ATMIRE

Title	Evaluación de perdida de carga en el sistema de abastecimiento de agua potable y rediseño mediante sectorización hidráulica usando WaterCAD en el centro poblado de Caja, Ayacucho.
Item Type	https://purl.org/coar/resource_type/c_7a1f
Authors	Calla Raqui, Karina Betsi;Figueroa Huaman, Fray Luis
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Rights	https://purl.org/coar/access_right/c_abf2
Download date	2026-11-27 05:22:39
Item License	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Link to Item	https://hdl.handle.net/10757/690919

UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Evaluación de perdida de carga en el sistema de abastecimiento de agua potable y rediseño mediante sectorización hidráulica usando WaterCAD en el centro poblado de Caja, Ayacucho.

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Calla Raqui, Karina Betsi	0009-0006-5574-2564
Figueroa Huaman, Fray Luis	0009-0000-3218-2521

ASESOR(ES)

Ramos Orlandino, Carmela Cristhy	0000-0002-4269-2944

Lima, 18 de junio de 2026

DEDICATORIA

Dedicamos el presente trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza y sabiduría necesarias para seguir adelante a pesar de las dificultades. A nuestros padres, por su apoyo incondicional, esfuerzo y confianza en cada paso de nuestra formación profesional. A nuestra asesora, por compartir sus conocimientos y guiarnos en este proceso académico. Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo y culminación de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de la presente tesis.

En primer lugar, agradecemos a Dios por brindarnos salud, fortaleza y perseverancia a lo largo de este proceso. Asimismo, a nuestras familias, por su apoyo incondicional, motivación constante y confianza en cada etapa de nuestra formación académica.

De igual manera, expresamos nuestro reconocimiento a nuestros docentes, quienes, con su guía y conocimientos, contribuyeron significativamente al desarrollo de esta investigación. En especial, a nuestra asesora, por su orientación, dedicación y valiosos aportes durante la elaboración de la tesis.

Finalmente, agradecemos a todas aquellas personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, brindaron su apoyo y colaboración para la culminación exitosa de este trabajo.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento hidráulico del sistema de abastecimiento de agua potable del centro poblado de Caja, Ayacucho, mediante el análisis de las pérdidas de carga, presiones en los nodos y velocidades de flujo de la red de distribución, empleando el software WaterCAD como herramienta de modelación hidráulica.

La metodología comprendió la recopilación y sistematización de información técnica del sistema existente, la realización de mediciones de presión y aforos de caudal en campo, así como el análisis de las características físicas de la red. Posteriormente, se desarrolló un modelo hidráulico en WaterCAD y se planteó una propuesta de optimización basada en la reubicación del reservorio y la implementación de una sectorización hidráulica conformada por cinco sectores operativos y dispositivos de control.

Los resultados evidenciaron deficiencias en el sistema existente, registrándose presiones nulas o insuficientes en zonas elevadas, pérdidas de carga de hasta 15.8 m y velocidades fuera de los rangos recomendados. La simulación del sistema optimizado mostró mejoras significativas, alcanzando presiones entre 10.12 y 47.55 m.c.a., pérdidas de carga menores a 1.0 m en la mayoría de los tramos y una distribución hidráulica más uniforme.

Se concluye que la sectorización hidráulica y la reubicación del reservorio permiten optimizar el funcionamiento del sistema de abastecimiento de agua potable, mejorando las condiciones de presión, reduciendo las pérdidas de energía y contribuyendo a la continuidad y eficiencia del servicio.

Palabras clave: abastecimiento de agua potable; WaterCAD; modelación hidráulica; pérdidas de carga; presión hidráulica; sectorización hidráulica.

Evaluation of Head Losses in the Drinking Water Supply System and Redesign through Hydraulic Sectorization Using WaterCAD in the Rural Community of Caja, Ayacucho

ABSTRACT

This research aimed to evaluate the hydraulic performance of the drinking water supply system in the rural community of Caja, Ayacucho, through the analysis of head losses, nodal pressures, and flow velocities within the distribution network, using WaterCAD as a hydraulic modeling tool.

The methodology included the collection and systematization of technical information from the existing system, field pressure measurements, flow rate assessments, and the analysis of the physical characteristics of the distribution network. Subsequently, a hydraulic model was developed in WaterCAD, and an optimization proposal was designed based on the relocation of the reservoir and the implementation of hydraulic sectorization consisting of five operational sectors and control devices.

The results revealed deficiencies in the existing system, including null or insufficient pressures in high-elevation areas, head losses of up to 15.8 m, and flow velocities outside the recommended ranges. The simulation of the optimized system showed significant improvements, achieving pressures between 10.12 y 47.55 m of water column, head losses below 1.0 m in most pipe sections, and a more uniform hydraulic distribution.

It is concluded that hydraulic sectorization and reservoir relocation effectively optimize the performance of the drinking water supply system by improving pressure conditions, reducing energy losses, and contributing to the continuity and efficiency of the water service.

Keywords: drinking water supply; WaterCAD; hydraulic modeling; head loss; hydraulic pressure; hydraulic sectorization.

Trabajo_75860271.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	9%	5%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	Fuente de Internet
2	Submitted to Universidad Catolica de Trujillo	Trabajo del estudiante
3	Submitted to Universidad del Azuay	Trabajo del estudiante
4	Submitted to uncedu	Trabajo del estudiante
5	Submitted to Blackboard	Trabajo del estudiante
6	repositorioacademico.upc.edu.pe	Fuente de Internet
7	Submitted to Universidad Politécnica del Perú	Trabajo del estudiante
8	Submitted to Universidad Cesar Vallejo	Trabajo del estudiante
9	repositorio.ucv.edu.pe	Fuente de Internet
10	nationalrockreview.com	Fuente de Internet
11	repositorio.unc.edu.pe	Fuente de Internet
12	Submitted to Universidad Privada del Norte	Trabajo del estudiante
13	repositorio.umsa.bo	Fuente de Internet
14	www.transparencia.gob.sv	Fuente de Internet
15	pirhua.udep.edu.pe	Fuente de Internet

TABLA DE CONTENIDOS

1 CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO 1

1.1 ANTECEDENTES 1
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN 2
1.3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA 4
1.4 ESTADO DEL ARTE 4
1.5 OBJETIVOS 6
1.5.1 General 6
1.5.2 Específicos 6
1.6 INDICADORES DE LOGRO DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL 7
1.7 JUSTIFICACIÓN 7
1.8 LIMITACIONES 8

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 9

2.1 MARCO CONCEPTUAL 9
2.1.1 Sistema de distribución de agua potable. 9
2.1.2 Captación 9
2.1.3 Línea de conducción 9
2.1.4 Línea de aducción 9
2.1.5 Criterios básicos de diseño 9
2.1.6 Periodo de diseño 9
2.1.7 Proyección de la población 10
2.1.8 Volumen y almacenamiento 10
2.1.9 Dotación y consumo 10
2.2 ESTÁNDARES, MARCOS DE TRABAJO Y BUENAS PRÁCTICAS 10
2.3 BASES LEGALES Y MARCO NORMATIVO 11

3 CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO 12

3.1 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN 12
3.2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN 15
3.2.1. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL SISTEMA ACTUAL 15
3.2.2. RESULTADOS HIDRÁULICOS OBTENIDOS EN CAMPO 19
3.2.3. MODELADO DE LA PROPUESTA DE SECTORIZACIÓN HIDRÁULICA 20

