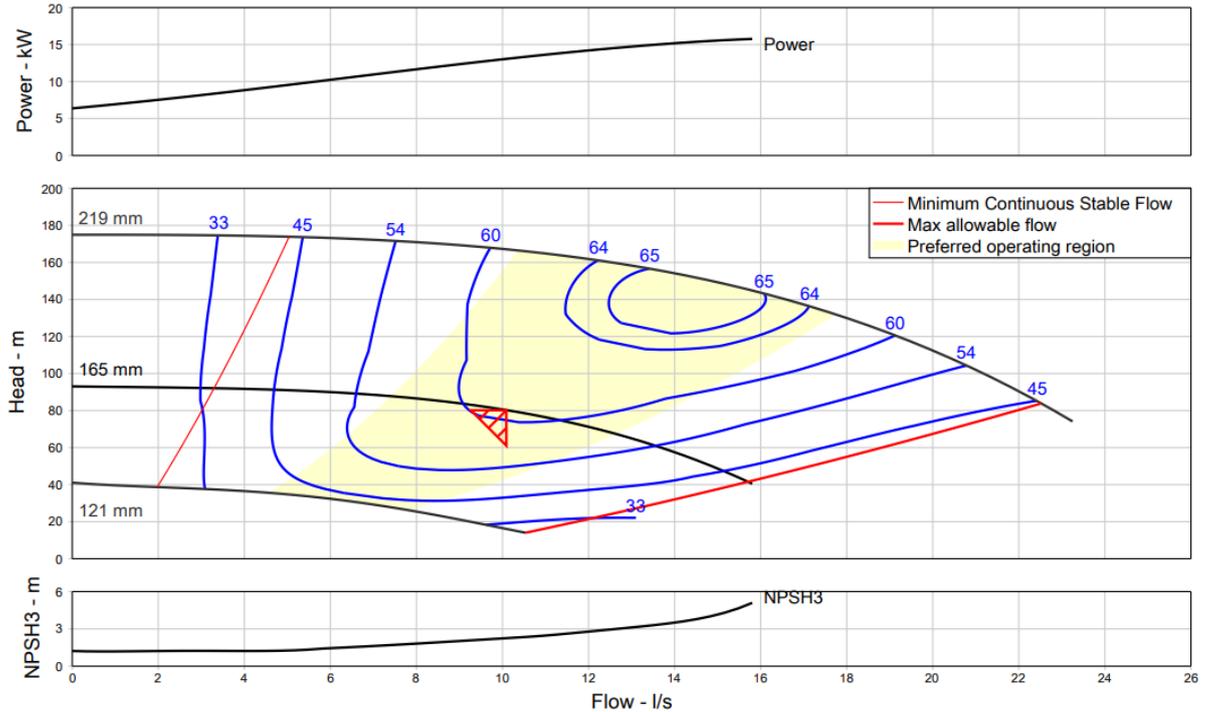
La estación de bombeo directo a red cuenta con tres bombas de carcasa dividida de dos etapas, conectadas en paralelo, de las cuales trabaja una sola bomba y se alterna su funcionamiento cada 24 horas de trabajo. Estas bombas cuentan con variador de frecuencia. Las características de estas bombas se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Detalle de bomba de estación directa a red

Marca	PENTAIR
Modelo	430 - 2 x 4 x 9
Altura nominal	80.16 m
Caudal nominal	10.09 l/s
Eficiencia	60.67 %
Diámetro Impulsor	165 mm
Frecuencia	60 Hz
Velocidad	3500 rpm
NPSH requerido	2.25 m

Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

Figura 4.5: Curva de bomba, modelo 420 -2 x 4 x 9



Fuente: Interagua Cia. Ltda

4.2.4 VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESIÓN

En la red existen tres válvulas reguladoras de presión, las cuales operan con presión de salida fija, en la Tabla 4.6 se indican los parámetros de operación.

Tabla 4.6: Información de válvulas reguladoras de presión

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Sector hidráulico	Válvula reguladora	Presión de salida (mca)
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-937	VRP-1	38.9
		NRO-932	VRP-2	65.8
		Conducción	VRP-3	56.4

Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

Mediante prueba de campo se verifica que la válvula reguladora de presión VRP-2 no regula presiones, debido a que en la zona de regulación existen dos ingresos de agua, uno de los cuales no cuenta con control.

4.2.5 INFORMACIÓN COMERCIAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La empresa Interagua Cia. Ltda., mediante análisis de estos sectores hidráulicos ha determinado que las pérdidas aparentes corresponden al 10% del volumen facturado. En la Tabla 4.7 se presenta por sector hidráulico el volumen facturado en el periodo de análisis, el volumen por tipo de facturación y el volumen correspondiente a las pérdidas aparentes. Cabe mencionar que todos los usuarios existentes en la zona de estudio pertenecen a la categoría de residenciales.

Tabla 4.7: Información comercial de la zona de estudio

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Sector hidráulico	Conexiones	Volumen facturado (m ³ /año)	Volumen por tipo de facturación (m ³ /año)		Pérdidas aparentes (m ³ /año)
					Diferencia de lectura	Promedio histórico	
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-852	320	63,226.1	61,037.5	2,188.6	6,322.6
		NRO-938	49	8,477.1	8,153.1	324.1	847.7
		NRO-939	57	10,128.8	9,849.8	278.9	1,012.9
		NRO-940	37	4,794.7	4,633.1	161.6	479.5
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-932	144	15,301.6	14,143.0	1,158.6	1,530.2
		NRO-936	40	4,430.7	3,841.6	589.1	443.1
		NRO-937	240	31,440.7	30,429.5	1,011.2	3,144.1
		NRO-941	112	16,308.4	15,187.3	1,121.1	1,630.8
		NRO-942	57	9,457.6	8,359.0	1,098.5	945.8
TOTAL			1,056	163,565.6	155,633.9	7,931.8	16,356.6

Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

4.3 TOPOLOGÍA DE LA RED

La topología de la red fue obtenida de la base datos del sistema de información geográfica en formato DWG, en la cual contiene la información de los diámetros, longitudes y materiales de las tuberías. Esta información fue importada al programa Epanet 2.0 mediante la extensión CADaRED. Se importan 343 líneas y 306 nudos.

En la Tabla 4.8 se detalla la longitud de red por diámetro de tubería y sector hidráulico, la red de distribución está compuesta únicamente por tubería de diámetro 90mm y material PEAD. La red de conducción de la parte alta (25 de Julio) y la parte baja (Virgen del Cisne) están constituidas por tuberías de diámetro 110 mm y material PEAD, mientras que la línea de impulsión es de diámetro 225 mm y material PEAD.

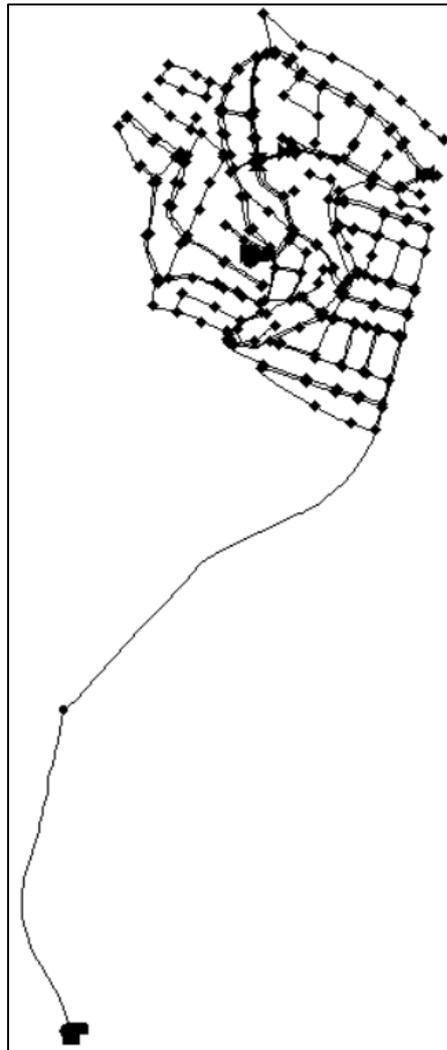
Tabla 4.8: Información de la red existente

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Sector hidráulico	Longitud de red (km)			Longitud de acometida (m)
			Ø90mm PEAD	Ø110mm PEAD	Ø225mm PEAD	Ø20mm PEAD
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-852	3.4	-	-	895
		NRO-938	0.9	-	-	155
		NRO-939	0.3	-	-	99
		NRO-940	0.7	-	-	98
		Conducción	-	0.25	-	-
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-932	1.7	-	-	485
		NRO-936	0.6	-	-	128
		NRO-937	2.8	-	-	723
		NRO-941	1.3	-	-	340
		NRO-942	0.7	-	-	401
		Conducción	-	0.68	-	-
Impulsión			-	-	1.9	-
TOTAL			12.4	0.93	1.9	3,324

Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

Debido a que las líneas solo cuentan con la longitud y coordenadas X y Y, se hace una edición masiva para ingresar los diámetros de las tuberías y su rugosidad. Los cálculos hidráulicos se realizan mediante la formulación de Darcy-Weisbach por lo que se define la rugosidad en 0.1 mm., ya que se desconoce la condición interna de las tuberías y de igual forma no se contempla las pérdidas menores de la red (accesorios y válvulas de sectorización). Para finalizar se adicionan los elementos no importados, tales como las 5 bombas y las 3 válvulas reguladoras de presión. Debido a que el reservorio se llena por la parte superior, se coloca una válvula sostenedora de presión para simular este llenado. En la Figura 4.6 se presenta la topología final en Epanet.

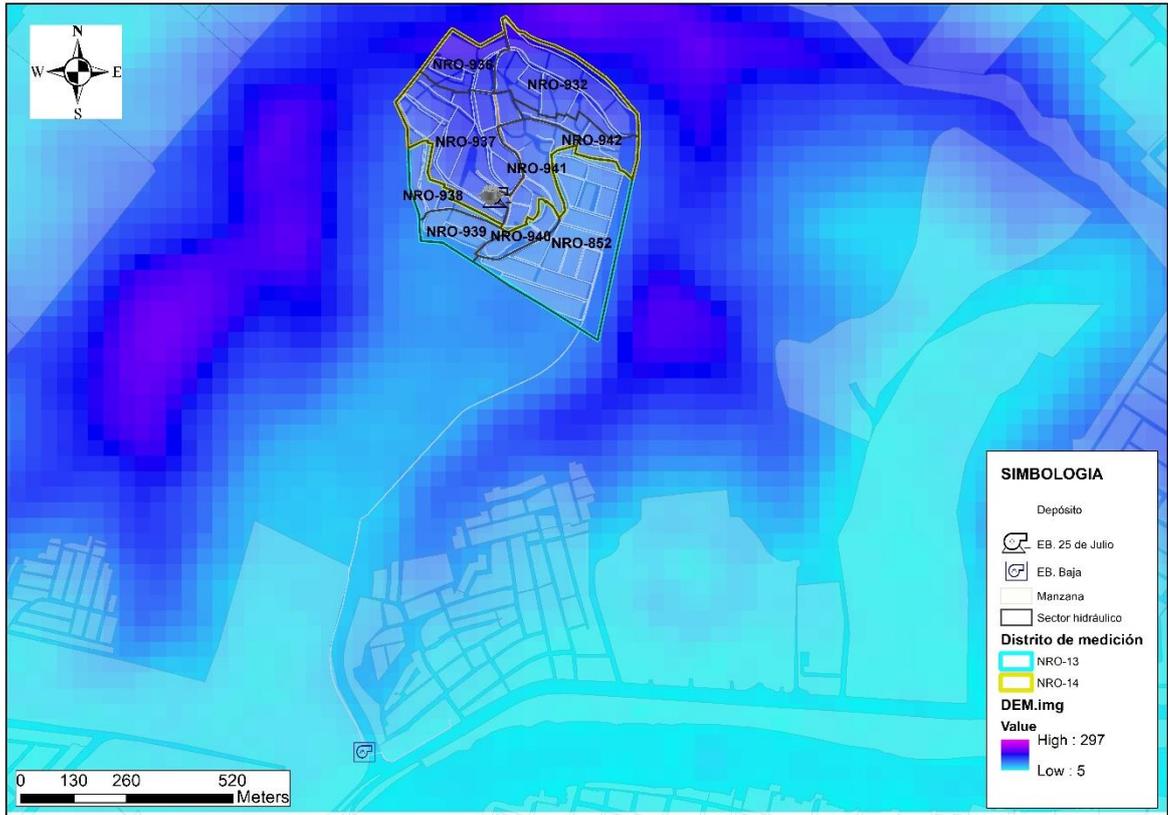
Figura 4.6: Topología de la red en modelo hidráulico



Elaborado por: Autor

Mediante el modelo digital del terreno y el uso del software WaterCAD (herramienta TRex), se asignaron las elevaciones a todos los nudos del modelo. En la Figura 4.7 se presenta el modelo digital del terreno.

Figura 4.7: Modelo digital del terreno de la zona de estudio



Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

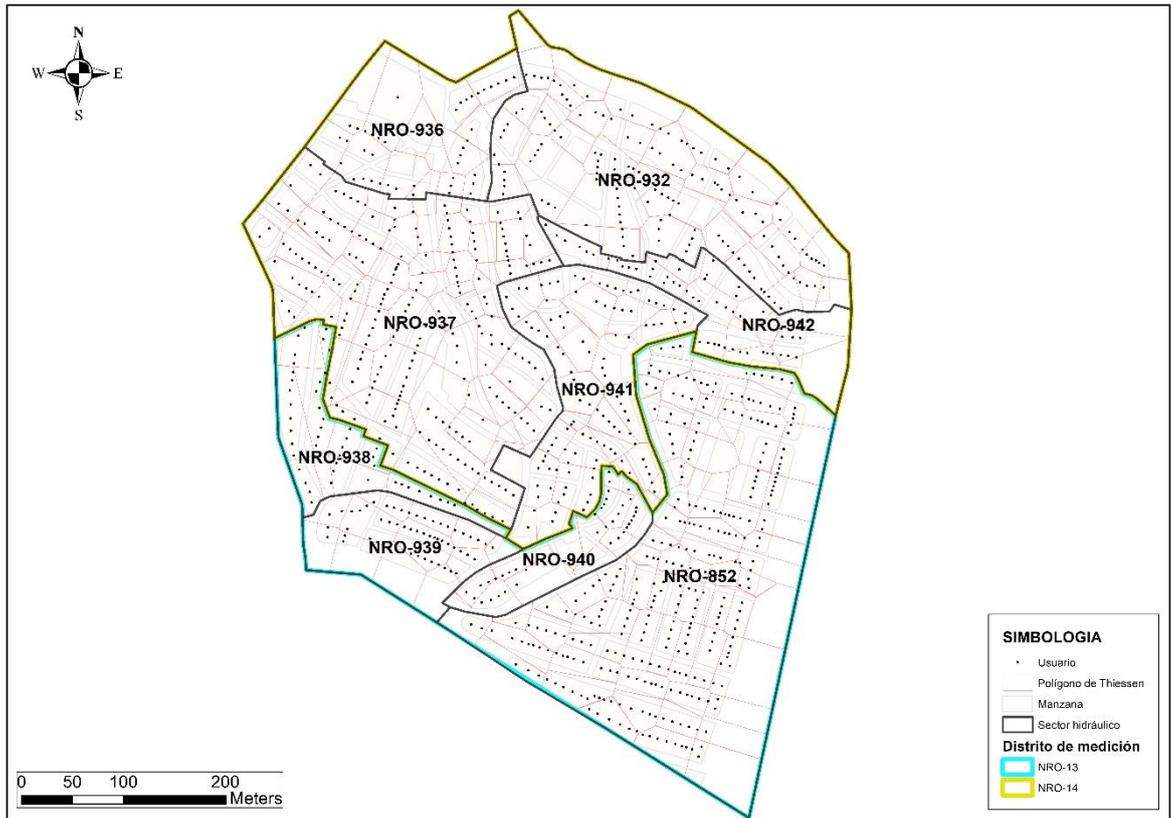
4.4 ASIGNACIÓN DE DEMANDAS

4.4.1 ASIGNACIÓN DE DEMANDAS INDEPENDIENTES DE LA PRESIÓN

La demanda independiente de la presión corresponde al volumen de consumo del usuario y es igual a la suma del consumo facturado y las pérdidas aparentes (fraude y error en medición). Como se cuenta con la información georreferenciadas de los usuarios y sus consumos, se realiza una distribución espacial de esta demanda. Para esto, se hace uso de los polígonos de Thiessen, permitiendo relacionar los usuarios a los nudos más cercanos y posteriormente asignar las demandas independientes de la presión a estos nudos.

La asignación con los polígonos de Thiessen se realiza dentro de cada sector hidráulico, consiguiendo con esto, la distribución equitativa por sector hidráulico de la demanda independiente de la presión. En este modelo se tienen 236 nudos de consumo y 68 nudos de no consumo. En la Figura 4.8 se muestran los polígonos de Thiessen y la ubicación georreferenciada de los usuarios.

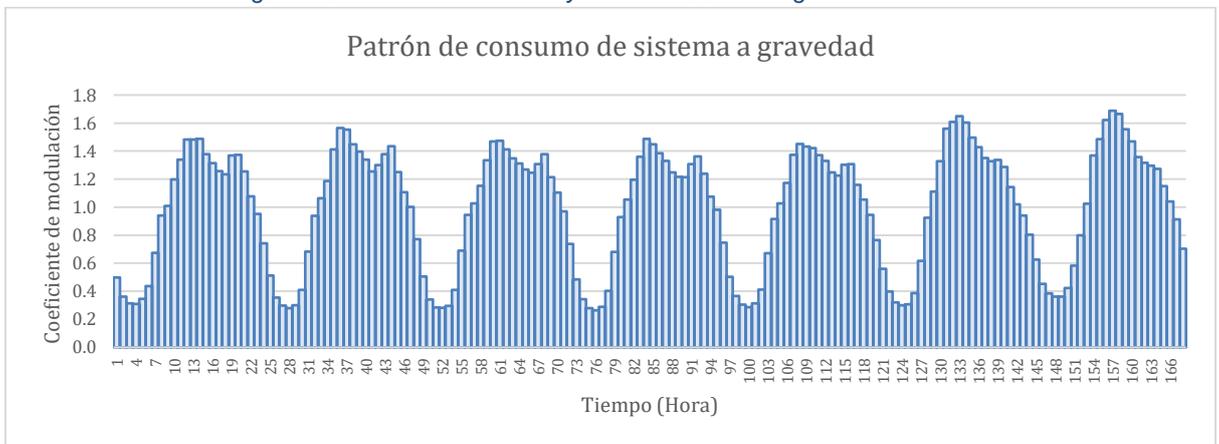
Figura 4.8: Polígonos de Thiessen usados para asignación de demandas



Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

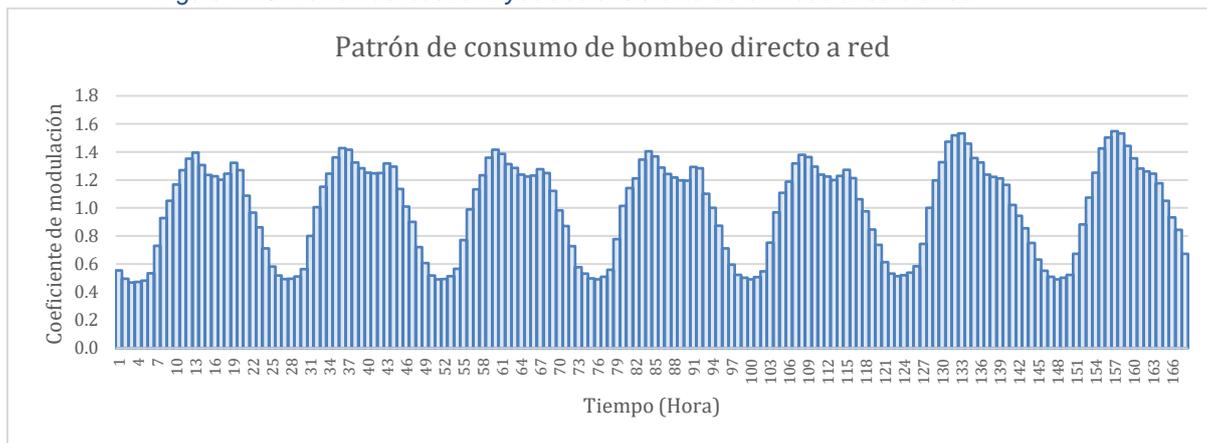
Debido a que no se cuenta con el patrón de consumo residencial de los usuarios, se asigna la curva del patrón del caudal inyectado por cada distrito de medición. En la Figura 4.9 y Figura 4.10 se presenta la curva del patrón semanal del caudal inyectado al sistema a gravedad y el patrón semanal del caudal inyectado al sistema de bombeo directo a red, respectivamente.