A) RESULTADOS HIDRÁULICOS DE PRESIONES 22
B) RESULTADOS HIDRÁULICOS DE PERDIDA DE CARGA 23
C) RESULTADOS HIDRÁULICOS DE VELOCIDADES 24
3.3. VALIDACIÓN DEL PROYECTO 25
3.4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS 31
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 39
4.2. CONCLUSIONES 39
4.3. RECOMENDACIONES 41
5. REFERENCIAS 43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Indicadores del problema 7
Tabla 2 Resultados representativos de presión obtenidos en campo 19
Tabla 3 Resultados representativos de velocidades obtenidos en campo 20
Tabla 4 Resultados representativos de pérdidas de carga obtenidos en campo 20
Tabla 5 Resultados hidráulicos de presiones del sistema sectorizado – Máxima demanda 22
Tabla 6 Resultados hidráulicos de perdida de carga del sistema sectorizado – Máxima demanda 23
Tabla 7 Resultados hidráulicos de velocidad del sistema sectorizado – Máxima demanda 24
Tabla 8 Comparación de presiones entre campo y modelo hidráulico optimizado 25
Tabla 9 Tabla hidráulica representativa del sistema existente de presiones 26
Tabla 10 Comparación de velocidades entre campo y modelo hidráulico optimizado 27
Tabla 11 Tabla hidráulica representativa del sistema existente de velocidades 28
Tabla 12 Comparación de perdida de carga en el sistema existente y modelo hidráulico optimizado 29
Tabla 13 Tabla hidráulica representativa del sistema existente de perdida de cargas 30
Tabla 14 Tabla hidráulica representativa del sistema existente de perdida de cargas según la norma 32
Tabla 15 Tabla hidráulica representativa del sistema existente de velocidad según la norma 32
Tabla 16 Tabla hidráulica representativa del sistema existente de perdida de carga según la norma 33
Tabla 17 Tabla hidráulica representativa del sistema modelado de perdida de cargas según la norma OS.050 34
Tabla 18 Tabla hidráulica representativa del sistema modelado de velocidad según la norma RM-173-2016-VIVIENDA 35
Tabla 19 Tabla hidráulica representativa del sistema modelado de perdida de cargas 35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación inicial y ubicación proyectada del reservorio. 12
Figura 2 Sectorización hidráulica de la red de distribución proyectada. 13
Figura 3 Ubicación de los dispositivos hidráulicos proyectados 14
Figura 4 Ubicación de puntos de medición de presión y aforo en la red de distribución del centro poblado de Caja. 16
Figura 5 Medición de presión en campo mediante equipo portátil en la red de distribución del sistema de abastecimiento de agua potable. 17
Figura 6 Ejecución de aforo de caudal en campo en la red de distribución del sistema de abastecimiento de agua potable. 17
Figura 7 Levantamiento de características físicas de la red de distribución del sistema de abastecimiento de agua potable (diámetros, longitudes y materiales de tuberías). 18
Figura 8 Modelo hidráulico optimizado de la red de distribución en el software WaterCAD. 21
Figura 9 Comparación de la presión del sistema existente y la presión del sistema modelado 36
Figura 10 Comparación de la velocidad del sistema existente y la presión del sistema modelado 37
Figura 11 Comparación de la perdida de carga del sistema existente y la presión del sistema modelado 37

1 CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes

Diversos estudios han demostrado la importancia del modelamiento hidráulico como herramienta fundamental para el diseño y optimización de sistemas de abastecimiento de agua potable. En ese sentido, Vargas (2020) desarrolló el diseño de redes de agua potable y alcantarillado en la comunidad campesina La ensenada de Collanac, empleando los programas WaterCAD y SewerCAD. El estudio incluyó la recopilación de datos, el análisis de caudales en distintos escenarios y la validación mediante cálculos empíricos, concluyendo que estas herramientas permiten obtener diseños confiables y ajustados a la normativa vigente.

De manera similar, Guillén (2020) aplicó el software WaterCAD para el modelamiento del sistema de abastecimiento en la comunidad de Espite, Ayacucho, proponiendo un sistema por gravedad con fuente subterránea. Los resultados evidenciaron que el uso del modelamiento hidráulico permite obtener datos precisos sobre presiones, caudales y comportamiento de la red, facilitando una mejor toma de decisiones en el diseño.

Por su parte, Silva (2023) evaluó el sistema de agua potable del centro poblado Huangamarca, en Otuzco, mediante modelamiento con WaterCAD, determinando que el sistema existente no cumplía con los parámetros normativos, principalmente en lo relacionado con las presiones. En respuesta, se planteó la implementación de cámaras rompe presión (CRP), evidenciando que el uso de estas herramientas permite optimizar el sistema y mejorar su funcionamiento en menor tiempo.

Asimismo, Ramos (2023) diseñó un sistema de abastecimiento de agua potable para el centro poblado de Huayllay Chico mediante el uso de WaterCAD, proponiendo un sistema por gravedad con un horizonte de diseño de 20 años. Los resultados mostraron que los parámetros hidráulicos se encontraban dentro de los rangos permisibles, aunque se recomendó la implementación de válvulas de purga para optimizar la operación del sistema, concluyendo que el diseño propuesto resulta más eficiente que el sistema existente.

En una línea más reciente, Gutti y Vásquez (2025) plantearon una propuesta de diseño del sistema de abastecimiento de agua potable y alcantarillado destinada al asentamiento humano Nuevo Horizonte, ubicado en Nuevo Chimbote, utilizando WaterCAD y SewerCAD. El estudio permitió dimensionar adecuadamente las tuberías y obtener presiones

dentro de los rangos aceptables, demostrando que el modelamiento hidráulico contribuye al cumplimiento de los estándares técnicos exigidos.

A nivel internacional, estudios como el de Hafsi et al. (2026) destacan el uso del modelamiento hidráulico para la reducción de pérdidas en redes de distribución mediante el control de presiones, evidenciando que la simulación permite identificar zonas críticas y mejorar la eficiencia del sistema. De manera similar, Cueva et al. (2023) señalan que la sectorización hidráulica, apoyada en herramientas de modelamiento, permite optimizar la distribución del agua y reducir fugas, contribuyendo a una gestión más sostenible del recurso.

En conjunto, los estudios revisados coinciden en que el uso de herramientas de modelamiento hidráulico como WaterCAD constituye una metodología clave para el análisis, diseño y optimización de sistemas de abastecimiento de agua potable. Estas herramientas permiten simular distintos escenarios, evaluar el comportamiento hidráulico de la red, identificar deficiencias y proponer soluciones técnicas eficientes, contribuyendo así a mejorar la calidad del servicio, reducir pérdidas y garantizar la sostenibilidad del sistema.

1.2 Descripción de la Organización

La empresa Consultora y Constructora Meksma S.A.C. es una organización peruana constituida bajo el régimen de Sociedad Anónima Cerrada (S.A.C.), dedicada a la prestación de servicios en el sector de la construcción y consultoría en ingeniería. Se encuentra debidamente registrada ante la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT), con número de Registro Único de Contribuyentes (RUC) N.° 20606251905, iniciando sus actividades el 31 de julio del año 2020.

El domicilio fiscal de la empresa se ubica en el Sector San José, Manzana B3, Lote 2E-5, Barrio Santa Ana, en el distrito de Ayacucho, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho, Perú. Asimismo, se tiene como referencia una dirección adicional en el Jr. Moore N.° 105, distrito de San Juan Bautista.

En cuanto a su actividad económica, la empresa desarrolla principalmente servicios relacionados con actividades de arquitectura e ingeniería, así como consultoría técnica especializada. De manera complementaria, participa en la ejecución de obras civiles y en la comercialización de materiales de construcción, lo que la posiciona dentro del rubro de empresas constructoras y consultoras. Respecto a su organización administrativa, el cargo

de Gerente General es ejercido por el Sr. Máximo Meneses Palomino, quien actúa como representante legal de la empresa en sus operaciones y gestiones administrativas.

Reseña Histórica

La empresa Consultora y Constructora Meksma S.A.C. fue constituida en el año 2020 en la ciudad de Ayacucho, con el propósito de brindar servicios de consultoría y ejecución de obras dentro del sector construcción. Desde su creación, ha orientado sus actividades hacia el desarrollo de proyectos de ingeniería, contribuyendo al crecimiento de la infraestructura local y regional.

Al ser una empresa relativamente joven, ha venido consolidando su participación en el mercado mediante la prestación de servicios técnicos y su inscripción en el Registro Nacional de Proveedores (RNP), lo que le permite participar en procesos de contratación con el Estado peruano. Su crecimiento ha sido progresivo, enfocándose en mejorar la calidad de sus servicios y ampliar su presencia en el sector.

Misión

La misión de la empresa es desarrollar proyectos de consultoría y construcción con altos estándares de calidad, orientados a satisfacer las necesidades de sus clientes, mediante un equipo de trabajo competente y comprometido, promoviendo el desarrollo sostenible, la responsabilidad social y el respeto por el medio ambiente.

Visión

La empresa tiene como visión consolidarse como una organización líder a nivel regional y nacional en el sector construcción, reconocida por la calidad de sus servicios, la confianza generada en sus clientes, la seguridad en sus procesos y su compromiso con el cuidado del medio ambiente.