Figura 4.9: Patrón del caudal inyectado al sistema a gravedad



Elaborado por: Autor

Figura 4.10: Patrón del caudal inyectado al sistema de bombeo directo a red



Elaborado por: Autor

4.4.2 ASIGNACIÓN DE DEMANDAS DEPENDIENTES DE LA PRESIÓN

Tal como se indicó en el apéndice 3.1, la demanda dependiente de la presión (fuga) se la considera como un escape de agua por un orificio, por lo que se calcula el valor del caudal fugado mediante coeficientes emisores que son asignados a los nudos del modelo.

Para esto, se inicia calculando el caudal de fuga, a partir del caudal inyectado, el caudal facturado y el caudal de pérdidas aparentes, para cada distrito de medición. Debido a que la totalidad de las tuberías de la red es de material PEAD (tubería flexible), se considera el valor del exponente de fuga en 1.5 según (Lalonde & -Veritec, 2010).

Como ya se mencionó anteriormente, la empresa Interagua Cia. Ltda., mediante análisis de estos sectores hidráulicos ha determinado que las pérdidas aparentes corresponden al 10% del volumen facturado.

Tabla 4.9: Parámetros iniciales para cálculo de coeficiente emisor de fuga

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Distrito de medición	Exponente emisor	Caudal inyectado	Consumo facturado	Pérdidas aparentes	Caudal de fuga
				l/s	l/s	l/s	l/s
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-13	1.5	3.52	2.75	0.27	0.50
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-14	1.5	4.60	2.44	0.24	1.92
TOTAL				8.12	5.19	0.51	2.42

Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

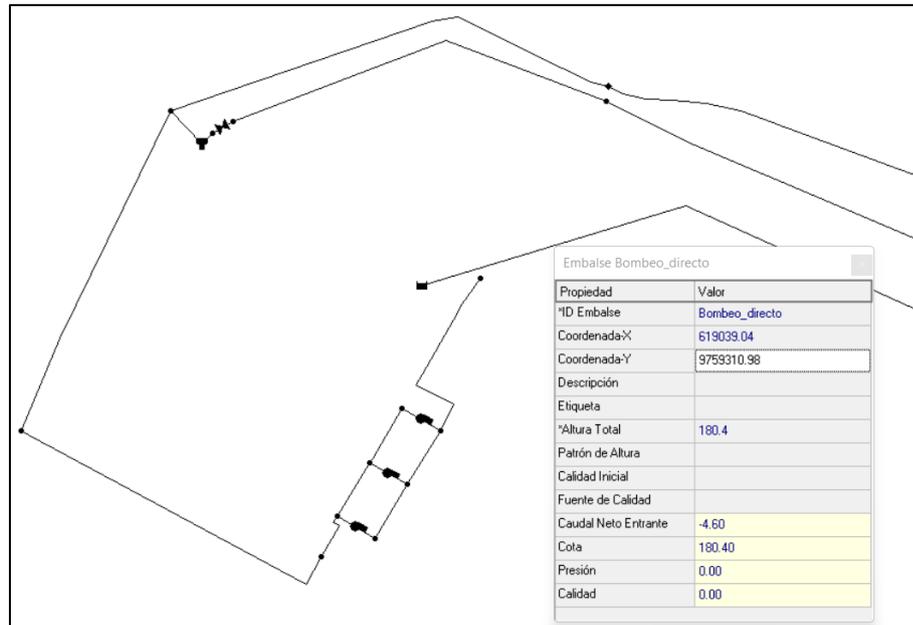
4.5 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELO HIDRAULICO

La calibración del modelo hidráulico se realiza independientemente para cada distrito de medición y posteriormente se agrupan los dos modelos para la calibración y verificación de este.

El proceso de calibración consistió en primera instancia en la determinación del coeficiente emisor de fuga para cada nudo del modelo, y posteriormente la estimación del patrón de consumo de la demanda base, según la metodología de calibración aplicada por (Molina, 2014).

En la calibración del modelo hidráulico del sistema con bombeo directo a red, se reemplaza la estación de bombeo por un embalse con la información de la altura piezométrica a la salida de la estación de bombeo directo a red, tal como se muestra en la Figura 4.11.

Figura 4.11: Embalse para calibración de sistema con bombeo directo a red



Elaborado por: Autor

4.5.1 CALIBRACIÓN DE MODELO HIDRÁULICO

Para la calibración del modelo hidráulico primero se determina el coeficiente emisor global de fugas y se reparte este coeficiente emisor equitativamente a todos los nudos del modelo.

Para el cálculo de este primer coeficiente emisor global se usa la ecuación 15. Para ese cálculo se requiere el exponente emisor, el caudal de fuga de cada sistema, y la presión promedio obtenida previamente con el modelo hidráulico cargado con los consumos independientes de la presión y el patrón del caudal inyectado a cada sistema.

$$C_{e_{global}} = \frac{Q_{fuga}}{p^\alpha} \quad [\text{Ec. 15}]$$

Luego de obtener el coeficiente emisor global, se divide este valor para el número de nudos de cada sistema y se obtiene el coeficiente emisor por nudo, el cual es cargado al modelo y se realiza una nueva simulación. Los cálculos realizados y presentados en la Tabla 4.10 corresponden a la iteración 0.

$$C_{e_{nudo}} = \frac{C_{e_{global}}}{nudos} \quad [\text{Ec. 16}]$$

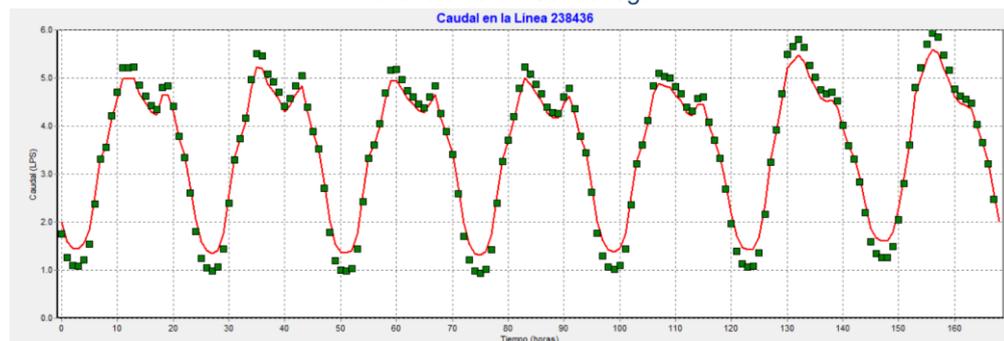
Tabla 4.10: Determinación de coeficiente emisor global de fuga en iteración 0.

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Distrito de medición	Exponente emisor	Caudal de fuga	Presión promedio	Coeficiente emisor global	Nudos	Coeficiente emisor
				l/s	mca	l/s/(mca) ^α		l/s/(mca) ^α
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-13	1.5	0.50	37.25	0.00217729	115	0.00001893
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-14	1.5	1.92	58.45	0.00429660	166	0.00002588

Elaborado por: Autor

Para cada simulación se obtiene el informe de calibración en la línea de salida de cada sistema. En la Figura 4.12 y Figura 4.13 se presenta, para la iteración 0, la curva del caudal observado vs el caudal simulado, así mismo se presenta la estadística de calibración, para el sistema a gravedad y para el sistema de bombeo directo a red, respectivamente.

Figura 4.12: Comprobación de calibración en iteración 0 en sistema a gravedad para determinación del coeficiente emisor de fuga



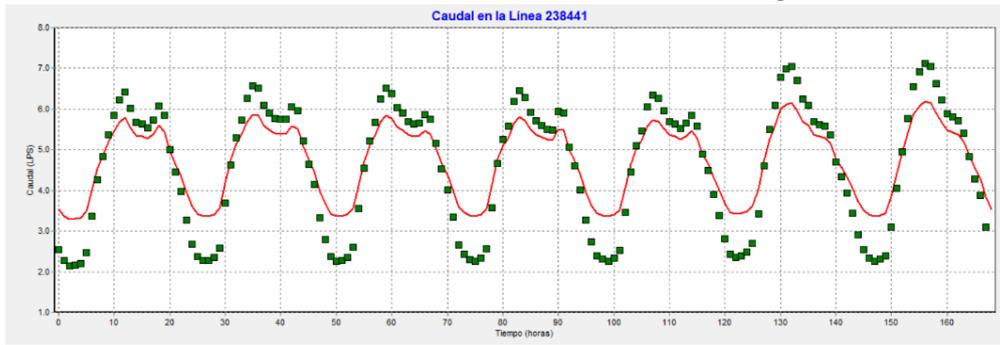
Estadísticas de Calibración para Caudal

Localización	N° Obs	Observ Obs	Calc Media	Media Media	RMS Error	Error
238436	168	3.52	3.53	0.186	0.215	
Sistema de Red168		3.52	3.53	0.186	0.215	

Correlación entre los Términos: 0.000

Elaborado por: Autor

Figura 4.13: Comprobación de calibración en iteración 0 en sistema de bombeo directo a red para determinación del coeficiente emisor de fuga



Estadísticas de Calibración para Caudal

Localización	N° Observ	Calc Media	Media	RMS Error	Error
238441	168	4.60	4.72	0.561	0.650
Sistema de Red168		4.60	4.72	0.561	0.650

Correlación entre los Términos: -1.184

Elaborado por: Autor

En la nueva simulación se obtienen nuevos valores de presión promedio por nudo. A partir de esta iteración se usa la ecuación 2 de (Germanopoulos & Jowitt, 1989), con el objetivo de agregar al cálculo la distribución uniforme de la fuga a lo largo de la tubería (β). Se considera que este parámetro de fugas β , es el mismo para todas las tuberías. Es así que, con el caudal de fuga, las longitudes de tubería de llegada a cada nudo, la presión promedio en cada nudo obtenida del modelo hidráulico y el exponente emisor, se determina el coeficiente de fuga por unidad de longitud.

$$\beta = \frac{Q_{fuga}}{\sum L_{ij} p_i^\alpha} \quad [\text{Ec. 17}]$$

Multiplicando el valor del coeficiente de fuga por unidad de longitud, por la longitud de tubería de llegada a cada nudo y su presión promedio elevada al exponente emisor, se obtiene el coeficiente emisor de fuga por nudo.

$$C_{e_{nudo,i}} = \beta L_{ij} p_i^\alpha \quad [\text{Ec. 18}]$$

Tabla 4.11: Iteración 4 para determinación de coeficiente emisor de fuga

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Distrito de medición	Exponente emisor	Caudal de fuga	Presión promedio	Coefficiente global de fuga por unidad de longitud (β)
				l/s	mca	l/s/L/(mca) $^\alpha$
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-13	1.5	0.50	37.09	0.00000037
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-14	1.5	1.92	58.36	0.00000054

Elaborado por: Autor

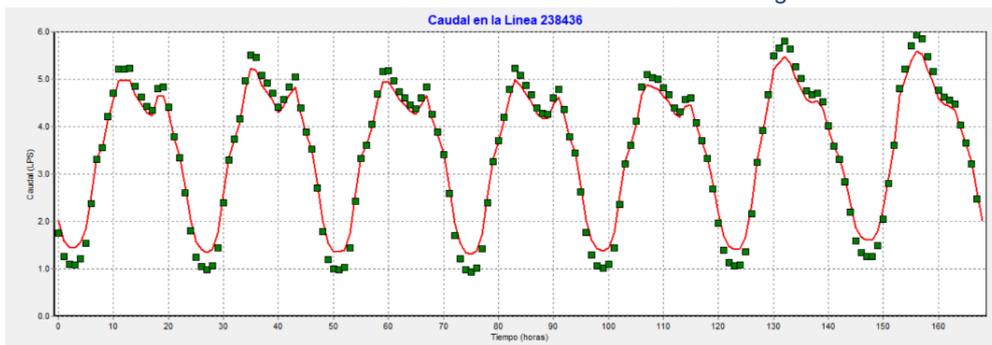
Obtenido el coeficiente emisor de fuga para cada nudo, se carga este valor en el modelo hidráulico y se obtiene un nuevo valor de presión promedio por nudo,

repetiendo este proceso con el uso de la fórmula de (Germanopoulos & Jowitt, 1989) hasta conseguir que la sumatoria del caudal fugado por todos los nudos se aproxime al caudal fugado total de cada sistema.

Para este caso de estudio se realizaron cuatro iteraciones hasta lograr la mejor convergencia en ambos sistemas.

En la Figura 4.14 y Figura 4.15 se presenta, para la iteración 4, la curva del caudal observado vs el caudal simulado, así mismo se presenta la estadística de calibración, para el sistema a gravedad y para el sistema de bombeo directo a red, respectivamente.

Figura 4.14: Comprobación de calibración en iteración 4 para calibración del sistema a gravedad para determinación del coeficiente emisor de fuga



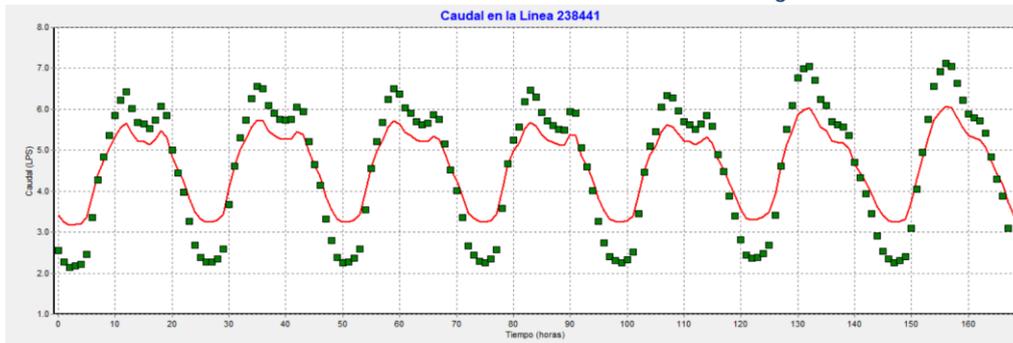
Estadísticas de Calibración para Caudal

Localización	N° Observ	Calc Media	Media Media	RMS Error	Error
238436	168	3.52	3.52	0.186	0.215
Sistema de Red168		3.52	3.52	0.186	0.215

Correlación entre los Términos: 2.864

Elaborado por: Autor

Figura 4.15: Comprobación de calibración en iteración 4 en sistema de bombeo directo a red para determinación del coeficiente emisor de fuga



Estadísticas de Calibración para Caudal

Localización	N° Observ	Calc Media	Media Media	RMS Error	Error
238441	168	4.60	4.60	0.570	0.639
Sistema de Red168		4.60	4.60	0.570	0.639

Correlación entre los Términos: 0.000

Elaborado por: Autor

Una vez determinados los coeficientes emisores de fuga para todos los nudos, se procede a estimar el patrón de consumo semanal. Primero se define el nudo que represente la presión promedio en cada sistema. Para esto, se calcula la diferencia cuadrática de la presión promedio de cada nudo con la presión promedio del sistema, el nudo que presenta la menor diferencia cuadrática representa al punto de presión promedio.

En la Tabla 4.12 se muestra el nudo representativo de presión promedio y la diferencia cuadrática obtenida. Este nudo representa a toda la red del sistema, es así que se considera que la presión horaria de este nudo es la presión horaria del sistema

Tabla 4.12: Determinación del nudo representativo de presión promedio

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Distrito de medición	Presión promedio	Nudo representativo de presión promedio	Presión promedio nudo	Diferencia cuadrática
			mca		mca	
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-13	37.09	J-6274	36.95	0.019
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-14	58.65	J-6285	58.92	0.073

Elaborado por: Autor

Con el nudo representativo de presión promedio determinado, se calcula el caudal de fuga horaria mediante la ecuación 19, a partir del coeficiente emisor de fuga determinado previamente, la presión horaria y el exponente emisor.

$$Q_{fuga}(t) = C_{e_{global}} * p(t)^{\alpha} \quad [\text{Ec. 19}]$$

La diferencia entre el caudal inyectado por hora y el caudal de fuga por hora corresponde al caudal consumido por los usuarios (caudal facturado + pérdidas aparentes), tal como se muestra en la ecuación 20.

$$Q_{consumido}(t) = Q_{inyectado}(t) - Q_{fuga}(t) \quad [\text{Ec. 20}]$$

Con el caudal consumido horario y el caudal consumido promedio, se obtiene el coeficiente de modulación de consumo por cada hora de la semana.

$$m(t) = \frac{Q_{consumido}(t)}{Q_{consumido}} \quad [\text{Ec. 21}]$$

Una vez calculados los coeficientes de modulación de consumo, son cargados en el modelo hidráulico y se realiza una nueva simulación.

En la Figura 4.16 Figura 4.14 y Figura 4.17 Figura 4.15 se presenta, para la iteración 1, la curva del caudal observado vs el caudal simulado, así mismo se presenta la estadística de calibración, para el sistema a gravedad y para el sistema de bombeo directo a red, respectivamente.

Figura 4.16: Comprobación de la calibración de la iteración 1 en sistema a gravedad para estimación del patrón de consumo

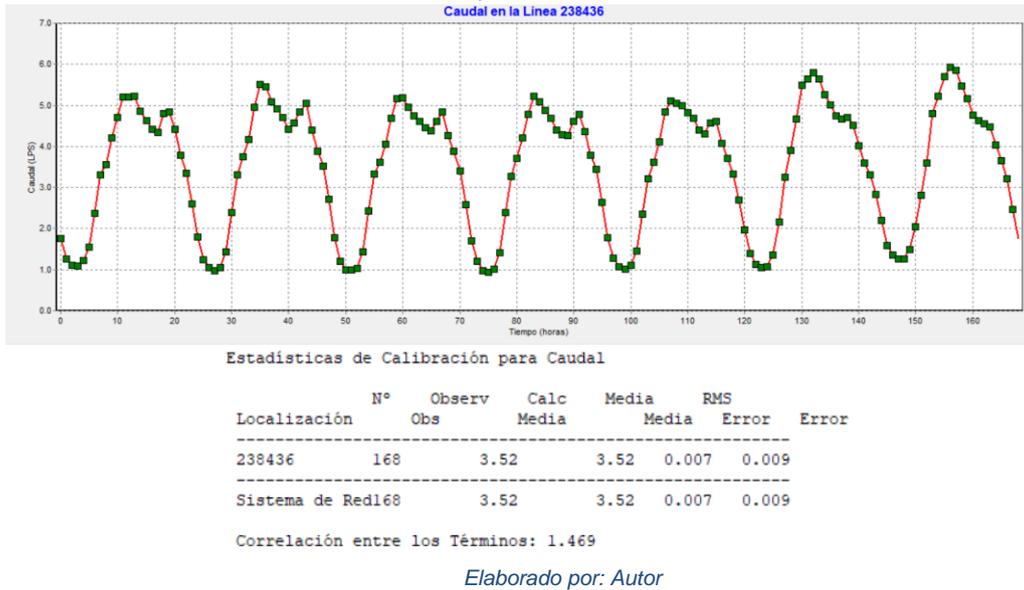
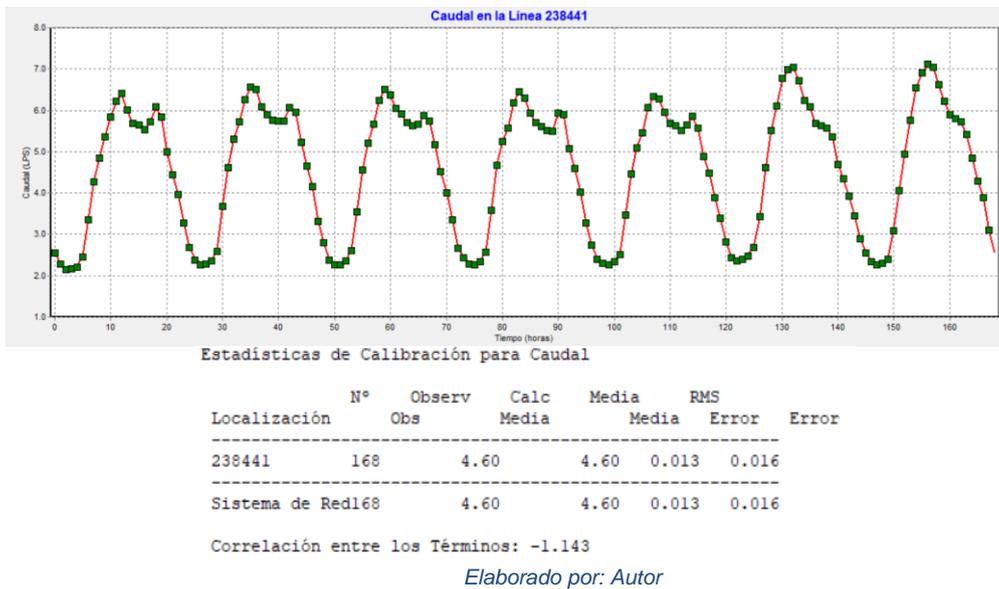


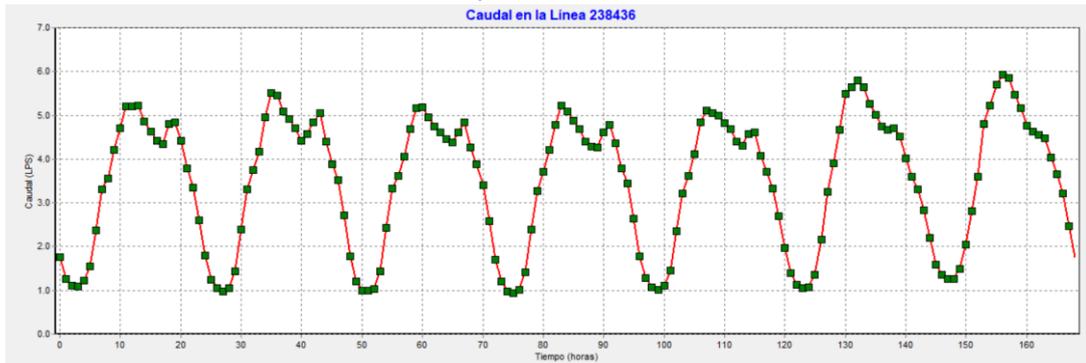
Figura 4.17: Comprobación de la calibración de la iteración 1 en sistema de bombeo directo a red para estimación del patrón de consumo



De la nueva simulación se obtienen las presiones en el nudo representativo y se repite el proceso para determinar los patrones de consumo. En la tercera iteración se obtienen errores admisibles de calibración en ambos sistemas.

En la Figura 4.18 y Figura 4.19 se presenta, para la iteración 3, la curva del caudal observado vs el caudal simulado, así mismo se presenta la estadística de calibración, para el sistema a gravedad y para el sistema de bombeo directo a red, respectivamente.

Figura 4.18: Comprobación de la calibración de la iteración 3 en sistema a gravedad para estimación del patrón de consumo



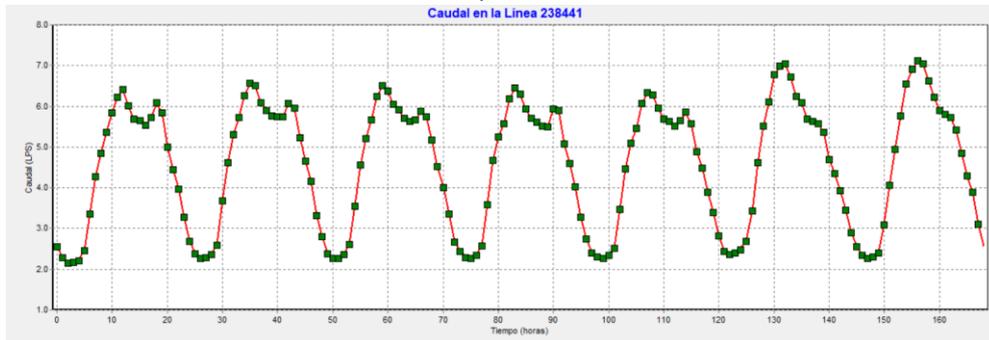
Estadísticas de Calibración para Caudal

Localización	N° Obs	Observ	Calc Media	Media Media	RMS Error	Error
238436	168		3.52	3.52	0.007	0.008
Sistema de Red168		3.52	3.52	0.007	0.008	

Correlación entre los Términos: -0.954

Elaborado por: Autor

Figura 4.19: Comprobación de la calibración de la iteración 3 en sistema de bombeo directo a red para estimación del patrón de consumo



Estadísticas de Calibración para Caudal

Localización	N° Obs	Observ	Calc Media	Media Media	RMS Error	Error
238441	168		4.60	4.60	0.011	0.013
Sistema de Red168		4.60	4.60	0.011	0.013	

Correlación entre los Términos: 0.000

Elaborado por: Autor

4.5.2 VALIDACIÓN DE MODELO HIDRÁULICO

Con el modelo calibrado se verifica el nivel de precisión de los parámetros de caudal y presión en la red, para esto se considera los niveles de referencia indicados en la Tabla 3.1.

En este caso de estudio, el uso del modelo es de operación de la red, por lo que se debe cumplir con una exactitud de ± 1.4 mca para el 90% de medidas de presión en la red, y una exactitud de $\pm 5\%$ en la medición de caudal, según la Tabla 3.1.

En la Tabla 4.13 se presenta el nivel de precisión del parámetro de medición de caudal en cada uno de los sistemas.

Tabla 4.13: Nivel de precisión del parámetro de caudal

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Distrito de medición	Error medio	RMS
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-13	0.007	0.008
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-14	0.011	0.011

Elaborado por: Autor

Para la validación del parámetro de presión se tomaron presiones puntuales en las acometidas de los usuarios. En la Tabla 4.14 se presentan los valores de presión levantados en campo y se compara estos valores con los obtenidos en el modelo hidráulico. Se puede apreciar que se cumple con la precisión para el 93% de las presiones tomadas

Tabla 4.14: Nivel de precisión del parámetro de presión

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Sector hidráulico	Hora	Presión medida	Hora	Presión modelo	Diferencia	Error
				mca		mca		
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-852	10:54	40.2	82:00	38.85	1.35	3%
		NRO-852	10:52	43.9	82:00	45.26	-1.36	3%
		NRO-852	9:38	44.6	81:00	44.22	0.38	1%
		NRO-852	9:52	41.5	81:00	41.26	0.24	1%
		NRO-852	10:06	39.8	82:00	38.56	1.24	3%
		NRO-852	10:19	39	82:00	38.02	0.98	3%
		NRO-852	10:33	37	82:00	35.95	1.05	3%
		NRO-852	11:02	35.9	83:00	34.55	1.35	4%
		NRO-852	10:47	36.8	82:00	36.26	0.54	1%
		NRO-938	13:31	27.8	61:00	27.78	0.02	0%
		NRO-938	13:39	29	61:00	27.78	1.22	4%
		NRO-938	12:10	29	108:00	27.61	1.39	5%
		NRO-938	12:03	29	108:00	27.7	1.3	4%
		NRO-938	12:58	26.6	60:00	26.34	0.26	1%
		NRO-939	15:45	23.8	111:00	22.5	1.3	5%
		NRO-939	12:32	32.6	60:00	32.21	0.39	1%
		NRO-939	15:56	33.8	111:00	32.49	1.31	4%
		NRO-939	11:58	45	59:00	43.94	1.06	2%
		NRO-939	15:30	44.7	111:00	45.54	-0.84	2%
NRO-939	11:46	45.9	59:00	45.17	0.73	2%		

		NRO-939	12:19	36.3	60:00	35.17	1.13	3%
		NRO-939	16:08	39.6	112:00	40.88	-1.28	3%
		NRO-939	12:06	39.3	60:00	40.6	-1.3	3%
		NRO-940	12:58	40.4	60:00	41.63	-1.23	3%
		NRO-940	13:34	40.5	61:00	39.56	0.94	2%
		NRO-940	13:21	26.8	61:00	25.57	1.23	5%
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-932	14:01	46.4	86:00	45.09	1.31	3%
		NRO-932	13:35	43.5	85:00	44.64	-1.14	3%
		NRO-932	14:40	38	86:00	37.6	0.4	1%
		NRO-932	13:44	26.2	85:00	26.88	-0.68	3%
		NRO-932	13:28	23.3	85:00	23.02	0.28	1%
		NRO-932	11:04	3	107:00	3.94	-0.94	31%
		NRO-936	11:17	27.1	11:00	25.82	1.28	5%
		NRO-936	12:22	26.5	12:00	25.21	1.29	5%
		NRO-936	11:31	22.9	11:00	21.6	1.3	6%
		NRO-936	11:05	25.7	11:00	22.44	3.26	13%
		NRO-936	11:43	36	11:00	33.01	2.99	8%
		NRO-937	11:17	31.2	107:00	32.14	-0.94	3%
		NRO-937	17:15	55.1	41:00	53.83	1.27	2%
		NRO-937	17:36	43.2	41:00	43.79	-0.59	1%
		NRO-937	17:22	42.6	41:00	43.44	-0.84	2%
		NRO-937	17:44	38.2	41:00	38.82	-0.62	2%
		NRO-937	11:43	48.6	83:00	47.31	1.29	3%
		NRO-937	12:37	63.6	84:00	64.56	-0.96	2%
		NRO-937	12:28	70	84:00	68.69	1.31	2%
		NRO-941	16:58	72.5	65:00	73.11	-0.61	1%
		NRO-941	16:06	102.1	64:00	100.86	1.24	1%
		NRO-941	14:32	88	62:00	89.08	-1.08	1%
		NRO-941	14:55	90	63:00	89.1	0.9	1%
		NRO-941	11:14	93	107:00	96.09	-3.09	3%
		NRO-942	12:54	83.9	108:00	83.5	0.4	0%
		NRO-942	15:38	82.9	111:00	83.56	-0.66	1%
		NRO-942	15:40	86.7	111:00	87.16	-0.46	1%
		NRO-942	12:51	77	108:00	78.39	-1.39	2%
		NRO-942	15:14	875	63:00	87.14	0.36	0%
		NRO-942	15.:09	89.3	63:00	87.21	2.09	2%
		NRO-942	12:48	67.7	108:00	68.77	-1.07	2%

Elaborado por: Autor

En base a la Tabla 4.13 y Tabla 4.14 de verificación de parámetros de caudal y presión, se valida la calibración del modelo y se prosigue con el respectivo análisis de la red.

5 ANÁLISIS DE CONDICIÓN ACTUAL DEL SISTEMA

5.1 ESTADO DE INFRAESTRUCTURA DEL SISTEMA

Se detectó en la red estudiada que los sectores hidráulicos no han sido configurados en función de pisos altimétricos homogéneos, esto se verifica fácilmente con la Tabla 5.1, donde se puede observar que la diferencia entre la cota mínima y máxima de un sector hidráulico difiere en gran proporción de otros. Y además existen sectores como el NRO-932 que tienen un gran diferencial de cota lo cual origina que para cumplir con la presión de servicio de 15 mca en el nudo de mayor cota, por el contrario, en el nudo de menor cota tendré de por sí, un exceso de presión de 54.20 mca.

Por tanto, se puede concluir que la red no se encuentra sectorizada adecuadamente.

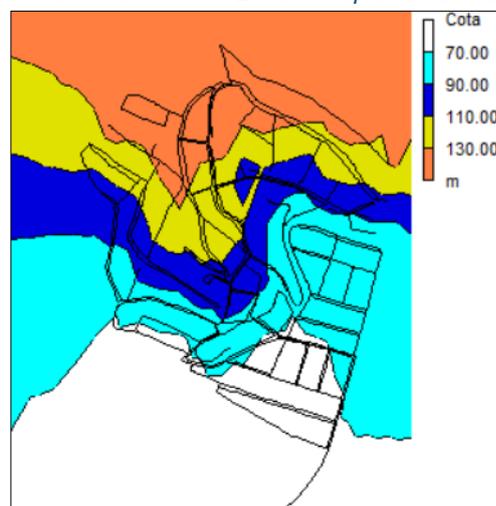
Tabla 5.1: Diferencia de cota en sectores hidráulicos

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Sector hidráulico	Cota mínima	Cota máxima	Δ Cota
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-852	63.34	75.99	12.65
		NRO-938	71.70	93.55	21.85
		NRO-939	63.19	86.38	23.19
		NRO-940	63.48	83.23	19.75
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-932	105.87	160.07	54.20
		NRO-936	138.38	156.85	18.47
		NRO-937	94.26	151.66	57.40
		NRO-941	72.38	120.35	47.97
		NRO-942	79.70	108.30	28.60

Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

La Figura 5.1 muestra cómo es la distribución de cotas en la zona donde está implantada la red de distribución y aporta una referencia para el establecimiento posterior de una nueva sectorización.

Figura 5.1: Distribución de cota en zona de implantación de red en estudio



Elaborado por: Autor

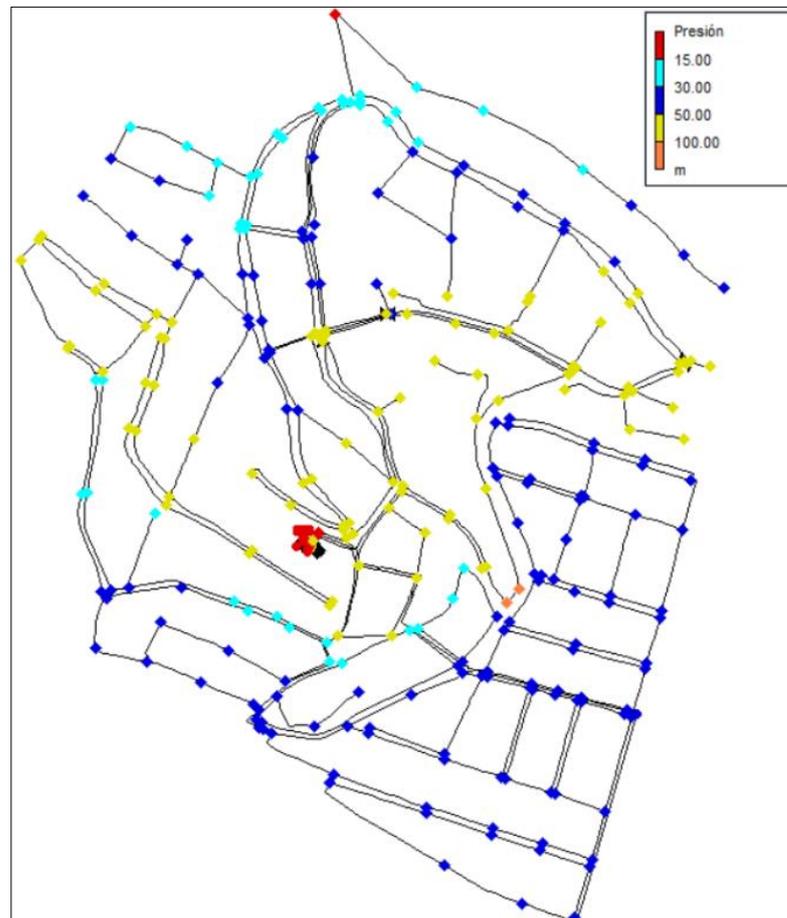
5.2 ANÁLISIS DE PRESIONES

Como parte del análisis del comportamiento de la red modelada, es necesario revisar por un lado la presión mínima para detectar si existen nudos en la red que no esté cumpliendo con la presión de servicio estipulada por contrato y, por el contrario, también se debe revisar la presión máxima para identificar si existen nudos con exceso de presión que puedan provocar daños en las tuberías y un incremento en el caudal de fugas.

La verificación de presiones mínimas se realiza en el horario de máximo consumo (156h00), puesto que es la condición más desfavorable para cumplir con la demanda requerida a la presión de servicio. Para esto se extrajo del modelo matemático construido en Epanet, la Figura 5.2 donde se puede constatar que no existen nudos de consumo que no cumplan con la presión requerida, más bien es evidente que aún en la condición más desfavorable del sistema, existen puntos con presión de alrededor de 100 mca.

En conclusión, ningún sector hidráulico tiene actualmente problemas para cumplir con la presión de servicio, pero si existe necesidad de disminuir el exceso de presión en nudos de consumo.

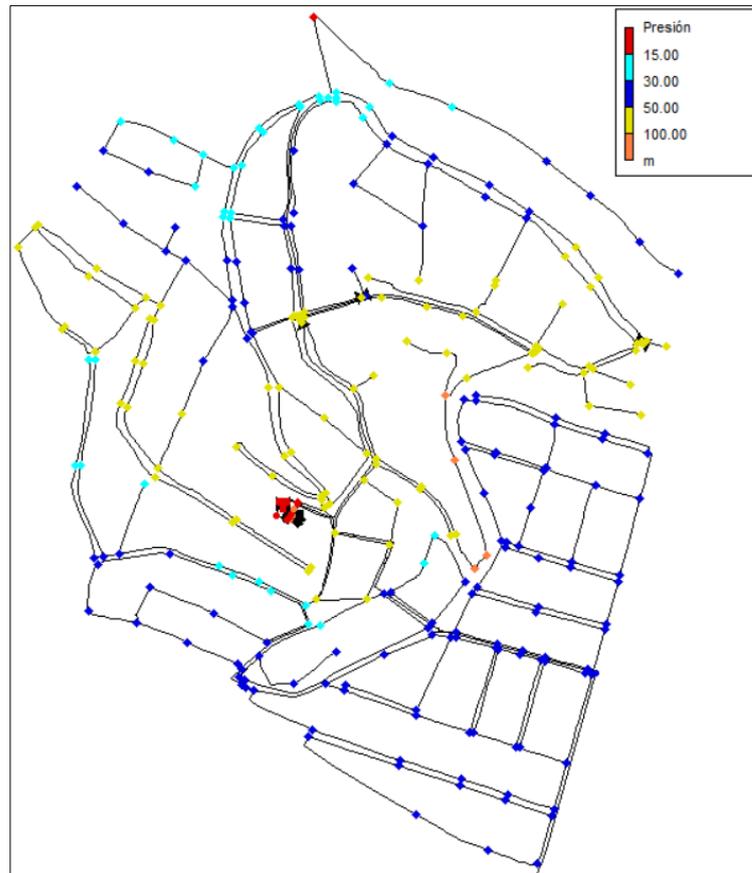
Figura 5.2: Presión mínima en red de distribución



Elaborado por: Autor

En lo que respecta a presión máxima, esta tiene lugar a las 02h00 cuando el consumo de la red es mínimo. Como se puede apreciar en la Figura 5.3 la mayoría de los nudos alcanzan valores de presión superiores a 50 mca y a 100 mca inclusive.

Figura 5.3: Presión máxima en red de distribución



Elaborado por: Autor

En conclusión, existen nudos de la red que alcanzan 85 mca de sobrepresión, sobre lo requerido para cumplir con la presión de servicio, por lo tanto, es necesario regular presiones.

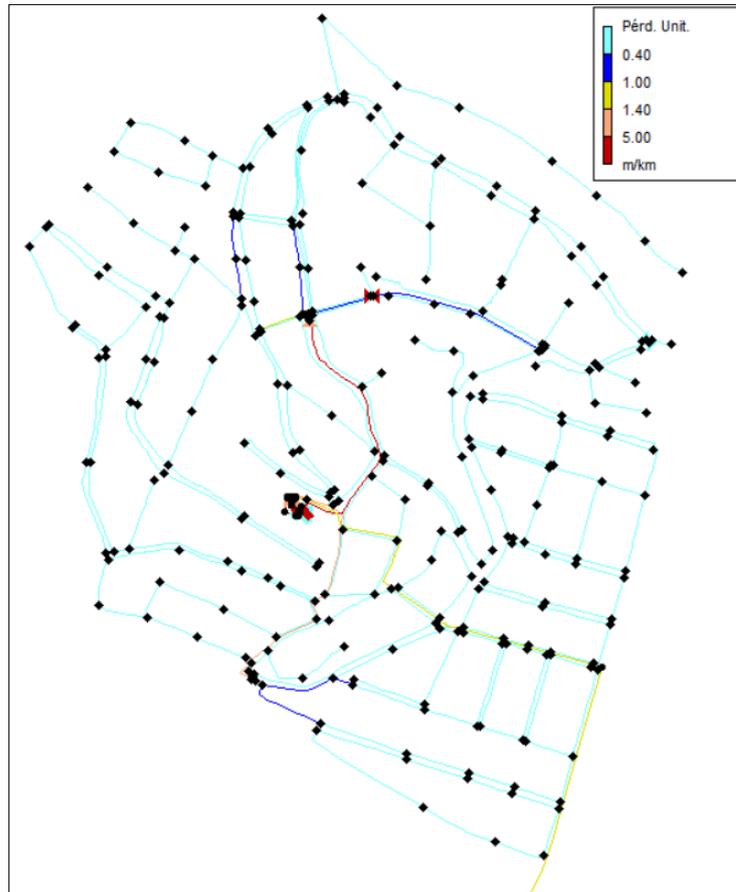
Finalmente, del análisis de presiones promedio del sistema, se puede decir que en la situación actual la presión promedio de la zona "Virgen del Cisne" es 37.36 mca en tanto que en la zona alta "25 de Julio" la presión promedio es 58.50 mca. Si se considera la totalidad del sistema, la presión promedio puede ubicarse en 49.78 mca.