Actividad Económica (Rubro)

- Actividades de arquitectura e ingeniería
- Consultoría técnica en proyectos de construcción
- Ejecución de obras civiles
- Comercialización de materiales de construcción

1.3 Análisis del Problema

En diversas localidades rurales, los sistemas de abastecimiento de agua potable han sido implementados de manera empírica por los propios pobladores, sin la aplicación de criterios técnicos de ingeniería ni estudios hidráulicos previos. Esta situación suele generar configuraciones inadecuadas en las redes de distribución, afectando su desempeño hidráulico.

De acuerdo con M. F. Rashed et al. (2024), la modelación hidráulica en sistemas de distribución permite identificar deficiencias como pérdidas de carga elevadas y presiones inadecuadas, asociadas principalmente a diseños no optimizados o a modificaciones realizadas sin planificación técnica. En ese sentido, la ausencia de información técnica confiable y el desconocimiento del comportamiento hidráulico del sistema constituyen factores determinantes que limitan su adecuada operación.

En el centro poblado de Caja, Ayacucho, el sistema de abastecimiento de agua potable presenta características propias de un desarrollo no planificado, evidenciándose la existencia de conexiones realizadas por los propios pobladores y ampliaciones ejecutadas sin control técnico. Estas condiciones generan incertidumbre respecto al comportamiento hidráulico de la red, particularmente en relación con indicadores como la presión en los nodos y las pérdidas de carga en las tuberías.

Asimismo, se reportan deficiencias en el suministro de agua en algunas viviendas, lo cual evidencia posibles variaciones en las condiciones hidráulicas del sistema. Sin embargo, estas situaciones no han sido evaluadas técnicamente, lo que impide identificar con precisión las causas que originan dichas deficiencias y el grado en que afectan el funcionamiento del sistema.

1.4 Estado del Arte

En los últimos años, el estudio de redes de distribución de agua potable ha tenido un desarrollo importante, especialmente en la aplicación de modelos hidráulicos para evaluar su desempeño. Diversas investigaciones coinciden en que problemas como pérdidas de carga elevadas, presiones inadecuadas y fugas están directamente relacionados con diseños empíricos o modificaciones sin criterios técnicos.

En ese sentido, M. F. Rashed et al. (2024) evidencian que mediante la modelación hidráulica con herramientas como WATERCAD es posible identificar deficiencias en la red, tales como

bajas presiones en nodos críticos y distribución ineficiente del caudal, lo que permite proponer alternativas de rediseño como el cambio de diámetros de tuberías y la optimización de la configuración del sistema. Estos resultados demuestran que el modelamiento hidráulico constituye una técnica eficaz para mejorar el desempeño de las redes.

De manera similar, el estudio sobre sectorización hidráulica aplicado a una red de distribución evidenció que un sistema sin optimización presenta presiones entre 0,74 y 91,2 m.c.a. y velocidades superiores a 5,0 m/s, reflejando condiciones críticas de operación. Al aplicar sectorización, los resultados mejoraron significativamente, alcanzando rangos de presión entre 17,85 y 93,94 m.c.a. y velocidades de 2,92 m/s, lo cual permitió un mejor control hidráulico y reducción de pérdidas. Esto confirma que la sectorización es una técnica efectiva para optimizar redes de abastecimiento (Cueva et al., 2023).

En ese contexto. Según Alsaydalani (2024), el modelamiento hidráulico mediante EPANET, calibrado con datos reales, permite evaluar escenarios de control de presión mediante válvulas reductoras (PRV), demostrando que la reducción de presión disminuye significativamente las fugas sin afectar el suministro, además de evidenciar que la sectorización y la calibración del modelo son fundamentales para obtener resultados confiables. Por otro lado, Rashed et al. (2024) desarrollan un análisis hidráulico integrando SIG y EPANET para evaluar y rediseñar una red de distribución, identificando deficiencias como bajas presiones y distribución ineficiente, proponiendo como solución la modificación de diámetros y la reconfiguración del sistema, logrando una mejora en la eficiencia hidráulica. Asimismo, Giustolisi et al. (2023) proponen la incorporación de la formulación FAVAD en EPANET 2.2, permitiendo representar de manera más realista la relación entre presión y fugas, demostrando que este enfoque mejora la estimación de pérdidas en comparación con modelos tradicionales y facilita la identificación de zonas críticas. En conjunto, estos estudios evidencian que el modelamiento hidráulico, junto con el control de presión, el rediseño de redes y el uso de modelos avanzados de fugas, constituye una solución integral para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas de distribución de agua potable. En conjunto, estas investigaciones evidencian que existe una base sólida de estudios que utilizan herramientas como EPANET, control de presión y sectorización hidráulica para resolver problemas en redes de agua potable, obteniendo resultados positivos en la mejora de presiones, reducción de pérdidas y optimización del sistema. Sin embargo, una limitación

común es que estos estudios se desarrollan en contextos urbanos o redes con información técnica disponible, lo que difiere de la realidad de muchas zonas rurales.

En el caso del centro poblado de Caja, Ayacucho, el sistema de abastecimiento presenta características similares a las descritas en la literatura, ya que ha sido desarrollado de manera empírica, con conexiones y ampliaciones sin control técnico. Esta situación genera incertidumbre sobre el comportamiento hidráulico de la red, especialmente en relación con las pérdidas de carga y las presiones en los nodos. A pesar de que se evidencian deficiencias en el suministro, no se cuenta con estudios técnicos que permitan cuantificar estos problemas ni plantear soluciones adecuadas.

Por ello, la aplicación de modelamiento hidráulico mediante WATERCAD y la implementación de sectorización hidráulica se presentan como alternativas pertinentes y actuales para evaluar y rediseñar el sistema, permitiendo identificar las causas de las deficiencias y proponer mejoras orientadas a optimizar el funcionamiento de la red de agua potable.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Evaluar el comportamiento hidráulico del sistema de abastecimiento de agua potable mediante el análisis de pérdidas de carga y presiones en la red de distribución empleando WATERCAD en el centro poblado de Caja, Ayacucho.

1.5.2 Específicos

- Recopilar y sistematizar la información del sistema de abastecimiento de agua potable existente en el centro poblado de Caja.
- Diseñar la sectorización hidráulica del sistema y desarrollar su modelación, mediante la delimitación de sectores y la incorporación de válvulas de control, con el fin de mejorar la distribución del agua.
- Comparar el comportamiento hidráulico del sistema actual con el sistema propuesto, mediante el análisis de presión de nodos, pérdidas de carga y velocidad de flujo, a fin de evaluar las mejoras en el desempeño del sistema.

1.6 Indicadores de logro del Trabajo de Suficiencia Profesional

Tabla 1

Indicadores del problema

Indicadores		Unidad de Medida	Descripción
Indicador 1	Presión en nodos	Kpa	Nivel de presión disponible en cada nodo de la red de distribución.
Indicador 2	Pérdida de carga	m	Energía perdida por fricción en las tuberías durante el flujo del agua.
Indicador 3	Velocidad del flujo	m/s	Rapidez con la que circula el agua a través de las tuberías.

1.7 Justificación

La evaluación hidráulica de sistemas de abastecimiento de agua potable constituye un aspecto fundamental para garantizar la eficiencia, continuidad y calidad del servicio en poblaciones rurales y urbanas. En este contexto, el análisis de pérdidas de carga y presiones permite identificar deficiencias operativas en la red, tales como bajos niveles de presión, excesos que generan daños en las tuberías o pérdidas de agua asociadas a fugas.

Diversas investigaciones han demostrado que los sistemas de distribución de agua presentan problemas derivados del crecimiento poblacional, la falta de planificación y el deterioro de la infraestructura, lo cual repercute directamente en la continuidad y calidad del servicio. En particular, se evidencia que la gestión inadecuada de las redes hidráulicas puede generar ineficiencias significativas en la distribución del recurso hídrico (Cueva et al., 2023).

Asimismo, las pérdidas de carga y las variaciones de presión influyen significativamente en el comportamiento hidráulico de las redes, afectando la adecuada distribución del agua potable. En este sentido, el uso de herramientas tecnológicas EPANET permite modelar y simular el comportamiento hidráulico de las redes de distribución, facilitando la evaluación de parámetros como caudales, presiones y pérdidas de energía, lo cual contribuye a la optimización del sistema (Cueva et al., 2023).