5.3 ANÁLISIS DE PÉRDIDAS UNITARIAS

En lo que a pérdidas unitarias se refiere, se puede corroborar con la Figura 5.4 que al menos el 90% de las tuberías que conforman la red tienen en promedio una pérdida menor a 0.4 m/km y el restante presenta pérdidas de hasta 1.4 m/km, esto indica que la capacidad de conducción de las tuberías es adecuada. Tan sólo la línea de distribución principal, desde la salida del bombeo directo a la red que alimenta a la parte alta "25 de julio" tiene una pérdida de alrededor de 5 m/km, sin embargo, este

valor es aceptable como referencia para sistemas de abastecimiento (García & García, 2020).

Figura 5.4: Pérdidas unitarias promedio m/km en red de distribución



Elaborado por: Autor

En conclusión, la red de distribución tanto del sistema a gravedad “Virgen del Cisne” como el sistema con bombeo directo a red “25 de Julio” se considera dimensionada adecuadamente.

5.4 AUDITORÍA HÍDRICA

Según lo ha permitido los datos disponibles, se determinó el balance hídrico, por un lado, para aquellos sectores abastecidos a gravedad que conforman la zona “Virgen del Cisne” y por otro, los sectores hidráulicos que tienen una alimentación desde el bombeo directo a red y conforman la zona “25 de julio”.

La Tabla 5.2 muestra el balance hídrico de la IWA para el sistema a gravedad “Virgen del Cisne”. El volumen entregado a este sistema es de 111,007 m³/año, de los cuales 86,627 m³/año corresponden a consumo autorizado y 24,380 m³/año se pierden, esto supone que un 22% del agua que ingresa a la zona “Virgen del Cisne” se está perdiendo.

El consumo autorizado, en su totalidad es facturado, del cual un 96.6% es medido y el restante se estima a partir del consumo promedio histórico de los usuarios.

En cuanto a las pérdidas de agua, el componente de las pérdidas aparentes se ha asumido como un 10% del consumo autorizado, esto de acuerdo con estimaciones que ha realizado la empresa gestora del servicio de agua potable, resultando en 8,663 m³/año, lo cual representa el 35.5% del total de pérdidas, siendo así que el 64.5% corresponde a las pérdidas reales, esto es 15,717 m³/año.

En este caso al ser nulo el consumo autorizado no facturado, el agua no facturada coincide con las pérdidas de agua.

Tabla 5.2: Balance hídrico IWA. Sistema a gravedad "Virgen del Cisne"

A.1.- Volumen de entrada al sistema 111,007 <i>(m³/año)</i>	B.1.- Consumo autorizado 86,627 <i>(m³/año)</i> 78.0%	C.1.- Consumo autorizado facturado 86,627 <i>(m³/año)</i> 100.0%	D.1.- Consumo facturado medido 83,673 <i>(m³/año)</i> 96.6%	E.1.- Agua Facturada 86,627 <i>(m³/año)</i> 78.0%
			D.2.- Consumo facturado no medido 2,953 <i>(m³/año)</i> 3.4%	
	B.2.- Pérdidas de agua 24,380 <i>(m³/año)</i> 22.0%	C.2.- Consumo autorizado no facturado 0 <i>(m³/año)</i> 0.0%	D.3.- Consumo no facturado medido 0 <i>(m³/año)</i>	E.2.- Agua No Facturada 24,380 <i>(m³/año)</i> 22.0%
		C.3.- Pérdidas aparentes 8,663 <i>(m³/año)</i> 35.5%	D.4.- Consumo no facturado no medido 0 <i>(m³/año)</i>	
			D.5.- Consumo no autorizado No estimadas <i>(m³/año)</i>	
		C.4.- Pérdidas reales 15,717 <i>(m³/año)</i> 64.5%	D.6.- Imprecisiones de medida No estimadas <i>(m³/año)</i>	
			D.7.- Pérdidas reales en conducciones de agua bruta y tratamiento No estimadas <i>(m³/año)</i>	
			D.8.- Fugas en transporte y/o conducciones de distribución No estimadas <i>(m³/año)</i>	
			D.9.- Fugas y desbordamientos en transporte y/o conducciones de almacenamiento No estimadas <i>(m³/año)</i>	
			D.10.- Fugas en acometidas (hasta el punto de medida) No estimadas <i>(m³/año)</i>	

Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

La Tabla 5.3 contiene el balance hídrico de la IWA para los sectores abastecidos desde el bombeo directo a red. El volumen entregado a la zona "25 de julio" es de 145,066 m³/año, de los cuales 76,939 m³/año corresponden a consumo autorizado y 69,127 m³/año a pérdidas de agua, esto supone que un 47.0% del agua que ingresa a la zona "25 de julio" se está perdiendo.

De igual manera aquí el consumo autorizado, en su totalidad es facturado, del cual un 93.5% es medido y el restante se estima a partir del consumo promedio histórico.

Respecto a las pérdidas de agua, el componente de las pérdidas aparentes también se ha asumido como un 10% del consumo autorizado, esto de acuerdo con estimaciones que ha realizado la empresa gestora del servicio de agua potable,

resultando en 7,694 m³/año, lo cual representa el 11.3 % del total de pérdidas, siendo así que el 88.7% corresponde a las pérdidas reales, esto es 60,433 m³/año.

Al ser nulo el consumo autorizado no facturado, el agua no facturada coincide con las pérdidas de agua.

Tabla 5.3: Balance hídrico IWA. Bombeo directo a red “25 de julio”

A.1.- Volumen de entrada al sistema 145,066 <i>(m³/año)</i>	B.1.- Consumo autorizado 76,939 <i>(m³/año)</i> 53.0%	C.1.- Consumo autorizado facturado 76,939 <i>(m³/año)</i> 100.0%	D.1.- Consumo facturado medido 71,960 <i>(m³/año)</i> 93.5%	E.1.- Agua Facturada 76,939 <i>(m³/año)</i> 53.0%
			D.2.- Consumo facturado no medido 4,979 <i>(m³/año)</i> 6.5%	
		C.2.- Consumo autorizado no facturado 0 <i>(m³/año)</i> 0.0%	D.3.- Consumo no facturado medido 0 <i>(m³/año)</i>	E.2.- Agua No Facturada 68,127 <i>(m³/año)</i> 47.0%
			D.4.- Consumo no facturado no medido 0 <i>(m³/año)</i>	
	B.2.- Pérdidas de agua 68,127 <i>(m³/año)</i> 47.0%	C.3.- Pérdidas aparentes 7,694 <i>(m³/año)</i> 11.3%	D.5.- Consumo no autorizado No estimadas <i>(m³/año)</i>	
		C.4.- Pérdidas reales 60,433 <i>(m³/año)</i> 88.7%	D.6.- Imprecisiones de medida No estimadas <i>(m³/año)</i>	
			D.7.- Pérdidas reales en conducciones de agua bruta y tratamiento No estimadas <i>(m³/año)</i>	
			D.8.- Fugas en transporte y/o conducciones de distribución No estimadas <i>(m³/año)</i>	
			D.9.- Fugas y desbordamientos en transporte y/o conducciones de almacenamiento No estimadas <i>(m³/año)</i>	
			D.10.- Fugas en acometidas (hasta el punto de medida) No estimadas <i>(m³/año)</i>	

Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

Finalmente, se realizó el balance para todo el sistema, resultando tal como se muestra en la Tabla 5.4.

El volumen entregado en total al sistema “Virgen del cisne” y “25 de julio” es de 256,072 m³/año, de los cuales 163,566 m³/año corresponden a consumo autorizado y 92,507 m³/año a pérdidas de agua, esto indica que un 36.1% del agua que ingresa al sistema se está perdiendo.

El consumo autorizado, en su totalidad es facturado, del cual un 95.2% es medido y el 4.8% restante se estima a partir del consumo promedio histórico de los usuarios.

Respecto a las pérdidas de agua, el componente de las pérdidas aparentes de igual manera que los casos anteriores, se ha asumido como un 10% del consumo autorizado, esto de acuerdo con estimaciones que ha realizado la empresa gestora del servicio de agua potable, resultando en 16,357 m³/año, lo cual representa el 17.7% del total de pérdidas, siendo así el 82.3% correspondiente a las pérdidas reales, lo que equivale a 78,150 m³/año.

Al ser nulo el consumo autorizado no facturado, el agua no facturada coincide con las pérdidas de agua.

Tabla 5.4: Balance hídrico IWA. Sistema total

A.1.- Volumen de entrada al sistema 256,072 (m3/año)	B.1.- Consumo autorizado 163,566 (m3/año) 63.9%	C.1.- Consumo autorizado facturado 163,566 (m3/año) 100.0%	D.1.- Consumo facturado medido 155,634 (m3/año) 95.2%	E.1.- Agua Facturada 163,566 (m3/año) 63.9%
			D.2.- Consumo facturado no medido 7,932 (m3/año) 4.8%	
		C.2.- Consumo autorizado no facturado 0 (m3/año) 0.0%	D.3.- Consumo no facturado medido 0 (m3/año)	E.2.- Agua No Facturada 92,507 (m3/año) 36.1%
			D.4.- Consumo no facturado no medido 0 (m3/año)	
	B.2.- Pérdidas de agua 92,507 (m3/año) 36.1%	C.3.- Pérdidas aparentes 16,357 (m3/año) 17.7%	D.5.- Consumo no autorizado No estimadas (m3/año)	
			D.6.- Imprecisiones de medida No estimadas (m3/año)	
		C.4.- Pérdidas reales 76,150 (m3/año) 82.3%	D.7.- Pérdidas reales en conducciones de agua bruta y tratamiento No estimadas (m3/año)	
			D.8.- Fugas en transporte y/o conducciones de distribución No estimadas (m3/año)	
			D.9.- Fugas y desbordamientos en transporte y/o conducciones de almacenamiento No estimadas (m3/año)	
			D.10.- Fugas en acometidas hasta el punto de medida No estimadas (m3/año)	

Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

Con los datos obtenidos del balance hídrico se determinó los indicadores de pérdidas reales tanto para los sectores de “Virgen del Cisne” como los de “25 de Julio” y también los correspondientes a todo el sistema.

Con los indicadores de la Tabla 5.5 se puede notar que los sectores hidráulicos que conforman la zona “25 de Julio” presentan mayores pérdidas reales que aquellos de la zona “Virgen del Cisne”. Tal es la magnitud que el volumen incontrolado fugado de “25 de Julio” es tres veces mayor que el de “Virgen del Cisne”. Tanto IPF1, IPF2 e IPF3 de “25 de Julio” son mayores a los de “Virgen del Cisne”. Sucede igual con el índice estructural de fugas.

Al comparar los indicadores con la Tabla 3.3, respecto los valores admisibles que establece la empresa gestora del servicio, se puede concluir que la zona “Virgen del Cisne” tiene indicadores de pérdida admisibles, caso contrario sucede con la zona “25 de Julio”, donde ninguno de los indicadores se encuentra dentro de lo admisible.

En cuanto al índice estructural de fugas específicamente, si se compara los valores obtenidos con la Tabla 3.4, la zona de “Virgen del Cisne” se ubica en la categoría B que indica que existen posibilidades de mejora adicional, mientras que la zona “25 de Julio” se ubica en la categoría C la cual refiere una mala gestión de fugas, tolerable solo si los recursos son abundantes y barato, pero no siendo este el caso, se requiere una intervención en este zona para gestionar las fugas.

Tabla 5.5: Indicadores de pérdidas físicas o reales

Sistema Total					
Caudal pérdidas físicas (l/s)	2.41				
VIF (l/acom/día)	197.57				
IPF1 (l/s/km)	0.18				
IPF2 (l/s/km/bar)	0.04				
IPF3 (l/acom/h)	0.01				
UMF	55.05				
IFE	3.59				
"Virgen del Cisne"					
Caudal pérdidas físicas (l/s)	0.50				
VIF (l/acom/día)	93.01				
IPF1 (l/s/km)	0.09				
IPF2 (l/s/km/bar)	0.02				
IPF3 (l/acom/h)	0.004				
UMF	40.38				
IFE	2.30				
"25 de Julio"					
Caudal pérdidas físicas (l/s)	1.92				
VIF (l/acom/día)	279.21				
IPF1 (l/s/km)	0.24				
IPF2 (l/s/km/bar)	0.04				
IPF3 (l/acom/h)	0.01				
UMF	65.85				
IFE	4.24				

Elaborado por: Autor

En conclusión, de la auditoría hídrica, se determina que se debe implementar medidas de gestión de pérdidas prioritariamente en "25 de Julio" para disminuir fugas, mientras que en "Virgen del Cisne" pese a que, según los límites admisibles de la empresa gestora, la situación es admisible, acorde con (Liemberger et al., 2007) se puede implementar medidas ya que aún existe posibilidad de mejora, cuyo límite se establece de acuerdo a los valores referidos en la Tabla 3.3.

5.5 AUDITORÍA ENERGÉTICA

Una vez que ya se ha realizado la auditoría hídrica y se conoce los destinos que el agua tiene dentro del sistema, se puede realizar ahora una auditoría energética, cuya herramienta de análisis consiste en el balance de energías, el mismo se muestra en la Tabla 5.6 y en cuanto a energía suministrada por bombas, diferencia entre la que se entrega a la zona "Virgen del Cisne" y "25 de Julio". Este balance se ha determinado para el lapso de una semana.

La energía suministrada al sistema proviene en su totalidad de energía de eje, no existe energía natural ya que la fuente se encuentra en un punto más bajo que todo el sistema al que abastece.

El bombeo que abastece al sistema a gravedad de "Virgen del Cisne" aporta 1624.26 kWh/semana en tanto que el bombeo que abastece directo a la red de "25 de Julio" le entrega 1151.50 kWh/semana, resultando así un total de energía entregada a todo el sistema igual a 2775.76 kWh/semana.

Esa energía entregada al sistema es consumida por los usuarios y por aquella que se disipa en fugas, fricción, estación de bombeo y más o menos la energía de compensación debido a la presencia de depósitos en el sistema. En total la energía consumida tiene un valor de 2746.93 kWh/semana. Respecto a la energía total

entregada, existe un error del 1%, el cual permite validar el balance energético realizado.

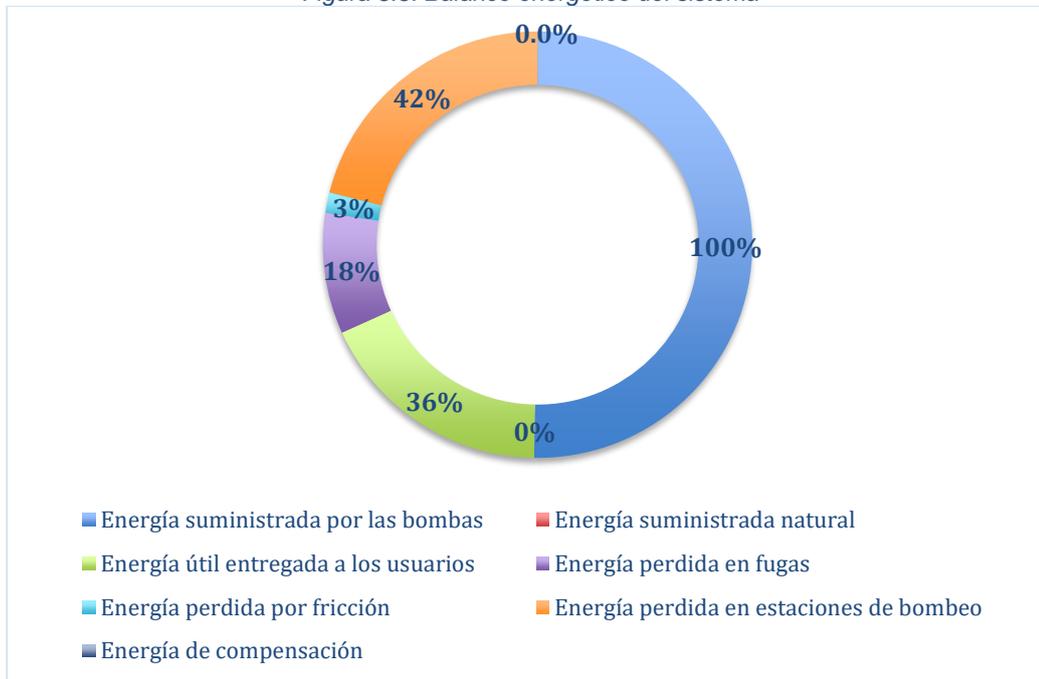
De las energías que se consumen dentro del sistema, se puede notar evidentemente que la mayor pérdida de energía se encuentra en la estación de bombeo, seguido a continuación por la energía que se pierde en fugas. Por otro lado, se tiene que la energía entregada a los usuarios es de 992.24 kWh/semana. Se contabilizan adelante con los indicadores de eficiencia energética.

Tabla 5.6: Balance energético del sistema total en kWh/semana

Energía suministrada por bombas ("Virgen del Cisne") kWh	1624.26	Energía entregada a usuarios kWh	992.24
		Energía saliente por fugas kWh	506.18
Energía suministrada natural kWh	0	Energía perdida por fricción kWh	85.75
		Energía perdida por bombeo kWh	1162.54
Energía suministrada por bombas ("25 de Julio") kWh	1151.50	Energía compensación kWh	0.23

Elaborado por: Autor

Figura 5.5: Balance energético del sistema



Elaborado por: Autor

La energía entregada a los usuarios tiene tres componentes que constan en la Tabla 5.7, por lo tanto, de los 992.24 kWh/semana, 669.25 kWh/semana corresponden a la energía mínima requerida por los usuarios, esto es para suplir su demanda a la presión de servicio fijada, mientras que 118.6 kWh/semana corresponden a energía topográfica y por último 206.2 kWh/semana se cuantifican como energía de exceso.

La energía topográfica tiene un peso del 4% sobre la energía total entregada al sistema y la energía en exceso corresponde al 7% de la energía total suministrada. Sin embargo, respecto a la energía propiamente entregada a usuarios, el mayor porcentaje, 67.3 %, es la energía mínima requerida, mientras que la energía topográfica representa el 11.9% y la energía en exceso un 20.7%. Esto último se debe a que no existe una adecuada sectorización en base a pisos de similar cota, el mal funcionamiento de las válvulas reguladoras existentes, así como una incorrecta regulación de la estación de bombeo directo a red,

De lo mencionado anteriormente, con el objetivo de mejorar el funcionamiento de la red, se propone cambiar la sectorización actual y proponer una adecuada regulación tanto con válvulas reguladoras como desde la estación de bombeo que inyecta a la red.

Tabla 5.7: Componentes de la energía útil entregada a usuarios

Energía entregada a usuarios	994.1 kWh	Energía mínima requerida	669.3 kWh	67.3 %
		Energía topográfica	118.6 kWh	11.9 %
		Energía en exceso	206.2 kWh	20.7 %

Elaborado por: Autor

Para realizar una valoración cualitativa de la eficiencia energética del sistema en estudio, se recurre a los indicadores cuyos resultados se indican en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Indicadores de eficiencia energética

Indicador	Descripción	Resultado
I_1	Exceso de energía suministrada	4.15
I_2	Eficiencia energética de la red	0.36
I_3	Energía disipada por fricción	0.03
I_4	Energía perdida por fugas	0.18
I_5	Cumplimiento de estándares	1.48

Elaborado por: Autor

El indicador I_1 sugiere que se está entregando 4 veces más energía de la que el sistema requiere para satisfacer la demanda en los nudos de consumo a la presión que requieren.

El indicador I_2 deja en evidencia que el 36% de la energía entregada al sistema es energía útil entregada a los usuarios, mientras que I_3 señala que está perdiendo un 3% de energía en disipación por fricción.

En cuanto a fugas refiere, el indicador I_4 arroja que un 18% de la energía que ingresa al sistema se está perdiendo en fugas.

Por último, se determina el indicador I_5 el cual refiere al cumplimiento de los requerimientos de los usuarios, ya que relaciona la energía útil entregada a los usuarios con la energía mínima requerida. En este caso, teniendo este indicador un valor de 1.48, lo que indica es que se está entregando mayor presión que la estrictamente requerida por los usuarios, esto es entonces que la energía útil entregada a los usuarios es un 48% mayor a la energía mínima requerida.

Aunque no se determinó un indicador como tal para la energía perdida en bombas, la **Error! Reference source not found.** muestra que la energía que se pierde en las estaciones de bombeo, representa un 42% de la energía que se le suministra en cabecera al sistema. En la Tabla 5.9 se muestra que el 58.5% de la energía es suministrada por el sistema de bombeo bajo “Virgen del Cisne” y el 41.5% restante por las bombas de “25 de Julio”. Así mismo se aprecia que de las pérdidas en las bombas, el 53.2% se dan en la estación de bombeo directo a red “25 de Julio”. Esto se debe, acorde a lo observado en el modelo, que las bombas de la estación “25 de Julio” por un lado tienen una eficiencia máxima de 60.67% y además su operación se da en un rango que la mayoría del tiempo está por fuera de la zona óptima de operación y por lo tanto empeora el rendimiento con el que funciona.

Tabla 5.9: Detalle de energía en sistemas de bombeo

Estación de bombeo	Energía suministrada		Energía perdida en bombas	
	kWh	Porcentaje	kWh	Porcentaje
Baja “Virgen del Cisne”	1,624.26	58.5 %	543.5	46.8 %
Alta “25 de Julio”	1,151.50	41.5 %	619.0	53.2 %
Total	2,775.76	100.0 %	1,162.5	100.0 %

Elaborado por: Autor

Como conclusión de la auditoría energética, se debe intervenir prioritariamente en las bombas y también en gestionar presiones para con ello reducir el caudal de fugas.

6 ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN PARA EL SISTEMA

6.1 ESTRATEGIA 1: SECTORIZACIÓN DE RED

Actualmente el sistema de agua potable cuenta con una sectorización que permite controlar los flujos de agua, reducir el área de búsqueda de fuga, y conocer el volumen de agua suministrada para realizar las auditorías hídricas.

Debido a las presiones elevadas en horario de máximo y mínimo consumo en varios nudos de la red, es importante reconfigurar los sectores hidráulicos por pisos de presión. Adicional a esto se cambia la fuente de abastecimiento de bombeo directo al sistema por gravedad para un determinado grupo de nudos, constituyendo así un nuevo sector hidráulico.

Para definir la nueva sectorización se ha tomado en consideración los siguientes criterios:

- Agrupación de nudos por zonas de cota similar.
- Sectores que se puedan unificar mediante instalación de nueva tubería e interconexión de tubería existente.
- Sectores que se puedan independizar mediante el cierre de tuberías.

Se establece, en lo posible, que los nuevos límites de los sectores hidráulicos coincidan con las calles existentes o divisiones naturales como cuerpos de agua, barrancos o acequias. Físicamente este cambio de sectorización se realiza instalando una válvula de control en tubería existente para cerrarla, y con la instalación de tubería para interconectar circuitos adyacentes.

Para definir los sectores hidráulicos que serán abastecidos por gravedad desde el reservorio, se ha definido la cota máxima hasta la cual el reservorio pueda abastecer cumpliendo una presión mínima de 15 mca.

Teniendo en cuenta que el reservorio se encuentra en la cota 106.4 msnm y tiene una modulación de nivel entre 3.40m y 3.75m, se tendría una altura piezométrica mínima disponible de 109.8 mca para el abastecimiento. Esta altura piezométrica junto con las pérdidas hasta el punto crítico de la red, garantiza la presión mínima de servicio hasta la cota 93.7 msnm.

Tabla 6.1: Datos para cálculo de cota máxima de abastecimiento por el sistema a gravedad

Cota reservorio	106.4 msnm
Nivel mínimo de reservorio	3.40 m
Longitud de tubería a punto crítico	496.35 m
Perdida unitaria a punto crítico	2.19 mca/km
Nudo crítico	J-6261
Cota nudo crítico	93.545 msnm

Elaborado por: Autor

Figura 6.1: Cota máxima para abastecimiento desde reservorio



Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

Es por esto que se reconfigura los sectores hidráulicos de tal manera que, los sectores que cuenten con una cota inferior a 93.7 msnm sean abastecidos por gravedad desde el reservorio y los que se encuentren a una cota superior a 93.7 msnm sean abastecidos mediante bombeo directo a red.

En la tabla 5.1 del acápite 5.1 se puede verificar que en los sectores hidráulicos NRO-941 y NRO-942, que se encuentran abastecidos por bombeo directo a red, existen nudos ubicados por debajo de la cota en la cual se garantiza la presión mínima de servicio desde el reservorio. Debido a esto se decide reconfigurar estos sectores hidráulicos.

De igual forma, en los sectores NRO-932 y NRO-937 ubicados en la parte alta, existe una gran diferencia entre su cota mínima y máxima, por lo que se divide estos sectores para formar pisos de presión.

Para simular la reconfiguración hidráulica en el modelo hidráulico de Epanet se ha simulado la instalación de válvulas mediante el cierre de tuberías e incorporando nuevas líneas para interconectar tuberías adyacentes.

En la Tabla 6.2 se detallan los ID de las tuberías cerradas, así como las tuberías adicionales para lograr la nueva sectorización, donde se detalla los 94.23 metros de tubería a instalar.

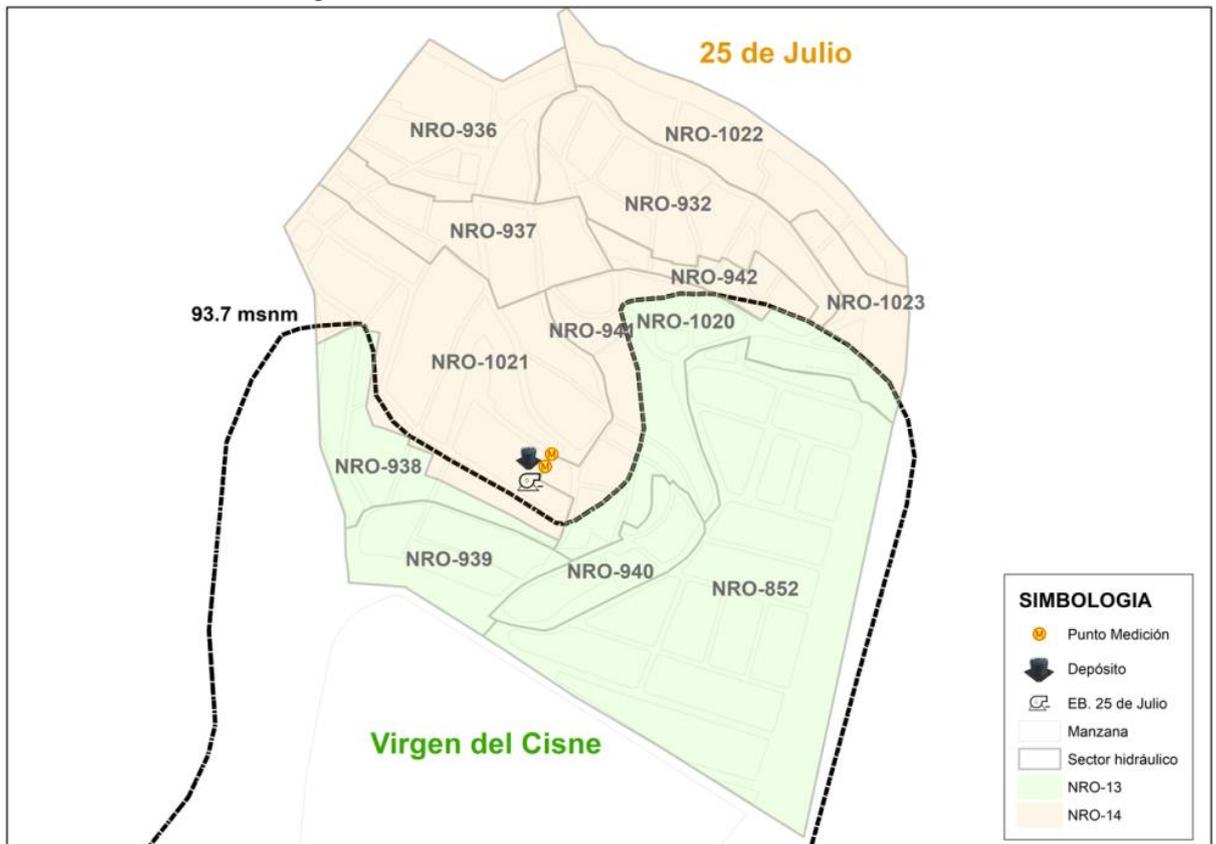
Tabla 6.2: Identificación de tubería cerradas y adicionadas

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Sector hidráulico	ID Tuberías cerradas	Tubería nueva	
				ID	Longitud (m)
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-1020	-	L1	1.50
			-	L2	78.85
			-	L3	5.00
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-932	610677110	L4	8.88
			60975755	-	-
			609740	-	-
		NRO-937	609669	-	-
			609703	-	-
		NRO-941	6097370	-	-
			6097480	-	-
			610662	-	-
			610705	-	-
			610659	-	-
		NRO-942	610680	-	-

Elaborado por: Autor

En la Figura 6.2 se muestra los nuevos sectores hidráulicos conformados y el distrito de medición al que pertenecen.

Figura 6.2: Plano de nueva sectorización



Fuente: Interagua Cia. Ltda,
Elaborado por: Autor

En la Tabla 6.3 se presenta la nueva distribución de cotas por sector hidráulico, donde se puede apreciar que la diferencia entre las cotas máximas y mínimas fue reducida en todos los sectores hidráulicos de la parte alta. En los sectores hidráulicos NRO-932, NRO-937 y NRO-1021 se tiene una gran diferencia entre la cota máxima y mínima debido a las limitantes para sectorización indicados previamente.

Tabla 6.3: Diferencia de cota en nueva sectorización

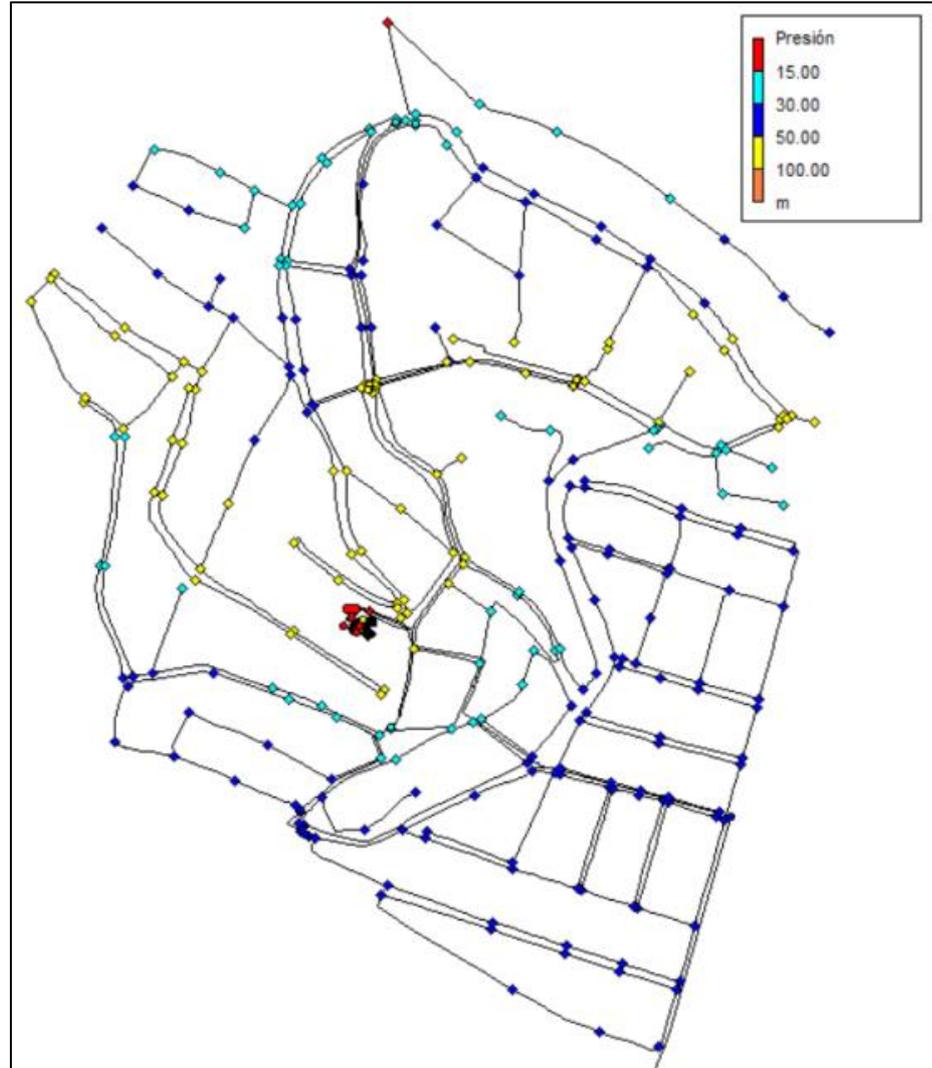
Sistema abastecimiento	Sector residencial	Sector hidráulico	Cota mínima	Cota máxima	Δ Cota
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-852	63.34	75.99	12.65
		NRO-938	71.70	93.55	21.85
		NRO-939	63.19	86.38	23.19
		NRO-940	63.48	83.23	19.75
		NRO-1020	72.38	93.60	21.22
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-932	105.87	151.32	45.45
		NRO-936	138.38	156.85	18.47
		NRO-937	112.07	151.66	39.59
		NRO-941	97.80	120.35	22.55
		NRO-942	89.98	108.30	18.32
		NRO-1021	94.26	138.28	44.02
		NRO-1022	130.49	160.07	29.58
		NRO-1023	103.33	126.84	23.51

Elaborado por: Autor

Con esta nueva sectorización se comprueba la presión mínima y la presión máxima de servicio. En la Figura 6.3 se puede verificar que no existen nudos de consumo que no cumplan con la presión mínima requerida. Así mismo se constata que no existen nudos con presión que sobrepasen los 100 mca, pero se mantienen nudos con presión mayor a 30 mca e inclusive mayor a 50 mca.

Se puede concluir, que es factible la regulación de presiones en varios nudos de la red en horario de máximo consumo.

Figura 6.3: Presión mínima en red de distribución con nueva sectorización

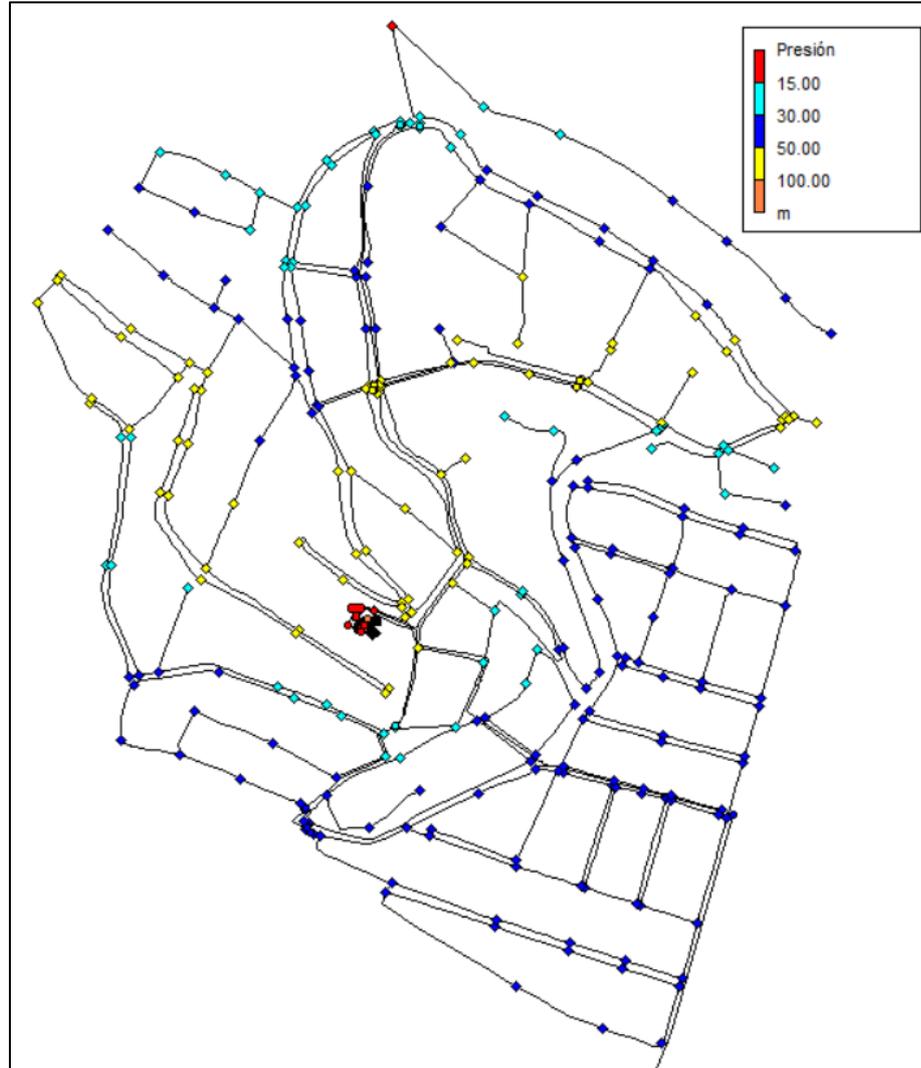


Elaborado por: Autor

En lo que respecta a la presión máxima, se puede observar en la Figura 5.3 que no se presentan presiones superiores a 100 mca, y que los nudos mantienen presiones sobre los 30 mca.

Tal como se detectó en el análisis previo, es factible la regulación de presiones en la red.

Figura 6.4: Presión máxima en red de distribución con nueva sectorización



Elaborado por: Autor

Considerando la nueva sectorización, se logra una reducción del caudal de fuga de 0.46 l/s, reduciendo de 2.42 l/s a 1.96 l/s las pérdidas físicas. De igual forma se logra reducir el porcentaje de utilización del sistema de bombeo de la estación baja, disminuyendo de 59.67% a 56.40%, por lo que se reduce 5.5 horas de bombeo a la semana.

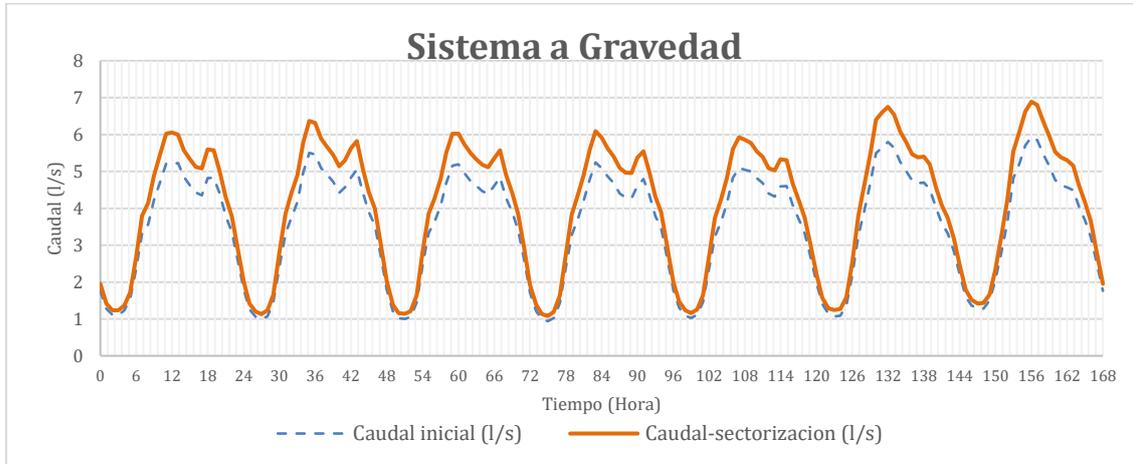
Tabla 6.4: Auditoría hídrica con nueva sectorización

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Distrito de medición	Caudal inyectado	Consumo facturado	Pérdidas aparentes	Caudal de fuga
			l/s	l/s	l/s	l/s
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-13	4.06	3.18	0.31	0.57
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-14	3.60	2.01	0.20	1.39
TOTAL			7.66	5.19	0.51	1.96

Elaborado por: Autor

En la Figura 6.5 se muestra la comparación de la modulación del caudal inyectado en el sistema a gravedad, con la sectorización inicial y la nueva sectorización, donde se puede apreciar un pequeño incremento en el caudal mínimo nocturno y el incremento del caudal en el horario de máximo consumo. Esto debido al incremento de nudos abastecidos por el sistema a gravedad.