Por otro lado, estudios recientes evidencian que la detección y análisis de fugas mediante modelos hidráulicos y métodos computacionales contribuyen a reducir el agua no contabilizada y mejorar la gestión de los recursos hídricos. En particular, el uso de técnicas basadas en simulaciones hidráulicas permite identificar zonas críticas dentro de la red, optimizando su operación y mantenimiento (Torres et al., 2024).

La presente investigación es pertinente debido a que el centro poblado de Caja, en Ayacucho, podría presentar problemas asociados a deficiencias en la distribución del agua potable, como presiones inadecuadas o pérdidas de carga significativas. La evaluación hidráulica permitirá diagnosticar el estado actual del sistema y plantear alternativas de mejora que contribuyan a optimizar su funcionamiento.

Finalmente, este estudio aporta valor tanto a nivel académico como práctico, ya que permitirá aplicar herramientas de modelación hidráulica en un caso real, generando información técnica útil para la toma de decisiones por parte de las entidades responsables de la gestión del agua. Asimismo, contribuye al desarrollo de soluciones sostenibles orientadas a mejorar la calidad de vida de la población beneficiaria.

1.8 Limitaciones

La investigación se desarrolla mediante modelación hidráulica en WATERCAD bajo supuestos teóricos de diseño, por lo que los resultados representan una aproximación del comportamiento del sistema propuesto.

El análisis considera demandas y parámetros hidráulicos estimados, los cuales pueden variar en condiciones reales de operación debido a cambios en el consumo, crecimiento urbano y variaciones de la demanda.

El modelo hidráulico emplea condiciones simplificadas y parámetros constantes, lo que permite evaluar el desempeño de la sectorización, pero no reproduce completamente la variabilidad temporal del sistema.

Los resultados obtenidos dependen de los criterios y supuestos adoptados en el diseño de la sectorización, por lo que pueden modificarse si se ajustan las condiciones iniciales del modelo.

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Sistema de distribución de agua potable.

El sistema de distribución de agua potable comprende un conjunto de infraestructuras hidráulicas destinadas a conducir y distribuir agua desde los reservorios o tanques de almacenamiento hacia los usuarios finales, mediante redes de tuberías, válvulas y conexiones domiciliarias (Cueva et al., 2023).

2.1.2 Captación

La captación representa la fase inicial del sistema de abastecimiento de agua potable y comprende el conjunto de obras, criterios y principios destinados a la obtención del recurso hídrico a partir de fuentes naturales, tanto superficiales como subterráneas.

2.1.3 Línea de conducción

La línea de conducción es el componente del sistema de abastecimiento de agua potable encargado de transportar el agua desde la captación o desde la planta de tratamiento hasta los puntos de almacenamiento, como reservorios o tanques. (Cueva et al., 2023).

2.1.4 Línea de aducción

La línea de aducción es la infraestructura encargada de transportar el agua desde los reservorios hacia la red de distribución, actuando como un elemento intermedio dentro del sistema de abastecimiento (Cueva et al., 2023).

2.1.5 Criterios básicos de diseño

Los criterios básicos de diseño en un sistema de abastecimiento de agua potable comprenden un conjunto de parámetros técnicos que permiten dimensionar y garantizar el adecuado funcionamiento del sistema a lo largo del tiempo.

2.1.6 Periodo de diseño

Se define como el horizonte de tiempo para el cual se proyecta el sistema de abastecimiento, durante el cual las infraestructuras deben operar de manera eficiente sin requerir ampliaciones significativas. Este periodo se establece considerando factores como el crecimiento poblacional y la vida útil de los componentes.

2.1.7 Proyección de la población

La proyección poblacional consiste en estimar la cantidad de habitantes que serán beneficiados por el sistema de abastecimiento de agua durante el periodo de diseño. (INEI, 2020).

2.1.8 Volumen y almacenamiento

El volumen de almacenamiento corresponde a la capacidad que poseen los reservorios para almacenar agua potable, permitiendo equilibrar la oferta y la demanda del recurso hídrico, mantener presiones adecuadas y asegurar la continuidad del servicio frente a variaciones de consumo o situaciones de emergencia.

2.1.9 Dotación y consumo

La dotación promedio diaria por habitante se establece a partir de estudios técnicos basados en información estadística confiable. Cuando no se dispone de dichos estudios, se consideran valores referenciales mínimos de 180 L/hab/d para zonas de clima frío y 220 L/hab/d para climas templados o cálidos en sistemas con conexiones domiciliarias.

2.2 Estándares, Marcos de trabajo y buenas prácticas

El estudio se desarrolla siguiendo criterios técnicos y buenas prácticas de la ingeniería hidráulica aplicadas al modelamiento de redes de distribución de agua potable, utilizando como herramienta principal el software WaterCAD, reconocido a nivel internacional por su capacidad para analizar, simular y optimizar sistemas hidráulicos. En este contexto, se parte de un modelamiento conceptual que permite representar de manera simplificada la red real, seguido de un proceso de calibración inicial, en el cual se ajustan parámetros como demandas, rugosidades y condiciones operativas, asegurando la coherencia entre los datos de campo y el modelo digital.

Asimismo, se realizan simulaciones bajo distintos escenarios de demanda, tanto en condiciones normales como en situaciones críticas o de máxima exigencia, lo que permite evaluar el comportamiento hidráulico del sistema frente a variaciones en el consumo. Estas simulaciones facilitan el análisis de variables clave como presiones, caudales, velocidades y pérdidas de carga, contribuyendo a una mejor comprensión del funcionamiento de la red.

En conjunto, estas prácticas permiten no solo mejorar la eficiencia operativa del sistema, sino también garantizar la continuidad y calidad del servicio de agua potable, reduciendo riesgos de fallas y contribuyendo a una gestión sostenible del recurso hídrico. De esta

manera, la propuesta se fundamenta en un enfoque técnico integral que busca fortalecer el desempeño del sistema de abastecimiento de agua potable del centro poblado de Caja.

2.3 Bases Legales y Marco Normativo

• Resolución Ministerial N.° 173-2016-VIVIENDA. Aprueba instrumentos y lineamientos técnicos para la formulación y evaluación de proyectos de agua potable y saneamiento en el ámbito rural, orientados a mejorar la calidad, sostenibilidad y eficiencia de los servicios de saneamiento.

• Guías de la Organización Mundial de la Salud sobre la calidad del agua potable (2017). Proporcionan criterios internacionales para la protección de la salud pública, estableciendo valores guía y enfoques de gestión de riesgos en sistemas de abastecimiento.

• Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – Libro 4 de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015). Establece los criterios técnicos y parámetros básicos para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado, incluyendo dotaciones, periodos de diseño, estimación de demandas y lineamientos para la planificación y dimensionamiento de la infraestructura hidráulica.

• Norma Boliviana NB 689: Diseño de Sistemas de Agua Potable (IBNORCA, 2004). Define los criterios de diseño hidráulico para sistemas de abastecimiento de agua potable, estableciendo parámetros relacionados con caudales de diseño, velocidades admisibles, presiones de servicio, diámetros mínimos y condiciones operativas que garanticen un funcionamiento eficiente y seguro de las redes de distribución.

• Norma OS.010 – Captación y Conducción de Agua para Consumo Humano (MVCS, 2009). Establece los criterios técnicos para el diseño, construcción y evaluación de las obras de captación y líneas de conducción de agua potable, garantizando el transporte adecuado del recurso hídrico desde la fuente de abastecimiento hasta los componentes del sistema.

• Norma OS.050: Redes de Distribución de Agua para Consumo Humano. Establece los criterios técnicos mínimos para el diseño hidráulico de redes de distribución de agua potable, incluyendo parámetros de presión, velocidad, diámetros de tuberías, pérdidas de carga y dispositivos de control, con la finalidad de garantizar un abastecimiento eficiente y seguro a la población.

3 CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Diseño de la Solución

La solución propuesta para el sistema de abastecimiento de agua potable de la localidad de Caja consiste en el rediseño hidráulico de la red de distribución mediante la reubicación del reservorio proyectado y la implementación de una sectorización hidráulica que permita optimizar las condiciones de operación del sistema. Esta propuesta busca mejorar la distribución del recurso hídrico, garantizar presiones adecuadas en los diferentes puntos de consumo y facilitar las actividades de operación y mantenimiento de la infraestructura.

Como parte del rediseño, el reservorio fue reubicado hacia una zona de mayor elevación con la finalidad de incrementar la carga hidráulica disponible para la distribución por gravedad. Inicialmente, el reservorio se encontraba ubicado en las coordenadas N: 8357622.827, E: 543329.787, con una cota de 2736.524 m s.n.m.; sin embargo, la ubicación proyectada corresponde a las coordenadas N: 8358392.041, E: 543575.837, con una cota de 2769.447 m s.n.m. Esta modificación permitió mejorar las condiciones de presión en la red y asegurar una distribución más eficiente hacia los diferentes sectores de abastecimiento.

Figura 1

Ubicación inicial y ubicación proyectada del reservorio.



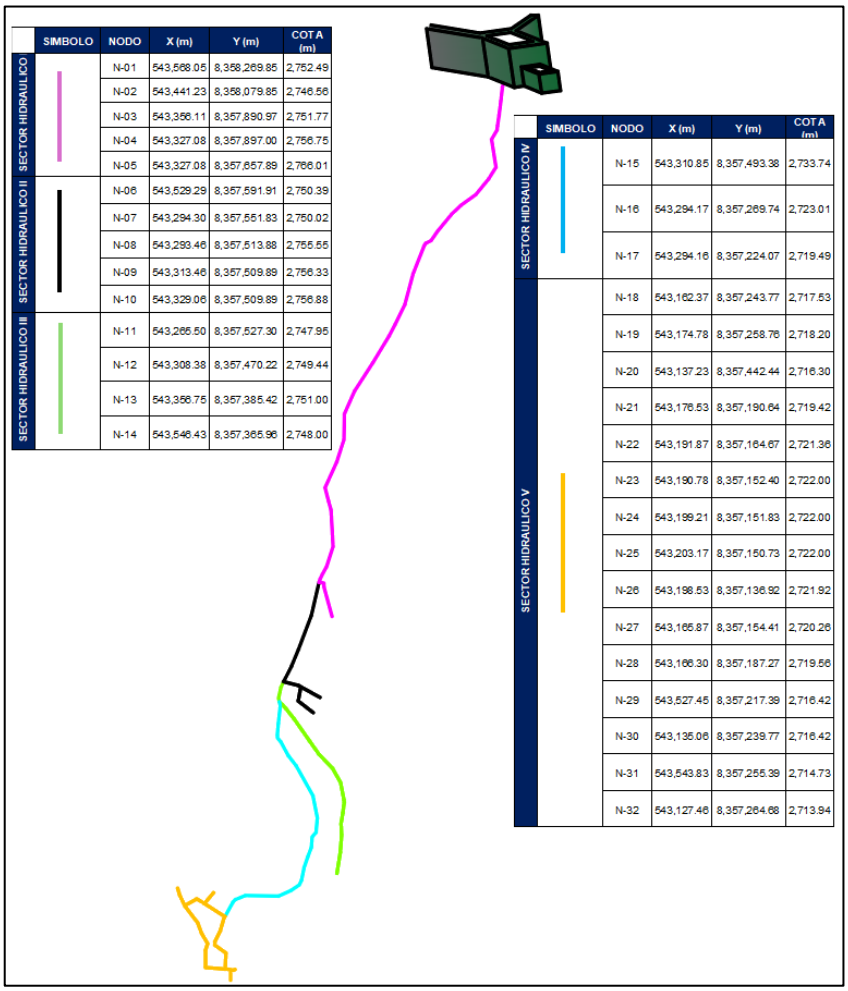
Nota. Se muestra la ubicación original del reservorio existente y la ubicación proyectada propuesta para la optimización hidráulica del sistema de abastecimiento de agua potable.

Asimismo, se implementó una sectorización hidráulica de la red de distribución con el propósito de mejorar el control operacional del sistema y reducir los efectos de las variaciones de presión ocasionadas por las diferencias de elevación presentes en la localidad. La sectorización se realizó mediante la ubicación estratégica de válvulas de control que delimitan zonas operativas dentro de una misma red de distribución, permitiendo efectuar actividades de mantenimiento, regulación y control sin afectar el funcionamiento total del sistema.

La red proyectada fue dividida en cinco sectores hidráulicos denominados Sector Hidráulico I, Sector Hidráulico II, Sector Hidráulico III, Sector Hidráulico IV y Sector Hidráulico V. Esta configuración permite una mejor gestión del sistema, facilitando el aislamiento de determinados tramos durante intervenciones de mantenimiento, reduciendo las afectaciones al servicio y contribuyendo a una operación más eficiente de la red de distribución.

Figura 2

Sectorización hidráulica de la red de distribución proyectada.



SIMBOLO	NODO	X (m)	Y (m)	COTA (m)
SECTOR HIDRAULICO I	N-01	543,568.05	8,358,269.85	2,752.49
	N-02	543,441.23	8,358,079.85	2,746.56
	N-03	543,356.11	8,357,890.97	2,751.77
	N-04	543,327.08	8,357,897.00	2,756.75
	N-05	543,327.08	8,357,657.89	2,766.01
SECTOR HIDRAULICO II	N-06	543,529.29	8,357,591.91	2,750.39
	N-07	543,294.30	8,357,551.83	2,750.02
	N-08	543,293.46	8,357,513.88	2,755.55
	N-09	543,313.46	8,357,509.89	2,756.33
	N-10	543,329.06	8,357,509.89	2,756.88
SECTOR HIDRAULICO III	N-11	543,265.50	8,357,527.30	2,747.95
	N-12	543,308.38	8,357,470.22	2,749.44
	N-13	543,356.75	8,357,385.42	2,751.00
	N-14	543,546.43	8,357,365.96	2,748.00

SIMBOLO	NODO	X (m)	Y (m)	COTA (m)
SECTOR HIDRAULICO IV	N-15	543,310.85	8,357,493.38	2,733.74
	N-16	543,294.17	8,357,269.74	2,723.01
	N-17	543,294.16	8,357,224.07	2,719.49
SECTOR HIDRAULICO V	N-18	543,162.37	8,357,243.77	2,717.53
	N-19	543,174.78	8,357,258.76	2,718.20
	N-20	543,137.23	8,357,442.44	2,716.30
	N-21	543,176.53	8,357,190.64	2,719.42
	N-22	543,191.87	8,357,164.67	2,721.36
	N-23	543,190.78	8,357,152.40	2,722.00
	N-24	543,199.21	8,357,151.83	2,722.00
	N-25	543,203.17	8,357,150.73	2,722.00
	N-26	543,198.53	8,357,136.92	2,721.92
	N-27	543,165.87	8,357,154.41	2,720.26
	N-28	543,166.30	8,357,187.27	2,719.56
	N-29	543,527.45	8,357,217.39	2,716.42
	N-30	543,135.06	8,357,239.77	2,716.42
	N-31	543,543.83	8,357,255.39	2,714.73
	N-32	543,127.46	8,357,264.68	2,713.94

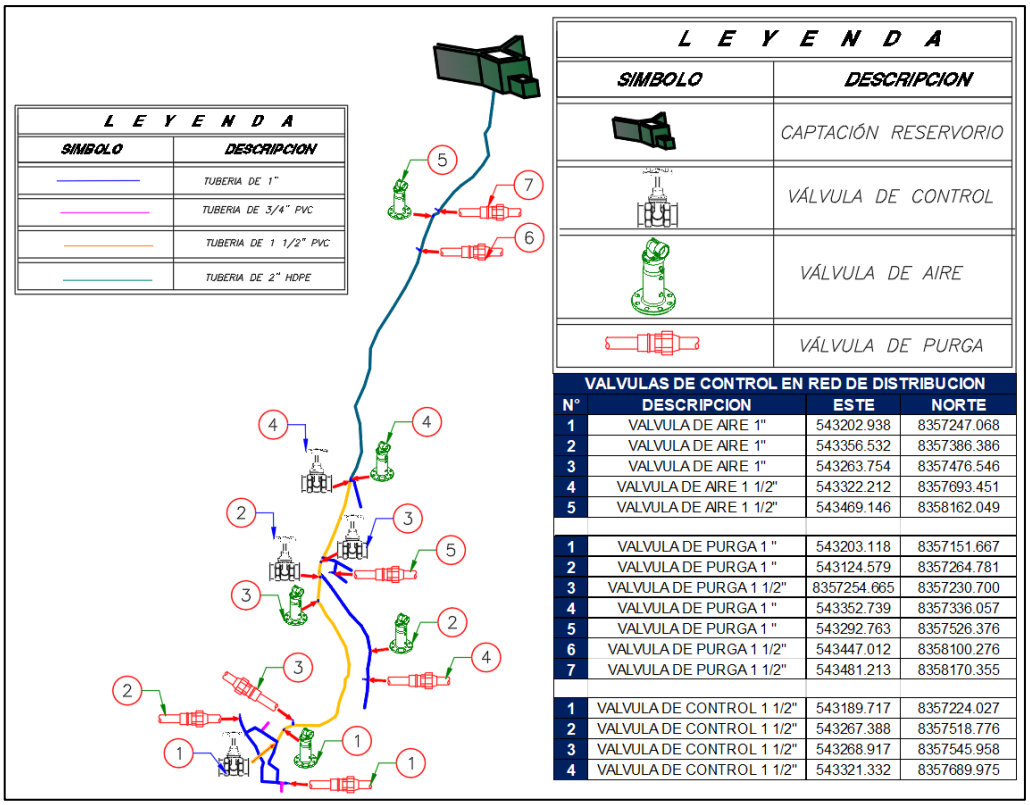
Nota. Se muestra la sectorización hidráulica propuesta para la red de distribución, conformada por cinco sectores operativos definidos para optimizar el funcionamiento del sistema.