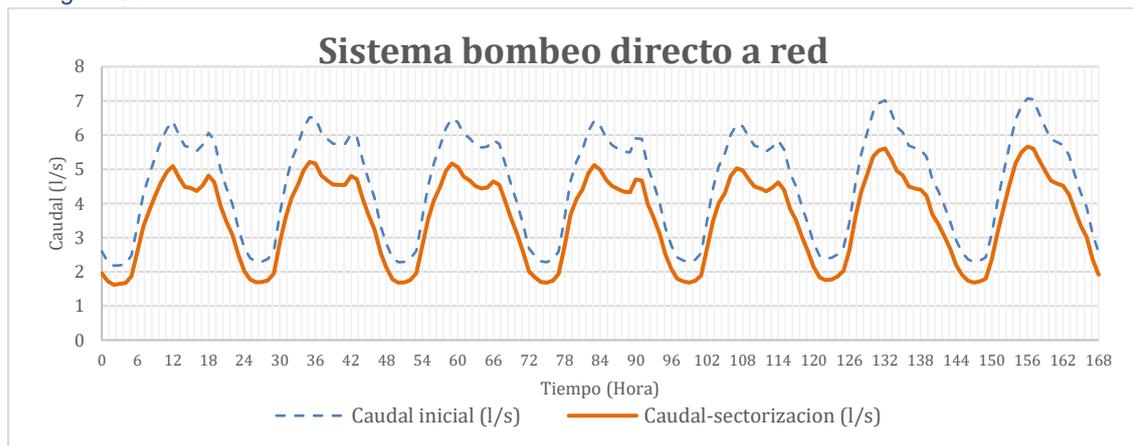
Figura 6.5: Modulación de caudal en el sistema a Gravedad con la nueva sectorización



Elaborado por: Autor

En la Figura 6.6 se puede observar la reducción del caudal inyectado en el sistema de bombeo directo a red en las horas de máximo consumo y en las horas de mínimo consumo, a consecuencia de quitar los nudos con exceso de presión.

Figura 6.6: Modulación de caudal en el sistema bombeo directo a red con la nueva sectorización



Elaborado por: Autor

6.2 ESTRATEGIA 2: REGULACIÓN DE PRESIONES

Una vez sectorizada la red por pisos de presión se tiene sectores hidráulicos con presiones homogéneas que permiten una correcta regulación de presiones.

La regulación de presión permite además de reducir el volumen de fuga, reducir la energía suministrada por bombeo y con ello mitigar el impacto que el consumo desmedido genera sobre el medio ambiente.

Con la nueva sectorización se tienen las siguientes presiones en los sectores en horario de máximo consumo (ver Tabla 6.5):

Tabla 6.5: Detalle de presiones en horario de máximo consumo

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Sector hidráulico	Presión máxima	Presión mínima
			mca	mca
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-852	44.60	31.89
		NRO-938	37.08	15.23
		NRO-939	45.02	21.82
		NRO-940	44.55	24.89
		NRO-1020	36.43	15.26
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-932	71.30	25.92
		NRO-936	33.95	20.39
		NRO-937	56.32	25.71
		NRO-941	79.53	56.95
		NRO-942	87.35	69.03
		NRO-1021	82.31	38.57
		NRO-1022	46.73	17.16
		NRO-1023	69.57	46.05

Elaborado por: Autor

De la Tabla 6.5 se puede apreciar que en los sectores hidráulicos NRO-852, NRO-939 y NRO-940, abastecidos a gravedad desde el reservorio, el punto crítico presenta un exceso mayor a 7 mca sobre la presión mínima requerida. En lo referente a los sectores hidráulicos abastecidos por bombeo directo a red, se puede apreciar que en el sector hidráulico NRO-1022 el punto crítico se encuentra sobre la presión mínima requerida, al existir una válvula reguladora sobre la conducción, VRP-1, se puede ajustar la presión de salida para cumplir con la presión de servicio en el punto crítico de este sector. Para el resto de sectores, se tiene un exceso de presión en el punto de control que se puede disipar mediante instalación de VRP.

6.2.1 Ajuste de Válvulas reguladoras de presión existentes

Tal como se mencionó en el acápite 4.2.4, existen tres reguladoras de presión, las cuales trabajan con presión fija de salida. La VRP-1 regula una parte del sector NRO-937, no se puede ajustar la presión de salida de esta VRP debido a la existencia de acometidas largas de ½" que abastecen a usuarios en cotas más altas. Para el caso de la VRP-2, con la nueva sectorización, se puede reducir la presión de salida de esta VRP, ya que se tiene presión de 46.05 mca en el punto crítico del nuevo sector NRO-1023. Y, la VRP-3, ubicada sobre la tubería de conducción, regula todos los sectores de la parte alta, debido a que se tiene presión de 17.16 mca en el punto crítico de toda la parte alta, se puede reducir la presión a la salida de esta VRP.

Tabla 6.6: Ajuste de válvulas reguladoras de presión existente.

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Sector hidráulico	Válvula reguladora	Presión de salida	Ajuste de Presión de salida	Δ Presión
				mca	mca	mca
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-937	VRP-1	38.9	-	-
		NRO-1023	VRP-2	65.8	34.9	30.9
		Conducción	VRP-3	56.4	54.3	2.1

Elaborado por: Autor

6.2.2 Instalación de nuevas válvulas reguladoras de presión

Según lo indicado en la Tabla 6.5, se tienen sectores hidráulicos con presiones sobre la presión mínima requerida en el punto más desfavorable de la red. En los sectores hidráulicos que no cuentan con VRP existente, se añade la válvula reguladora de presión.

En la Tabla 6.7 se presentan las VRP colocadas en el modelo hidráulico para reducir la presión. Se coloca una VRP en el ingreso de cada sector que presenta posibilidad reducir la presión en su punto crítico, para el caso de los sectores NRO-941 y NRO-942 se sitúa una VRP en la tubería de conducción de ingreso a estos dos sectores hidráulicos debido a que colocar una para cada sector no representa una disminución tanto más significativa en el caudal de pérdidas.

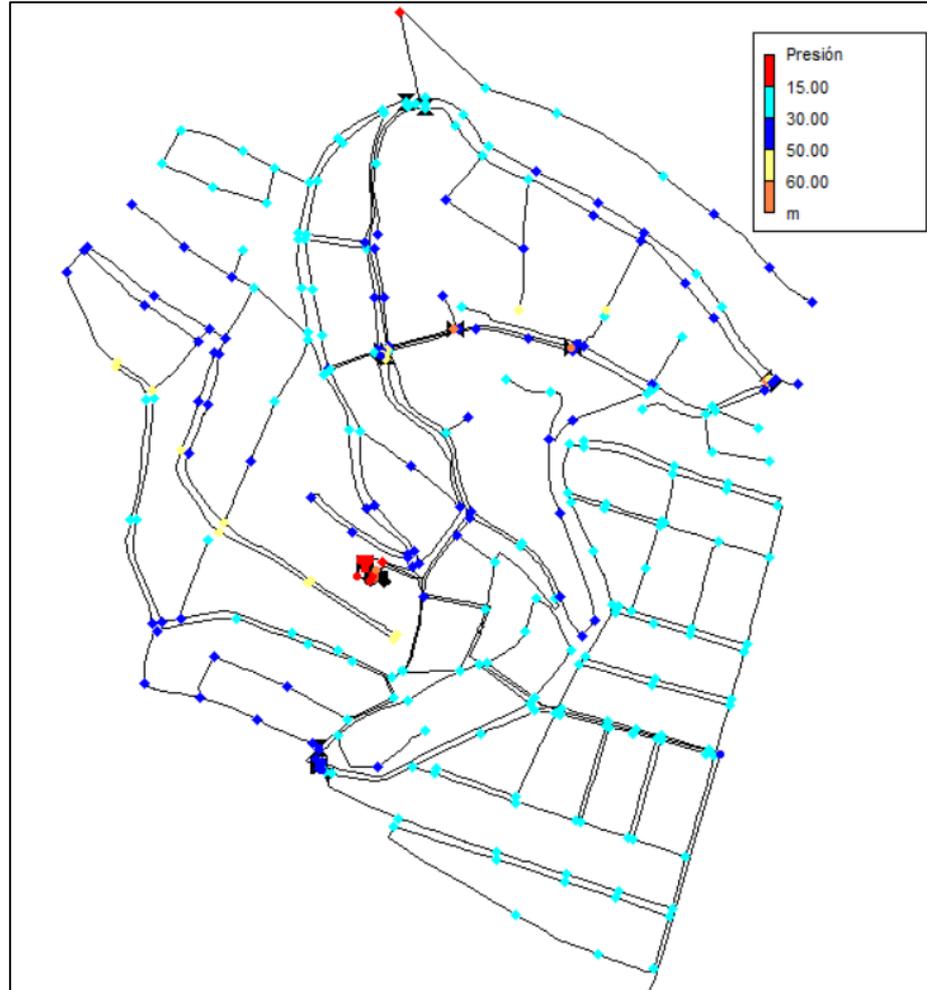
Tabla 6.7: Válvulas reguladoras de presión nuevas

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Sector hidráulico	Válvula reguladora	Presión de salida
				mca
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-852	VRP-4	27.9
		NRO-939	VRP-5	36.8
		NRO-940	VRP-6	34.8
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-932	VRP-7	15.0
		NRO-936	VRP-8	17.8
		NRO-937	VRP-9	44.9
		NRO-941	VRP-10	37.3
		NRO-942		
NRO-1021	VRP-11	32.8		

Elaborado por: Autor

En la Figura 6.7 se puede verificar que todos los nudos de consumo cumplen con la presión mínima de servicio y dos nudos de la red, ubicados aguas arriba de válvulas reguladora de presión, superan los 50 mca. Pero esto se justifica ya que se encuentran la conducción principal, la misma que ya no puede ser regulada.

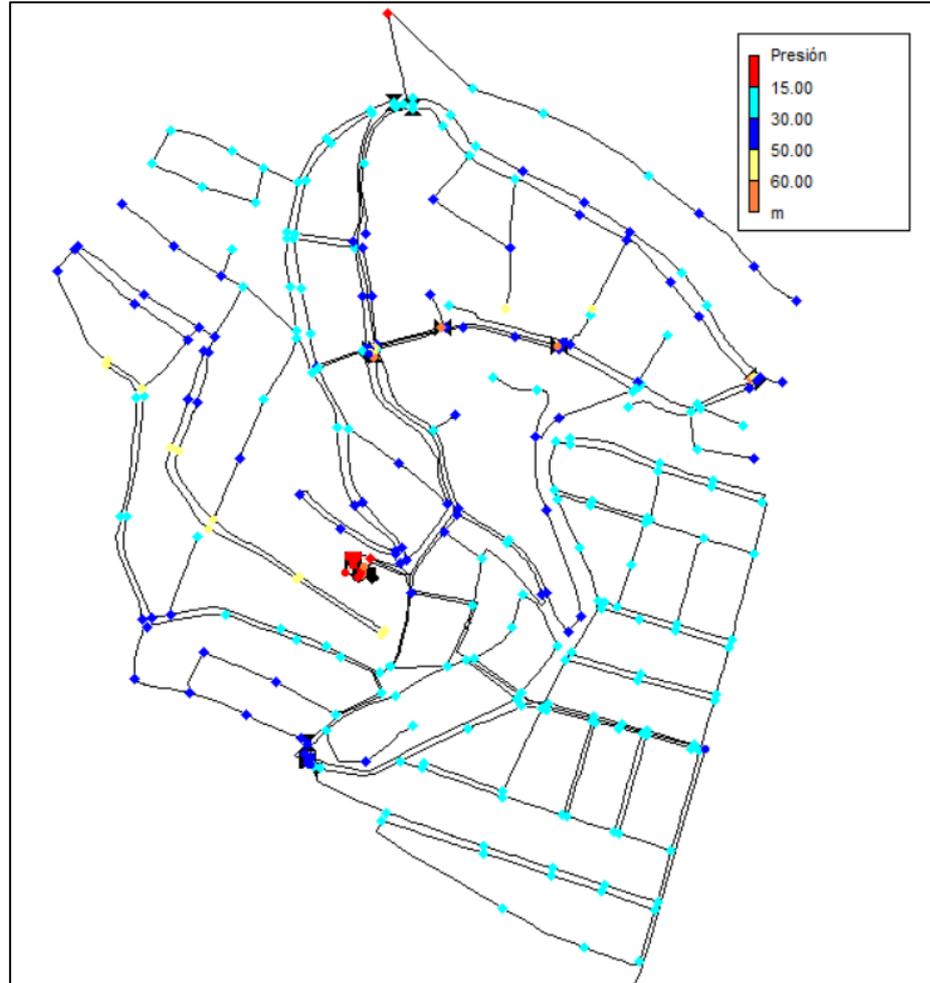
Figura 6.7: Presión mínima en red de distribución con instalación de VRP



Elaborado por: Autor

En lo que respecta a la presión máxima, se puede observar en la Figura 6.8 que únicamente en tres nudos de la red, ubicados en la conducción principal aguas arriba de válvulas reguladora de presión, superan los 50 mca. Pero esto se justifica ya que se encuentran la conducción principal, la misma que ya no puede ser regulada.

Figura 6.8: Presión máxima en red de distribución con instalación de VRP



Elaborado por: Autor

Con la instalación de nuevas VRP y el ajuste de las VRP existentes, se logra una reducción del caudal de fuga de 0.86 l/s, reduciendo de 1.96 l/s a 1.08 l/s las pérdidas físicas. De igual forma se logra reducir el porcentaje de utilización del sistema de bombeo de la estación baja “Virgen del Cisne”, disminuyendo de 56.40% a 50.23%, por lo que se reduce 10.4 horas de bombeo a la semana.

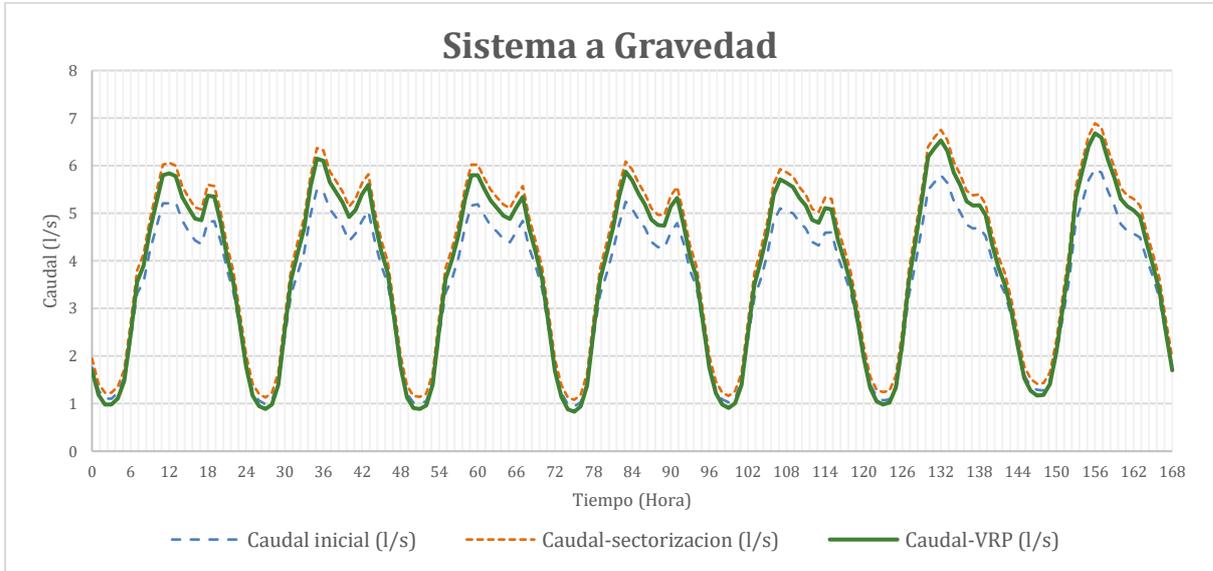
Tabla 6.8: Auditoría hídrica con instalación de VRP

Sistema abastecimiento	Sector residencial	Distrito de medición	Caudal inyectado	Consumo facturado	Pérdidas aparentes	Caudal de fuga
			l/s	l/s	l/s	l/s
Gravedad	Virgen del Cisne	NRO-13	3.82	3.18	0.31	0.33
Bombeo directo a red	25 de Julio	NRO-14	2.96	2.01	0.20	0.75
TOTAL			6.78	5.19	0.51	1.08

Elaborado por: Autor

En la Figura 6.9 se muestra la comparación de la modulación del caudal inyectado en el sistema a gravedad, con la sectorización inicial, el cambio en la sectorización y la estrategia de regulación, donde se puede apreciar la reducción del caudal mínimo nocturno y reducción del caudal en el horario de máximo consumo.

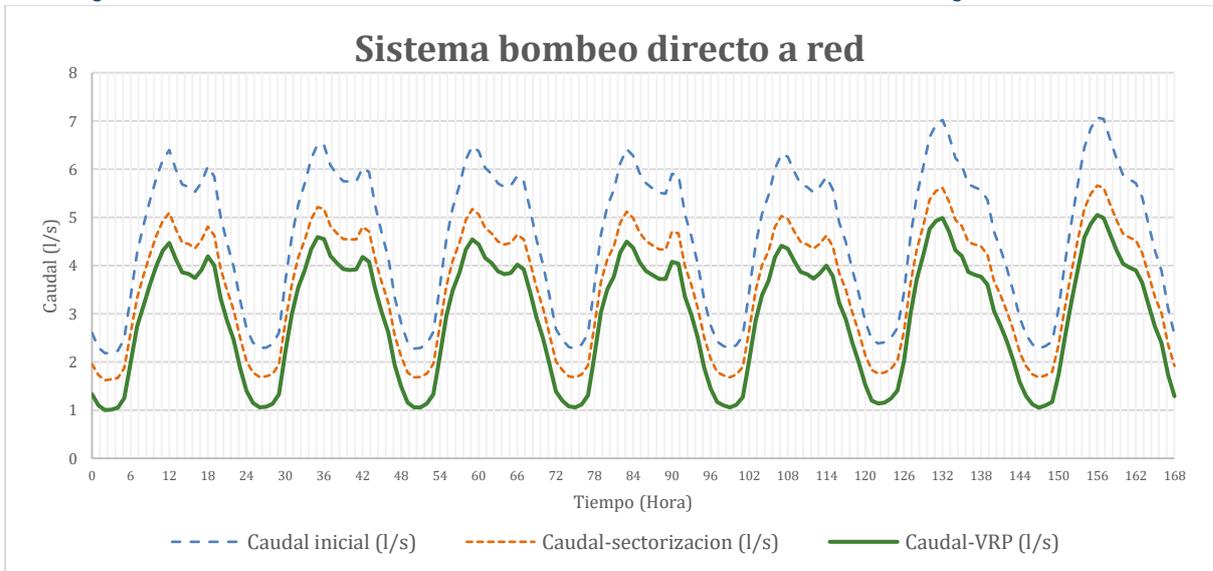
Figura 6.9: Modulación de caudal en el sistema a Gravedad con estrategia de VRP



Elaborado por: Autor

En la Figura 6.10 se puede observar la reducción del caudal inyectado en el sistema de bombeo directo a red en las horas de máximo consumo y en las horas de mínimo consumo.

Figura 6.10: Modulación de caudal en el sistema bombeo directo a red con estrategia de VRP



Elaborado por: Autor

6.3 ESTRATEGIA 3: CAMBIO DE BOMBAS

Debido a la baja eficiencia de las bombas instaladas en la estación de bombeo directo a red “25 de Julio”, donde se pierde el 53.8% de su energía suministrada, se ha considerado el cambio de estos equipos de bombeo, por unos con mejor eficiencia y que permitan cumplir con la presión mínima de servicio en todos los puntos de la red.

Esto se efectúa una vez implantadas las estrategias de sectorización y regulación de presiones. Para la elección de la bomba, se analizaron catálogos de diferentes fabricantes, donde se encontraron en la mayoría de ellos rendimientos muy bajos para las condiciones de funcionamiento. Es por esto que se selecciona la combinación de bombas en paralelo, una bomba de marca PENTAIR modelo PVM(X)5-15 y dos bombas de marca PENTAIR modelo PVM(X)10-10.

Con las bombas seleccionadas se procede a calcular la curva de consigna del sistema, para esto se suprime la reguladora de presión VRP-1, ubicada en la tubería de conducción de la parte alta “25 de Julio”, ya que la regulación de su zona de influencia se ejecuta con las nuevas bombas incorporadas y con la curva de consigna calculada.

En la Tabla 6.9 se presenta las características de la bomba PENTAIR PVM(X)5-15 y en la Figura 6.11 su curva característica.

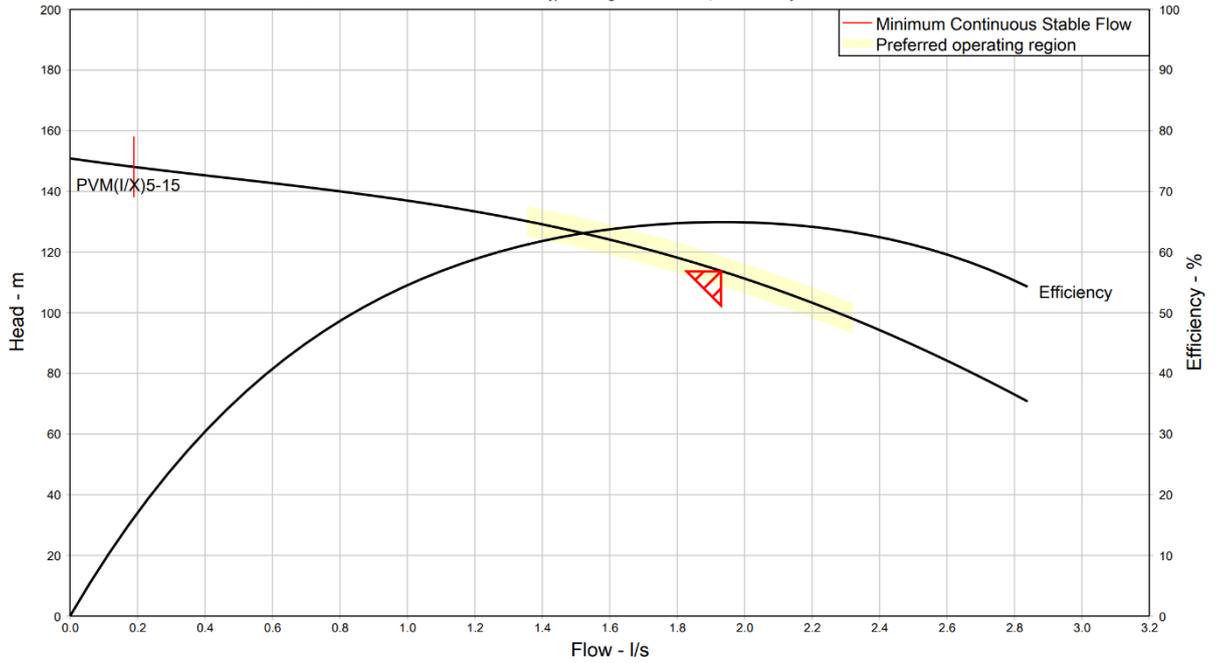
Tabla 6.9 Detalle de bomba 1 de estación directa a red

Marca	PENTAIR
Modelo	PVM(X)5-15
Altura nominal	113.6 m
Caudal nominal	1.93 l/s
Eficiencia	67 %
Frecuencia	60 Hz
Velocidad	3500 rpm

Fuente: <https://pentair.portal.intelliquip.com/>

Elaborado por: Autor

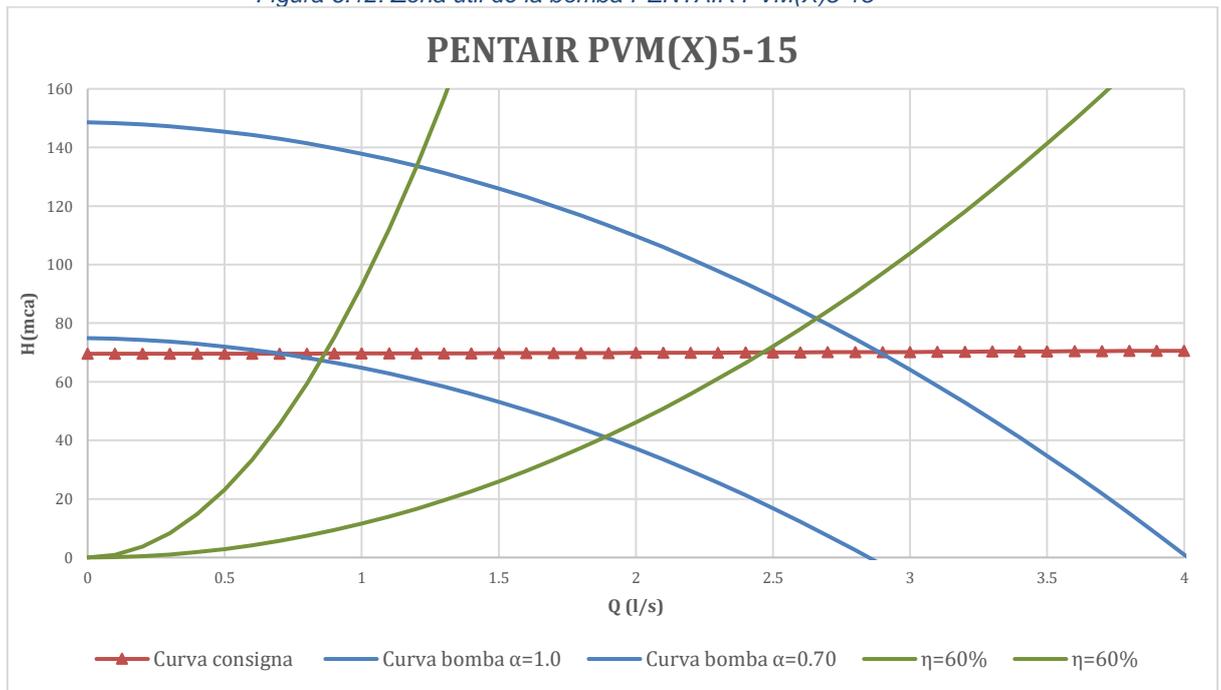
Figura 6.11 Curva de bomba PENTAIR PVM(X)5-15



Fuente: <https://pentair.portal.intelliquip.com/>

Se define la zona útil de la bomba con un rendimiento de 60% y una velocidad mínima de 0.7, por lo que la bomba trabaja entre el caudal mínimo nocturno de 0.9 l/s y 2.0 l/s. En la Figura 6.12 se presenta la zona útil de esta bomba.

Figura 6.12: Zona útil de la bomba PENTAIR PVM(X)5-15



Elaborado por: Autor

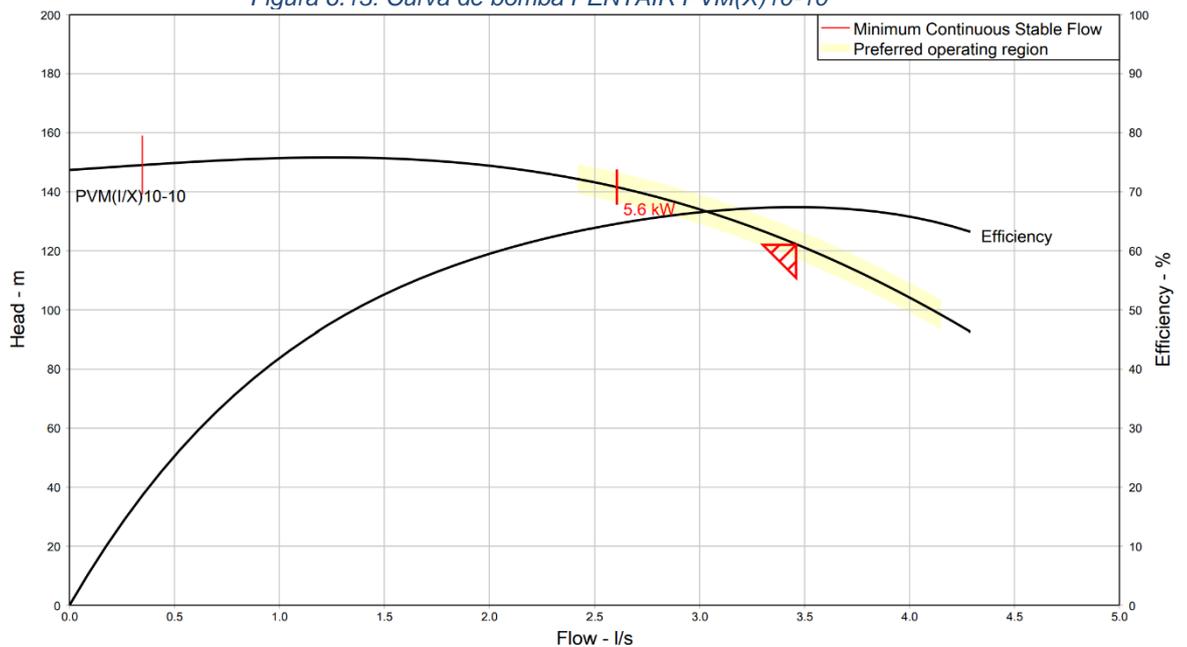
En la Tabla 6.10 se presenta las características de la bomba PENTAIR PVM(X)10-10 y en la Figura 6.13 su curva característica.

Tabla 6.10: Detalle de bomba 2 de estación directa a red

Marca	PENTAIR
Modelo	PVM(X)5-15
Altura nominal	122.3 m
Caudal nominal	3.46 l/s
Eficiencia	68 %
Frecuencia	60 Hz
Velocidad	3500 rpm

Fuente: <https://pentair.portal.intelliquip.com/>
Elaborado por: Autor

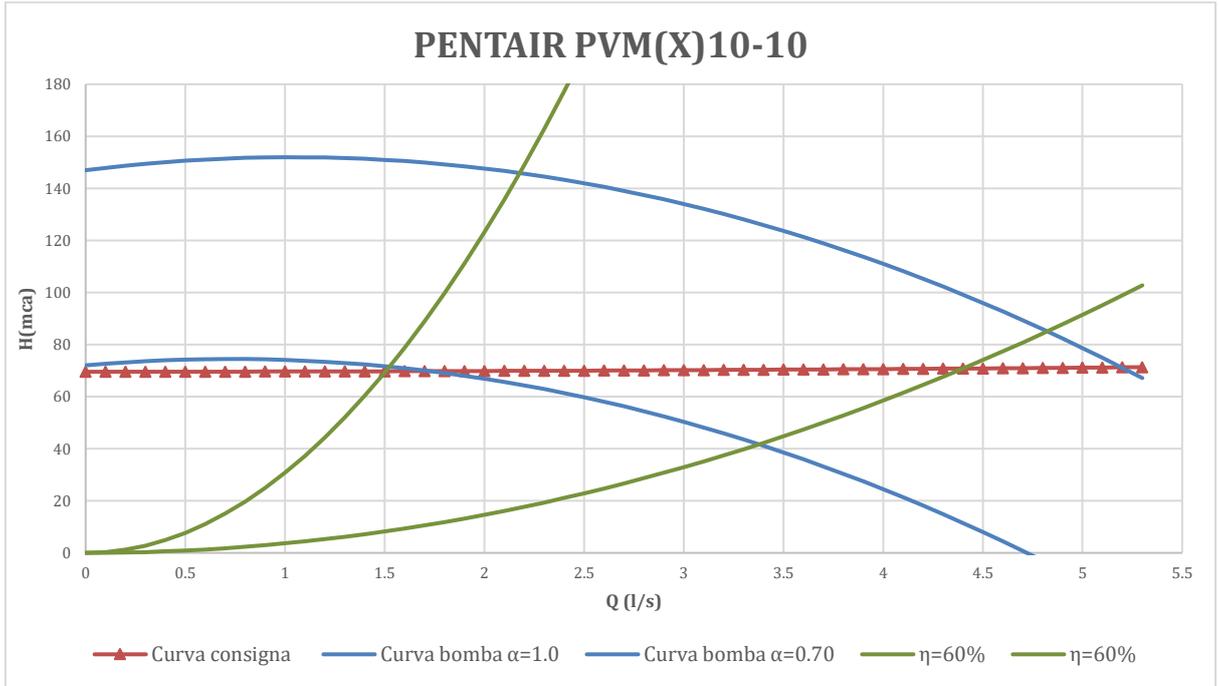
Figura 6.13: Curva de bomba PENTAIR PVM(X)10-10



Fuente: <https://pentair.portal.intelliquip.com/>

Se define la zona útil de la bomba con un rendimiento de 60% y una velocidad mínima de 0.70, por lo que la bomba trabaja entre 2.0 l/s y 4.2 l/s. Para caudales mayores a 4.2 l/s se trabaja con dos bombas en paralelo PENTAIR PVM(X)10-10. En la Figura 6.14 se presenta la zona útil de esta bomba.

Figura 6.14: Zona útil de la bomba PENTAIR PVM(X)10-10

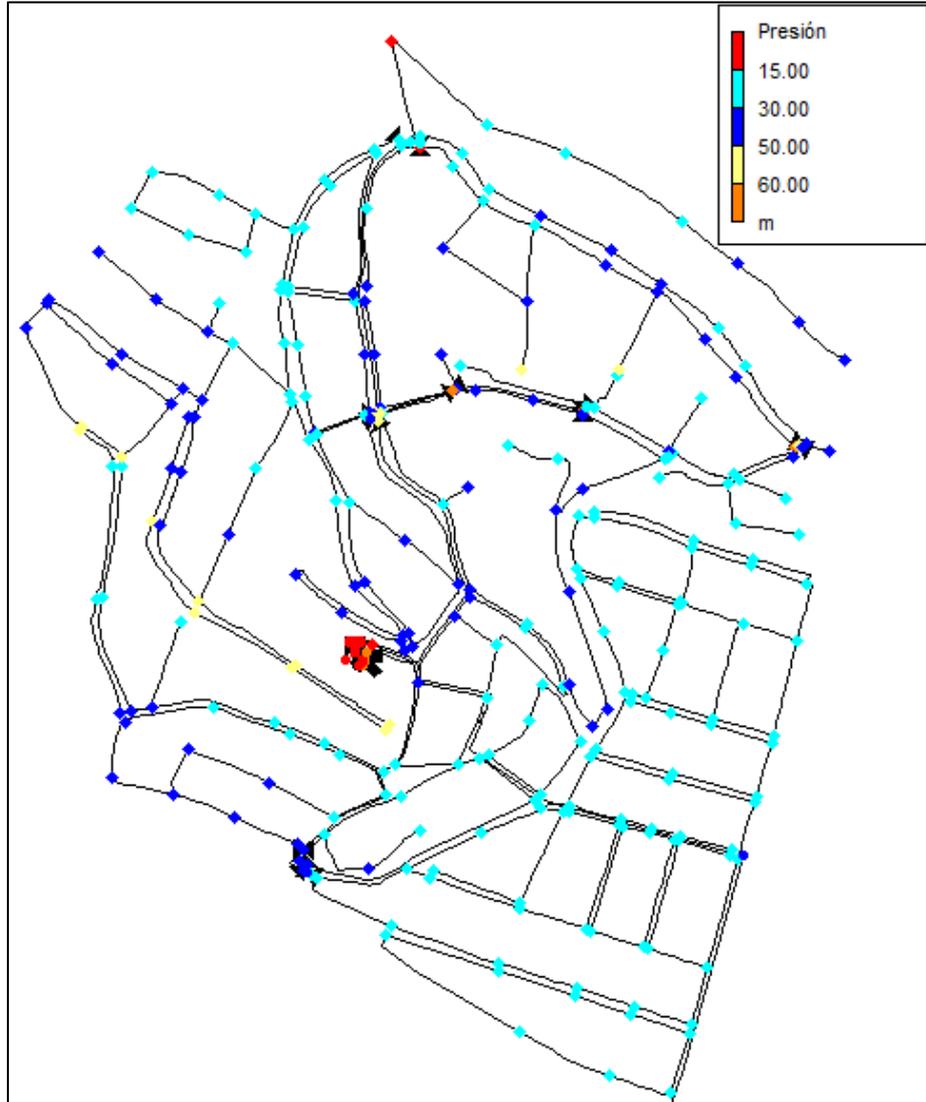


Elaborado por: Autor

Al trabajar las bombas dentro de la zona útil definida, se garantiza que el rendimiento de las bombas sea superior al 60% a diferencia de las bombas iniciales que su rendimiento oscilaba 25% y 55%

En la Figura 6.15 se puede verificar que se mantienen las presiones en máximo consumo, tal como en la estrategia de regulación de presión

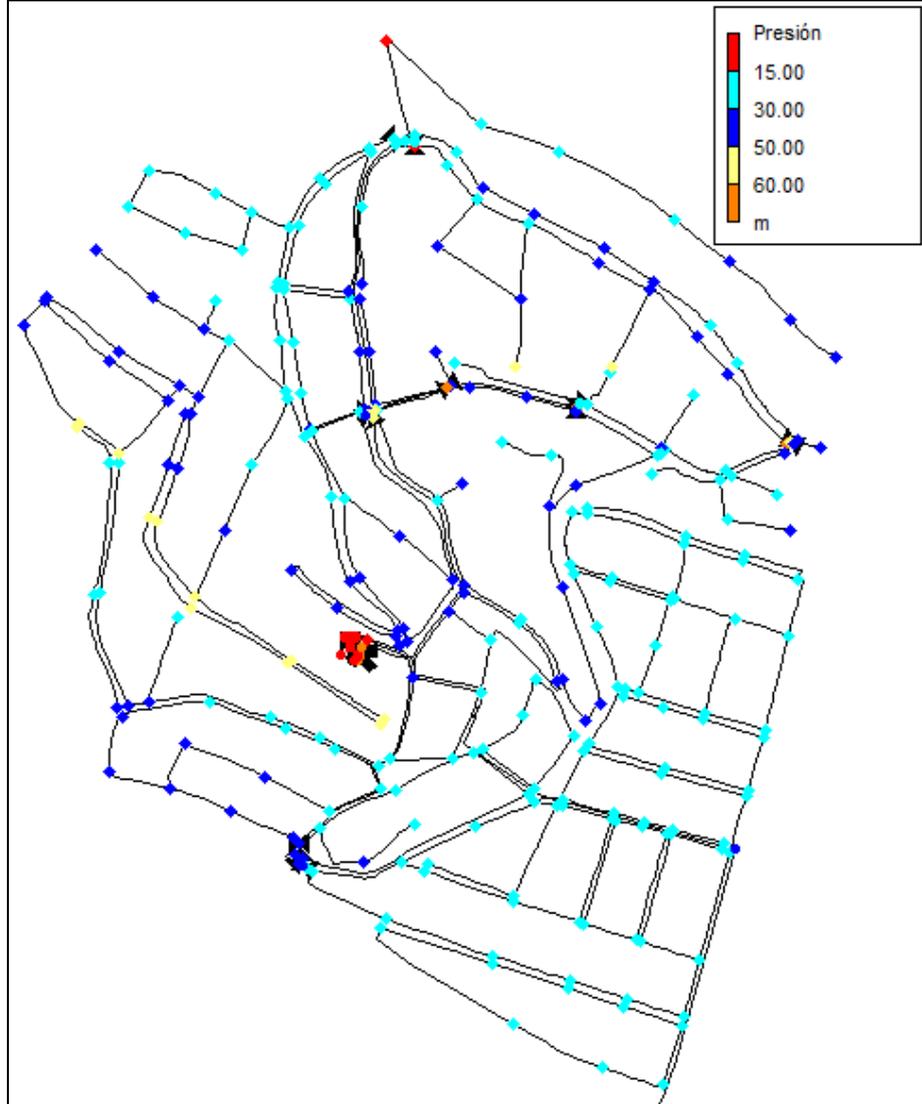
Figura 6.15: Presión mínima en red de distribución con regulación de estación de bombeo



Elaborado por: Autor

De igual forma las presiones máximas se mantienen del mismo modo que con la regulación de presión. (ver Figura 6.16)

Figura 6.16: Presión máxima en red de distribución con regulación de estación de bombeo



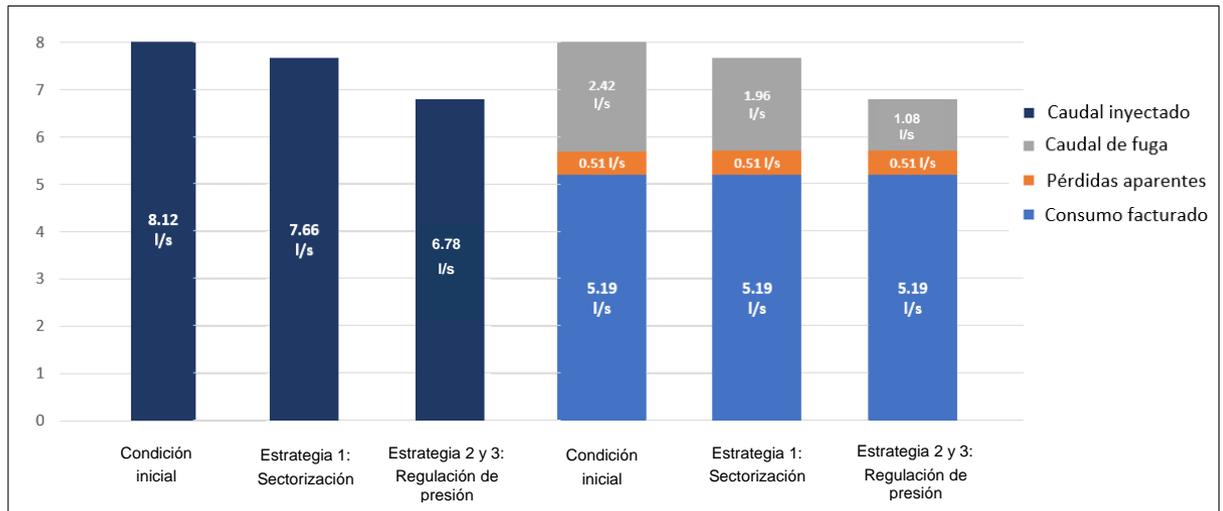
Elaborado por: Autor

6.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez aplicadas las estrategias descritas anteriormente se han obtenido los resultados que se describen ese acápite.