Complementariamente, se incorporaron dispositivos hidráulicos destinados a mejorar la seguridad y eficiencia operacional del sistema. Entre ellos se consideran válvulas de aire ubicadas en los puntos altos de la red para evacuar el aire acumulado dentro de las tuberías, válvulas de purga localizadas en los puntos bajos para facilitar la limpieza y evacuación de sedimentos, válvulas de control destinadas a regular el flujo entre sectores hidráulicos.

La ubicación de estos dispositivos fue definida considerando las características topográficas del terreno y los resultados obtenidos durante el análisis hidráulico realizado en el modelo de simulación. Su implementación contribuye a garantizar condiciones adecuadas de funcionamiento, mejorar la estabilidad hidráulica del sistema y facilitar las actividades de operación y mantenimiento a largo plazo.

Figura 3

Ubicación de los dispositivos hidráulicos proyectados



VALVULAS DE CONTROL EN RED DE DISTRIBUCION			
N°	DESCRIPCION	ESTE	NORTE
1	VALVULA DE AIRE 1"	543202.938	8357247.068
2	VALVULA DE AIRE 1"	543356.532	8357386.386
3	VALVULA DE AIRE 1"	543263.754	8357476.546
4	VALVULA DE AIRE 1 1/2"	543322.212	8357693.451
5	VALVULA DE AIRE 1 1/2"	543469.146	8358162.049
1	VALVULA DE PURGA 1 "	543203.118	8357151.667
2	VALVULA DE PURGA 1 "	543124.579	8357264.781
3	VALVULA DE PURGA 1 1/2"	8357254.665	8357230.700
4	VALVULA DE PURGA 1 "	543352.739	8357336.057
5	VALVULA DE PURGA 1 "	543292.763	8357526.376
6	VALVULA DE PURGA 1 1/2"	543447.012	8358100.276
7	VALVULA DE PURGA 1 1/2"	543481.213	8358170.355
1	VALVULA DE CONTROL 1 1/2"	543189.717	8357224.027
2	VALVULA DE CONTROL 1 1/2"	543267.388	8357518.776
3	VALVULA DE CONTROL 1 1/2"	543268.917	8357545.958
4	VALVULA DE CONTROL 1 1/2"	543321.332	8357689.975

Nota. Ubicación de los dispositivos hidráulicos proyectados en la red de distribución sectorizada.

En conjunto, la solución propuesta permite mejorar el desempeño hidráulico del sistema mediante una distribución más uniforme de presiones, un mayor control operacional de la red y una mejor capacidad de respuesta frente a actividades de mantenimiento o eventuales interrupciones del servicio. La reubicación del reservorio, la sectorización hidráulica y la incorporación de dispositivos de control constituyen medidas complementarias que incrementan la confiabilidad, eficiencia y sostenibilidad del sistema de abastecimiento de agua potable de la localidad de Caja.

3.2 Desarrollo de la Solución

El desarrollo de la solución del sistema de abastecimiento de agua potable del centro poblado de Caja se realizó de manera secuencial, a partir de la evaluación del sistema existente, la identificación de sus deficiencias hidráulicas y la formulación de una propuesta de optimización basada en la sectorización de la red de distribución. Este proceso integró información obtenida en campo con el análisis hidráulico del sistema, permitiendo la simulación y validación del comportamiento del sistema propuesto bajo condiciones de máxima demanda.

3.2.1. Evaluación del comportamiento hidráulico del sistema actual

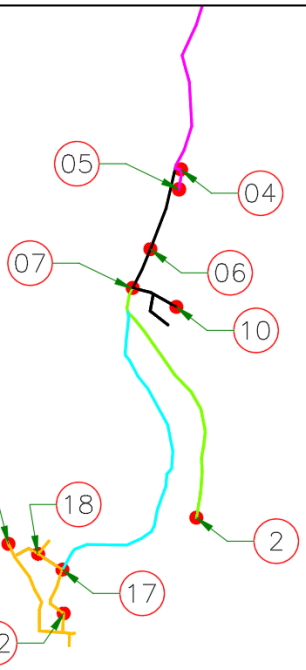
La evaluación del comportamiento hidráulico del sistema de abastecimiento de agua potable del centro poblado de Caja se realizó con la finalidad de caracterizar las condiciones reales de operación de la red de distribución. Para ello, se ejecutaron actividades de campo que incluyeron la toma de muestras de presión en distintos puntos distribuidos a lo largo del sistema, así como el aforo del caudal en puntos seleccionados de la red.

En primer lugar, se definieron y georreferenciaron los puntos de evaluación en la red de distribución, considerando su accesibilidad y representatividad dentro del sistema, con el objetivo de ejecutar las mediciones de campo.

Figura 4

Ubicación de puntos de medición de presión y aforo en la red de distribución del centro poblado de Caja.

UBICACIÓN DE NODOS EVALUADOS			
Punto	X (m)	Y (m)	Cota (m.s.n.m.)
N-05	543,327.08	8,357,657.89	2,761.00
N-10	543,329.06	8,357,509.89	2,759.88
N-04	543,327.08	8,357,897.00	2,756.66
N-06	543,529.29	8,357,591.91	2,753.59
N-07	543,294.30	8,357,551.83	2,750.02
N-14	543,546.43	8,357,365.96	2,748.00
N-22	543,191.87	8,357,164.67	2,721.36
N-17	543,294.16	8,357,224.07	2,719.49
N-18	543,162.37	8,357,243.77	2,717.53
N-31	543,543.83	8,357,255.39	2,714.43



Nota: La figura muestra la distribución espacial de los puntos seleccionados para la medición de presión y aforo en campo a lo largo de la red de abastecimiento de agua potable.

Una vez definidos los puntos de evaluación, se procedió a la medición directa de la presión en campo mediante equipos portátiles, registrándose los valores hidráulicos en condiciones de operación del sistema.

Las mediciones de presión se realizaron bajo condiciones de máxima demanda, obteniéndose valores de 0 m.c.a. en algunos puntos de mayor elevación y valores superiores a 30 m.c.a. en puntos de menor cota.

Figura 5

Medición de presión en campo mediante equipo portátil en la red de distribución del sistema de abastecimiento de agua potable.



Nota: La figura muestra el procedimiento de medición directa de presión en campo en puntos seleccionados de la red de distribución del centro poblado de Caja.

De manera complementaria, se realizó el aforo del caudal en puntos seleccionados de la red, con la finalidad de obtener información hidráulica adicional para la caracterización del sistema.

Figura 6

Ejecución de aforo de caudal en campo en la red de distribución del sistema de abastecimiento de agua potable.



Nota: *La figura muestra el procedimiento de aforo realizado en campo en puntos seleccionados de la red de distribución del centro poblado de Caja.*

Asimismo, se recopiló información técnica de la red de distribución, incluyendo diámetros de tuberías, longitudes de tramos y materiales de conducción, los cuales permitieron complementar la caracterización hidráulica del sistema.

Figura 7

Levantamiento de características físicas de la red de distribución del sistema de abastecimiento de agua potable (diámetros, longitudes y materiales de tuberías).



Nota: La figura muestra el registro en campo de las características de la red de distribución utilizadas como base para la evaluación hidráulica del sistema.

A partir de la información de caudales obtenida mediante aforo y las características geométricas de la red, se realizó la estimación del comportamiento del flujo en los diferentes tramos del sistema. De manera complementaria, las pérdidas de carga fueron determinadas a partir de las diferencias de presión registradas entre los puntos evaluados y las condiciones físicas de la red de distribución.

3.2.2. Resultados hidráulicos obtenidos en campo

El presente subcapítulo presenta los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas en campo en el sistema de abastecimiento de agua potable del centro poblado de Caja, con la finalidad de caracterizar su comportamiento hidráulico en condiciones reales de operación.

Las mediciones se realizaron bajo condiciones de máxima demanda, considerando la presión como variable medida directamente en campo, mientras que la velocidad del flujo y las pérdidas de carga fueron estimadas a partir de los caudales obtenidos mediante aforo y las características geométricas de la red de distribución.

a) Resultados de evaluación de presiones

Las mediciones de presión evidencian variaciones significativas en la red de distribución. En los puntos de mayor elevación se registraron valores de 0 m.c.a., mientras que en zonas de menor cota se alcanzaron valores superiores a 30 m.c.a., llegando hasta 36.1 m.c.a.

Tabla 2

Resultados representativos de presión obtenidos en campo

Punto	Cota (m.s.n.m.)	Presión (m.c.a.)
N-05	2761.00	0.0
N-10	2759.88	0.0
N-04	2756.66	0.8
N-06	2753.59	3.9
N-07	2750.02	5.7
N-14	2748.00	3.2
N-22	2721.36	30.0
N-17	2719.49	34.6
N-18	2717.53	36.1
N-31	2714.43	33.7

b) Resultados de evaluación de velocidades

Las velocidades fueron estimadas indirectamente a partir de los caudales obtenidos en campo y las características geométricas de la red (diámetro, longitud y material). Los resultados muestran variaciones en los tramos evaluados, con valores altos en tuberías de menor diámetro y pendientes pronunciadas, y valores bajos en tramos de mayor sección.

Tabla 3

Resultados representativos de velocidades obtenidos en campo

Longitud (m)	Nodo Inicial	Nodo Final	Diámetro (mm)	Material	Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)
30.78	N-04	N-05	29.4	PVC	0.5	1.05
49.69	N-06	N-07	43.4	PVC	1.0	0.90
30.6	N-08	N-10	29.4	PVC	0.5	0.06
100.28	N-13	N-14	29.4	PVC	0.85	3.1
36.06	N-17	N-18	29.4	PVC	0.80	2.2
21.86	N-22	N-23	29.4	PVC	1.05	3.8
9.29	N-31	N-32	29.4	PVC	0.20	0.01

c) Resultados de evaluación de pérdidas de carga

Las pérdidas de carga fueron estimadas a partir de las diferencias de presión entre puntos consecutivos y las características geométricas de la red. Los resultados muestran mayores pérdidas en tramos con pendientes pronunciadas y diámetros reducidos.

Tabla 4

Resultados representativos de pérdidas de carga obtenidos en campo

Longitud (m)	Nodo Inicial	Nodo Final	Diámetro (mm)	Material	Caudal (L/s)	Perdida de carga (m)
30.78	N-04	N-05	29.4	PVC	0.5	3.4
49.69	N-06	N-07	43.4	PVC	1.0	4.2
30.6	N-08	N-10	29.4	PVC	0.5	4.8
100.28	N-13	N-14	29.4	PVC	0.85	15.8
36.06	N-17	N-18	29.4	PVC	0.8	6.5
21.86	N-22	N-23	29.4	PVC	1.05	12.9
9.29	N-31	N-32	29.4	PVC	0.2	1.8

3.2.3. Modelado de la propuesta de sectorización hidráulica

El modelado hidráulico de la propuesta de sectorización se desarrolló con la finalidad de representar el comportamiento del sistema de distribución del centro poblado de Caja bajo condiciones de operación de máxima demanda, utilizando el software WaterCAD como herramienta de simulación hidráulica.

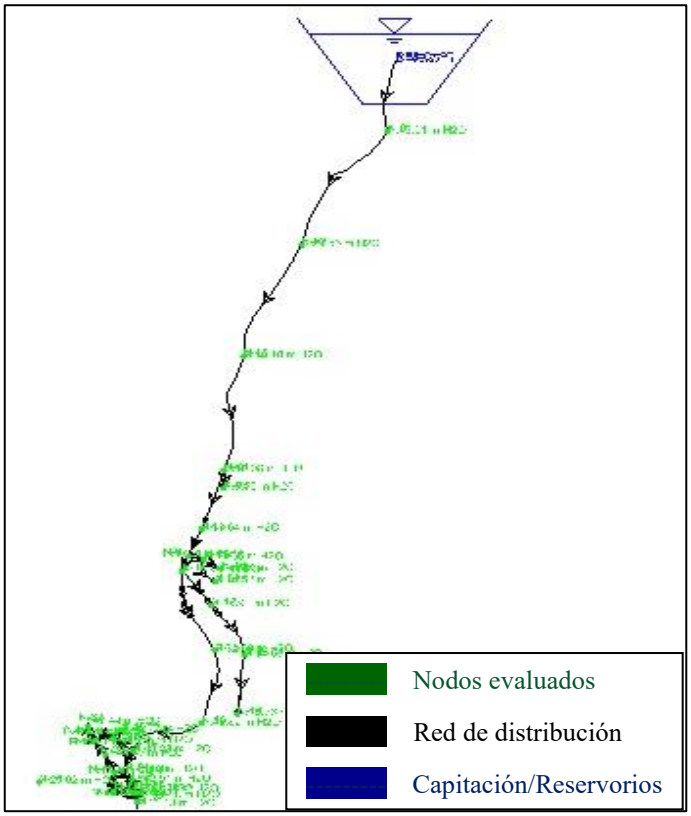
Para la construcción del modelo se incorporó la red de distribución sectorizada propuesta, considerando la configuración geométrica del sistema, las cotas de los nodos, las longitudes de tuberías, los diámetros y los materiales de conducción. Asimismo, se asignaron los

coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams, adoptándose valores de 150 para tuberías de PVC y 140 para tuberías de HDPE, de acuerdo con las condiciones de diseño del sistema.

El modelo hidráulico incluye la sectorización de la red y la implementación de elementos de control como válvulas de aire, válvulas de purga y válvulas de control los cuales fueron ubicados en función de las condiciones topográficas y la configuración operativa del sistema, con el fin de representar adecuadamente el comportamiento hidráulico de la red proyectada.

Figura 8

Modelo hidráulico optimizado de la red de distribución en el software WaterCAD.



Nota. Modelo hidráulico optimizado de la red de distribución del centro poblado de Caja desarrollado en el software WaterCAD.

3.2.4. Resultados hidráulicos obtenidos del modelado

El presente apartado presenta los resultados del modelado hidráulico de la red sectorizada, desarrollado en el software WaterCAD bajo condiciones de máxima demanda. Se incluyen los resultados de presiones, pérdidas de carga y velocidades obtenidos en los nodos y tramos de la red de distribución del sistema de agua potable en la localidad de Caja.

a) Resultados hidráulicos de presiones

El modelado hidráulico de presiones se desarrolló considerando la configuración de la red sectorizada, las elevaciones del terreno y las demandas nodales bajo condición de máxima demanda.