En primer lugar, se presenta el análisis de la reducción del caudal inyectado y fugado en función de las estrategias aplicadas.

Figura 6.17: Disminución de caudal en el sistema con la aplicación de estrategias



Elaborado por: Autor

Se puede corroborar en la Figura 6.17 que al aplicar la estrategia de sectorización se redujo en 5.7% el caudal inyectado y al regular presiones un 11.5% más. En tanto que el caudal fugado se disminuyó en primera instancia, esto es desde la condición inicial hasta aplicar la estrategia de sectorización, en 19% y al regular presiones se redujo adicionalmente un 44.9%. Al no haberse aplicado estrategias para reducción de pérdidas aparentes, este caudal se mantiene igual.

En la Tabla 6.11 se presenta el balance IWA de todo el sistema y en la Tabla 6.12 los indicadores posteriores a la aplicación de las tres estrategias de optimización.

Tabla 6.11: Balance hídrico IWA. Sistema total

A.1.- Volumen de entrada al sistema 213,814 <i>(m3/año)</i>	B.1.- Consumo autorizado 163,566 <i>(m3/año)</i> 76.5%	C.1.- Consumo autorizado facturado 163,566 <i>(m3/año)</i> 100.0%	D.1.- Consumo facturado medido 155,634 <i>(m3/año)</i> 95.2%	E.1.- Agua Facturada 163,566 <i>(m3/año)</i> 76.5%
		D.2.- Consumo facturado no medido 7,932 <i>(m3/año)</i> 4.8%		
	B.2.- Pérdidas de agua 50,248 <i>(m3/año)</i> 23.5%	C.2.- Consumo autorizado no facturado 0 <i>(m3/año)</i> 0.0%	D.3.- Consumo no facturado medido 0 <i>(m3/año)</i>	E.2.- Agua No Facturada 50,248 <i>(m3/año)</i> 23.5%
			D.4.- Consumo no facturado no medido 0 <i>(m3/año)</i>	
		C.3.- Pérdidas aparentes 16,357 <i>(m3/año)</i> 32.6%	D.5.- Consumo no autorizado No estimadas <i>(m3/año)</i>	
			D.6.- Imprecisiones de medida No estimadas <i>(m3/año)</i>	
		C.4.- Pérdidas reales 33,892 <i>(m3/año)</i> 67.4%	D.7.- Pérdidas reales en conducciones de agua bruta y tratamiento No estimadas <i>(m3/año)</i>	
			D.8.- Fugas en transporte y/o conducciones de distribución No estimadas <i>(m3/año)</i>	
			D.9.- Fugas y desbordamientos en transporte y/o conducciones de almacenamiento No estimadas <i>(m3/año)</i>	
			D.10.- Fugas en acometidas hasta el punto de medida No estimadas <i>(m3/año)</i>	

Elaborado por: Autor

Tabla 6.12: Indicadores de pérdidas físicas o reales

Sistema Total	
Caudal pérdidas físicas (l/s)	1.07
VIF (l/acom/día)	87.93
IPF1 (l/s/km)	0.08
IPF2 (l/s/km/bar)	0.03
IPF3 (l/acom/h)	0.00
UMF	31.29
IFE	2.81

"Virgen del Cisne"	
Caudal pérdidas físicas (l/s)	0.33
VIF (l/acom/día)	51.90
IPF1 (l/s/km)	0.05
IPF2 (l/s/km/bar)	0.02
IPF3 (l/acom/h)	0.002
UMF	25.67
IFE	2.02

"25 de Julio"	
Caudal pérdidas físicas (l/s)	0.75
VIF (l/acom/día)	126.51
IPF1 (l/s/km)	0.12
IPF2 (l/s/km/bar)	0.03
IPF3 (l/acom/h)	0.01
UMF	37.11
IFE	3.41

Elaborado por: Autor

En conclusión, del análisis hídrico, se puede afirmar que existe efectivamente una reducción en el caudal fugado y por ende inyectado al aplicar las estrategias propuestas.

Ahora se realiza el análisis del comportamiento de la energía que le es suministrada al sistema, una vez que se han aplicado las tres estrategias propuestas.

Tabla 6.13: Disminución de la energía suministrada al sistema con la aplicación de estrategias

Energía	Condición inicial	Estrategias	Energía	Condición inicial	Estrategias	Energía	Condición inicial	Estrategias
Energía suministrada por bombas ("Virgen del Cisne") kWh	1624.3	1365.9	Energía entregada a usuarios kWh	992.24	798.58	Energía mínima requerida	669.2	669.2
						Energía topografica	118.6	47.8
						Energía en exceso	206.2	81.6
Energía suministrada natural kWh	0	0	Energía saliente por fugas kWh	506.18	187.60			
			Energía perdida por fricción kWh	85.75	248.71			
Energía suministrada por bombas ("25 de Julio") kWh	1151.5	490.2	Energía perdida por bombeo kWh	1162.5	620.7	Perdida bombeo bajo	543.5	456.9
			Energía compensacion kWh	0.23	0.16	Perdida bombeo alto	619.0	163.8

Elaborado por: Autor

En la Tabla 6.13 es notoria la reducción de energía que se está introduciendo al sistema una vez aplicadas las estrategias ya descritas. La energía suministrada por las bombas de "Virgen del Cisne" ha disminuido en un 15.9% mientras que en "25 de Julio" en un 57.4%. Esto se debe a que se disminuyó la demanda de "25 de Julio" al cambiar el abastecimiento de ciertos nudos de consumo que pasaron a ser abastecidos por el sistema "Virgen del Cisne", así como a la regulación de presiones

con las válvulas reguladora de presión y la regulación en la estación de bombeo mediante curva de consigna

Analizando el sistema total constituido tanto por “Virgen del Cisne” como “25 de Julio” se puede constatar que la energía entregada a los usuarios se redujo un 19.5%. Esto debido a que se suprimió, en gran parte, la presión de exceso por encima de lo requerido para cumplir con la presión de servicio. Se logró reducir 59.7% la energía topográfica y en 60.4% la energía en exceso.

La energía que se desperdicia debido a las fugas se logró disminuir un 62.9% esto gracias a la regulación de presiones puesto que como se estudió anteriormente, el caudal de fuga depende exponencialmente de la presión en la red.

La regulación que se realizó con válvulas reguladoras de presión, como se esperaba, incrementaron la energía perdida por fricción, esto debido a las pérdidas de carga que introducen las válvulas para lograr la presión de consigna que le ha sido seteada, pero este “incremento” de energía disipada se justifica puesto que, tal como se mencionó en el párrafo anterior, es necesario regular presiones ya que tienen plena incidencia sobre el caudal fugado.

Con el cambio de las unidades de bombeo, por unas que permitieran mejorar la eficiencia de los equipos, se obtuvo una disminución en la energía perdida por bombeo del 33.4%. En la estación baja “Virgen del Cisne” se reduce en 15.9% las pérdidas en las bombas, mientras que en la estación alta “25 de Julio” se logra disminuir en 73.5% las pérdidas.

En base a lo expuesto, del análisis de la auditoría energética inicial en comparación con la final, luego de aplicar todas las estrategias, se concluye que se ha conseguido con éxito disminuir la energía perdida por fugas y por ineficiencia de la estación de bombeo, con ello también la energía total suministrada al sistema.

6.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En este acápite se incluye el presupuesto referencial de la implementación de cada estrategia.

6.5.1 ESTRATEGIA 1: SECTORIZACIÓN

Tabla 6.14: Presupuesto referencial de sectorización

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
1	Válvula Compuerta D=80mm incluye accesorios (Protección en cajetín)	u	12	\$710.44	\$8,525.28
2	Tubería PEAD D= 90mm 1.0 MPA incluye accesorios, rotura, reposición y movimiento de tierra	ml	95	\$90.00	\$8,550.00
3	Prueba hidráulica y desinfección de red	ml	95	\$1.73	\$164.35
Total					\$17,239.63

Elaborado por: Autor

6.5.2 ESTRATEGIA 2: REGULACIÓN DE PRESIONES

Tabla 6.15: Presupuesto referencial de instalación de válvula reguladora de presión

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
1	Válvula reguladora de presión D=80 mm con accesorios	u	8	\$2,200.00	\$17,600.00
2	Cámara de válvula con tapa de hormigón	u	8	\$3,120.50	\$24,964.00
Total					\$42,564.00

Elaborado por: Autor

6.5.3 ESTRATEGIA 3: CAMBIO DE BOMBAS

Tabla 6.16: Presupuesto referencial de instalación de bombas con variador de frecuencia

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
1	PENTAIR PVM(X)5-15	u	1	\$1,800	\$1,800.00
2	PENTAIR PVM(X)10-10	u	2	\$2,100	\$4,200.00
Total					\$6,000.00

Elaborado por: Autor

6.5.4 AHORRO POR REDUCCIÓN DE AGUA Y ENERGÍA

Comparando la Tabla 5.4 y Tabla 6.11, se puede apreciar que se reduce el volumen anual inyectado al sistema en 42,458 m³, considerando que el costo marginal del agua es de 0.10 USD/m³, se logra un ahorro en el año de \$ 4,245.80.

Tabla 6.17: Ahorro en producción de agua potable

No.	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
1	Producción de agua potable	m ³	42,458	\$ 0.10	\$ 4,245.80
Total					\$ 4,425.80

Elaborado por: Autor

En la Tabla 6.13 se aprecia la reducción de 919.7 kWh en una semana, extrapolando esto a un año, se tiene una disminución de 47,824.4 kWh. Como se tiene una tarifa diferenciada se presenta en la Tabla 6.18 la reducción en el consumo energético de \$1,912.04.

Tabla 6.18: Ahorro en consumo energético

No.	Descripción	Costo semanal		Costo anual	
		Condición inicial	Posterior a estrategias	Condición inicial	Posterior a estrategias
1	Energía consumido estación baja "Virgen del Cisne"	\$ 71.13	\$ 60.01	\$ 3,698.76	\$ 3,120.52
2	Energía consumido estación alta "25 de Julio"	\$ 48.66	\$ 23.01	\$ 2,530.32	\$ 1,196.52
Total		\$ 119.79	\$ 83.02	\$ 6,229.08	\$ 4,317.04

Elaborado por: Autor

6.5.5 TIR Y VAN

En la Tabla 6.19 se presenta la inversión inicial, los ahorros y los gastos de operación durante los 8 años restantes de la concesión del servicio de agua potable.

Tabla 6.19: Datos para cálculo de TIR y VAN

Inversión inicial	
Sectorización	\$ 17,239.63
Regulación de presiones	\$ 42,564.00
Cambio de bombas	\$ 6,000.00
Gastos operación	
Mantenimiento anual VRP	\$ 500
Ahorro anual	
Producción de agua potable	\$ 4,425.80
Consumo energético	\$ 1,912.04
Mantenimiento de la red (fugas)	\$ 7,800.00

Elaborado por: Autor

Considerando el costo de capital igual a 11% (valor establecido para proyectos internos de la empresa INTERAGUA), se obtiene un valor del VAN igual \$ 3,948.81 y el TIR de 12.5%. Por tanto, se puede concluir que el proyecto es viable financieramente.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez que se ha finalizado el desarrollo del trabajo, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Con la información recopilada se pudo construir y calibrar el modelo matemático del sistema de abastecimiento de agua potable de los sectores “Virgen del Cisne” y “25 de Julio” de la ciudad de Guayaquil, el cual fue la base para realizar el análisis de la situación actual del sistema tanto con un diagnóstico como las auditorias, hídrica y energética.
- Se detectó en la red estudiada que los sectores hidráulicos no han sido configurados en función de pisos altimétricos homogéneos.
- Del análisis de presiones en la condición actual, se constató que ningún sector hidráulico tiene problemas para cumplir con la presión de servicio, pero si existe necesidad de disminuir el exceso de presión en nudos, que alcanza hasta 85 mca de sobrepresión, esto para evitar daños en la red y desperdicio de agua y energía dada la incidencia que tiene la presión sobre el caudal de fuga.
- Del análisis de pérdidas unitarias se determinó que la red de distribución tanto del sistema a gravedad “Virgen del Cisne” como el sistema con bombeo directo a red “25 de Julio” se considera dimensionada adecuadamente.
- Como resultado de la auditoría hídrica, se determinó que se debe implementar medidas de gestión de pérdidas prioritariamente en “25 de Julio” para disminuir fugas, mientras que en “Virgen del Cisne” pese a que, según los límites admisibles de la empresa gestora, la situación es admisible, acorde a literatura técnica se puede implementar medidas ya que aún existe posibilidad de mejora.
- Como conclusión de la auditoría energética, se debe intervenir prioritariamente en las bombas para mejorar su eficiencia y también en gestionar presiones para con ello reducir el caudal de fugas.
- Una vez identificados los problemas que presenta actualmente el abastecimiento en estudio, se propuso las estrategias de optimización con el propósito de mejorar la eficiencia de la red y disminuir las pérdidas de agua y energía.
- Puesto que se determinó que las pérdidas se deben a las fugas en la red y a la baja eficiencia de los equipos de bombeo, se planteó tres estrategias que comprendieron sectorización, regulación de presiones y cambio de bombas.
- Al aplicar la estrategia de sectorización se redujo en 5.7% el caudal inyectado y al regular presiones un 11.2% adicional. En tanto que el caudal de fuga disminuyó con la sectorización, en 19% y al regular presiones se redujo adicionalmente un 43.9%. Posterior a aquello se realizó nuevamente el análisis hídrico, del cual se

puede afirmar que existe efectivamente una reducción en el caudal fugado y por ende inyectado al sistema.

- La energía suministrada por las bombas de “Virgen del Cisne” ha disminuido en un 15.9% mientras que en “25 de Julio” en un 57.4%, esto se debe al cambio de abastecimiento de ciertos nudos de consumo que pasaron a ser abastecidos por el sistema “Virgen del Cisne”, así como en la mejora del rendimiento de la estación de bombeo “25 de Julio”.
- La energía que se desperdicia debido a las fugas se logró disminuir un 62.9% esto gracias a la regulación de presiones puesto que como se estudió anteriormente, el caudal de fuga depende exponencialmente de la presión en la red y con el cambio de bombas, por unas de mejor eficiencia, se obtuvo una disminución en la energía perdida por bombeo del 73.5%.
- En base a lo expuesto, del análisis de la auditoría energética inicial en comparación con la final, luego de aplicar todas las estrategias, se concluye que se ha conseguido con éxito disminuir la energía perdida por fugas y por ineficiencia de la estación de bombeo, con ello también la energía total suministrada al sistema.
- Luego de aplicar y analizar todas las estrategias, se concluye que se ha conseguido con éxito solventar los problemas que se identificaron en el sistema y cuyo costo de inversión inicial es de \$ 65,803.63

8 BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA). (2020). *Benchmarking de prestadores públicos de los servicios de agua potable y saneamiento en el Ecuador. Boletín estadístico.*
- A.O. Lambert, T. G. Brown, M. Takizawa, D. Weimers, International Water Data Comparisons Ltd, & AWWA. (1999). *A review of performance indicators for real losses from water supply systems* (Vol. 48, Issue 6).
- BANCO MUNDIAL. (2014, October 11). *América Latina debe cuidar el agua para calmar su sed de energía.* <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/08/11/america-latina-agua-energia-generacion-electricidad>
- Cabrera, E., Asce, M., Pardo, M. A., & Cobacho, R. (2010). Energy Audit of Water Networks. *JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT.* <https://doi.org/10.1061/ASCEWR.1943-5452.0000077>
- Cabrera, E., Enrique, M., & Rochera, C. (2013). *BALANCES HÍDRICOS EN REDES DE AGUA. EL CRITERIO DE LA INTERNACIONAL WATER ASSOCIATION (IWA).*
- Cabrera, E., Pardo, M. A., Cabrera, E. Y., & Cobacho, R. (2011). *AGUA, ENERGÍA Y EFICIENCIA O EL INAPLAZABLE RETO DE LA SOSTENIBILIDAD (1).*
- Cabrera Marcet, E. (2005). *UNA APROXIMACIÓN A LA PROBLEMÁTICA DE LAS PÉRDIDAS DE AGUA EN REDES URBANAS (1).*
- Campbell Gonzalez, E. (2013). *Sectorización de redes de abastecimiento de agua potable.*
- del Teso March, R. (2020). *Ecodiseño y ecogestión de redes de distribución de agua a presión.*
- del Teso, R., Gómez, E., Cabrera, E., & Estruch, E. (2017). Eficiencia energética en redes de agua a presión en su fase de diseño. *V Jornadas de Ingeniería Del Agua.*
- del Teso, R., Gómez, E., Estruch-Juan, E., & Cabrera, E. (2019). Topographic Energy Management in Water Distribution Systems. *Water Resources Management*, 33(12), 4385–4400. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02375-9>
- Fuertes, V. S., García-Serra, J., Iglesias, P. L., López, G., Martínez, F. J., & Pérez, R. (2002). *Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua.* Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia.
- García, J., & García, S. (2020). *FUNDAMENTOS DE CÁLCULO HIDRÁULICO.* www.ita.upv.es
- Germanopoulos, G., & Jowitt, P. W. (1989). Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network. In *Proc. Instn Civ. Engrs, Part* (Vol. 2).
- GIZ, D., & VAG, A. (2011). *Guía para la reducción de las pérdidas de agua.*
- Hirrel, T. D. (2008). How not to calibrate a hydraulic network model. *Journal / American Water Works Association*, 100(8). <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2008.tb09701.x>
- IWA. (2017). *INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA SERVICIOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.*
- Lalonde, A., & -Veritec, Pe. (2010). *CUWCC-PBMP Reports Distribution System Pressure Management.*
- Liemberger, R., Brothers, K., Lambert, A., Mckenzie, R., Rizzo, A., & Waldron, T. (2007). *Water Loss Performance Indicators.* www.wrp.co.za
- Martínez Alzamora, F., Fuertes-Miquel, V. S., & Sancho, H. (1996). *High Performance Computing for water distribution system simulation View project Water Quality Models for*

Water Distribution Systems View project.

<https://www.researchgate.net/publication/316644970>

Molina, S. (2014). *Metodología para la calibración preliminar de modelos de redes de distribución de agua mediante la utilización conjunta de demandas y consumos dependientes de la presión.*

NACIONES UNIDAS. (2014). *AGUA Y ENERGÍA. RESUMEN EJECUTIVO. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo.* [http://burnanenergyjournal.com/wp-](http://burnanenergyjournal.com/wp-content/uploads/2013/03/WorldMap_EnergyConsumptionPerCapita2010_v4_)

[content/uploads/2013/03/WorldMap_EnergyConsumptionPerCapita2010_v4_](http://burnanenergyjournal.com/wp-content/uploads/2013/03/WorldMap_EnergyConsumptionPerCapita2010_v4_)

Palacios, A. (2019). *ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS SERVICIOS Y USOS DEL AGUA EN ECUADOR.*

Rossman, L. A., Fernando, T. :, & Alzamora, M. (2001). *EPANET 2 MANUAL DEL USUARIO.*

Tomás Pérez, M. del C. (2019). *Desarrollo del modelo y optimización de la red de abastecimiento de agua del municipio de Ondara.*