Tabla 5

Resultados hidráulicos de presiones del sistema sectorizado – Máxima demanda

Nodo	Elevación (m)	Gradiente Hidráulico (m)	Demanda (L/s)	Presión (m.c.a.)
N-01	2752.49	2768.43	0	15.91
N-02	2746.56	2768.15	0	21.55
N-03	2751.77	2767.9	0	16.10
N-04	2756.66	2767.66	-0.2	10.98
N-05	2761	2767.52	0.2	10.12
N-06	2753.59	2767.26	0	13.64
N-07	2750.02	2767.07	-0.231	17.01
N-08	2755.55	2766.93	-0.069	11.35
N-09	2756.33	2766.87	0.1	10.52
N-10	2759.88	2766.79	0.2	10.54
N-11	2747.95	2766.97	-0.268	18.98
N-12	2749.44	2766.4	0	16.92
N-13	2751	2765.59	0	14.56
N-14	2748	2764.79	0.268	16.76
N-15	2733.74	2766.41	0	32.60
N-16	2723.01	2765.92	0	42.82
N-17	2719.49	2765.46	-0.268	45.88
N-18	2717.53	2765.17	-0.144	47.55
N-19	2718	2764.86	0.2	46.77
N-20	2716.3	2765.02	0.212	48.62
N-21	2719.42	2764.54	0	45.03
N-22	2721.36	2763.95	0	42.51
N-23	2722	2763.41	-0.074	41.33
N-24	2722	2763.37	-0.088	41.28
N-25	2722	2763.36	0.1	41.28
N-26	2721.92	2763.13	0.2	41.13
N-27	2720.26	2763.03	0	42.68
N-28	2719	2762.56	0	43.48
N-29	2717.56	2762.12	0	44.47
N-30	2716.42	2761.72	0	45.21
N-31	2714.43	2761.48	0.162	46.96
N-32	2713.94	2761.47	0.1	47.44

b) Resultados hidráulicos de perdida de carga

El modelado hidráulico de pérdidas de carga se realizó considerando las longitudes de tuberías, diámetros, material de conducción, caudales circulantes y condiciones topográficas del sistema.

Tabla 6

Resultados hidráulicos de perdida de carga del sistema sectorizado – Máxima demanda

Tubería	Longitud (m)	Nodo Inicio	Nodo Fin	Diámetro (mm)	Material	Caudal (L/s)	Pérdida de Carga (m)
1	122.16	RES-CAPT	N-01	55.4	HDPE	0.5	0.14
2	238.15	N-01	N-02	55.4	HDPE	0.5	0.28
3	210.5	N-02	N-03	55.4	HDPE	0.5	0.25
4	200.75	N-03	N-04	55.4	HDPE	0.5	0.24
5	30.78	N-05	N-04	29.4	PVC	-0.2	0.15
6	105.73	N-04	N-06	43.4	PVC	0.5	0.4
7	49.69	N-06	N-07	43.4	PVC	0.5	0.19
8	22.89	N-07	N-08	29.4	PVC	0.231	0.14
9	46.35	N-09	N-08	29.4	PVC	-0.1	0.06
10	30.6	N-08	N-10	29.4	PVC	0.2	0.14
11	26.23	N-07	N-11	43.4	PVC	0.5	0.1
12	71.53	N-11	N-12	29.4	PVC	0.268	0.57
13	100.05	N-12	N-13	29.4	PVC	0.268	0.8
14	100.28	N-13	N-14	29.4	PVC	0.268	0.8
15	146.11	N-11	N-15	43.4	PVC	0.5	0.56
16	128.76	N-15	N-16	43.4	PVC	0.5	0.49
17	121.57	N-16	N-17	43.4	PVC	0.5	0.46
18	36.06	N-17	N-18	29.4	PVC	0.268	0.29
19	19.67	N-19	N-18	22.9	PVC	-0.2	0.31
20	28.76	N-18	N-20	29.4	PVC	0.212	0.15
21	37	N-17	N-21	29.4	PVC	0.5	0.92
22	23.8	N-21	N-22	29.4	PVC	0.5	0.59
23	21.86	N-22	N-23	29.4	PVC	0.5	0.54
24	8.32	N-23	N-24	29.4	PVC	0.212	0.04
25	4.17	N-24	N-25	29.4	PVC	0.1	0.01
26	15.2	N-24	N-26	22.9	PVC	0.2	0.24
27	27.25	N-23	N-27	29.4	PVC	0.362	0.38
28	33.84	N-27	N-28	29.4	PVC	0.362	0.47
29	32.45	N-28	N-29	29.4	PVC	0.362	0.45
30	28.52	N-29	N-30	29.4	PVC	0.362	0.39
31	17.25	N-30	N-31	29.4	PVC	0.362	0.24
32	9.29	N-31	N-32	29.4	PVC	0.1	0.01

c) Resultados hidráulicos de velocidades

El modelado hidráulico de velocidades se realizó bajo condición de máxima demanda, considerando los parámetros hidráulicos de la red sectorizada.

Tabla 7

Resultados hidráulicos de velocidad del sistema sectorizado – Máxima demanda

Tubería	Longitud (m)	Nodo Inicio	Nodo Fin	Diámetro (mm)	Material	Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)
1	122.16	RES-CAPT	N-01	55.4	HDPE	0.5	0.30
2	238.15	N-01	N-02	55.4	HDPE	0.5	0.31
3	210.5	N-02	N-03	55.4	HDPE	0.5	0.30
4	200.75	N-03	N-04	55.4	HDPE	0.5	0.33
5	30.78	N-05	N-04	29.4	PVC	-0.2	0.31
6	105.73	N-04	N-06	43.4	PVC	0.5	0.34
7	49.69	N-06	N-07	43.4	PVC	0.5	0.35
8	22.89	N-07	N-08	29.4	PVC	0.231	0.34
9	46.35	N-09	N-08	29.4	PVC	-0.1	0.33
10	30.6	N-08	N-10	29.4	PVC	0.2	0.32
11	26.23	N-07	N-11	43.4	PVC	0.5	0.34
12	71.53	N-11	N-12	29.4	PVC	0.268	0.39
13	100.05	N-12	N-13	29.4	PVC	0.268	0.39
14	100.28	N-13	N-14	29.4	PVC	0.268	0.39
15	146.11	N-11	N-15	43.4	PVC	0.5	0.34
16	128.76	N-15	N-16	43.4	PVC	0.5	0.34
17	121.57	N-16	N-17	43.4	PVC	0.5	0.34
18	36.06	N-17	N-18	29.4	PVC	0.268	0.39
19	19.67	N-19	N-18	22.9	PVC	-0.2	0.49
20	28.76	N-18	N-20	29.4	PVC	0.212	0.31
21	37	N-17	N-21	29.4	PVC	0.5	0.74
22	23.8	N-21	N-22	29.4	PVC	0.5	0.74
23	21.86	N-22	N-23	29.4	PVC	0.5	0.74
24	8.32	N-23	N-24	29.4	PVC	0.212	0.31
25	4.17	N-24	N-25	29.4	PVC	0.1	0.32
26	15.2	N-24	N-26	22.9	PVC	0.2	0.49
27	27.25	N-23	N-27	29.4	PVC	0.362	0.53
28	33.84	N-27	N-28	29.4	PVC	0.362	0.53
29	32.45	N-28	N-29	29.4	PVC	0.362	0.53
30	28.52	N-29	N-30	29.4	PVC	0.362	0.53
31	17.25	N-30	N-31	29.4	PVC	0.362	0.53
32	9.29	N-31	N-32	29.4	PVC	0.1	0.34

3.3. Validación del Proyecto

La validación del proyecto se realizó mediante la comparación entre los resultados hidráulicos del sistema existente y los obtenidos del modelo optimizado desarrollado en el software WaterCAD, bajo condiciones de máxima demanda.

Para ello, se seleccionaron diez puntos representativos de la red de distribución, correspondientes a nodos y tramos de control definidos en el levantamiento de información de campo, los cuales fueron evaluados tanto en condiciones reales como en el modelo hidráulico optimizado, manteniendo correspondencia directa entre los mismos elementos hidráulicos analizados. Los resultados de esta comparación se presentan en las Tablas 8, 10 y 12, correspondientes a presión, velocidad y pérdida de carga, respectivamente, donde se muestran los valores obtenidos en campo, los resultados del modelo optimizado y sus variaciones porcentuales.

A partir de estos resultados, se determinaron las variaciones porcentuales entre ambas condiciones para las variables hidráulicas evaluadas. En base a ello, se definieron factores promedio de ajuste hidráulico para presión, velocidad y pérdida de carga, los cuales fueron aplicados para la representación del comportamiento hidráulico del sistema existente a nivel global. La sistematización de estos factores permitió generar las Tablas 9, 11 y 13, que representan la condición hidráulica generalizada del sistema actual en términos de presión, velocidad y pérdida de carga, a partir de la extrapolación de los puntos evaluados.

a) Comparación de presiones

La comparación de presiones permitió evaluar la respuesta del sistema bajo las mismas condiciones de demanda en los nodos representativos de la red de distribución.

Tabla 8

Comparación de presiones entre campo y modelo hidráulico optimizado

Nodo	Presión en campo (m.c.a.)	Presión modelada (m.c.a.)	Variación (%)
N-05	0	10.12	100.00
N-10	0	10.54	100.00
N-04	0.8	10.98	92.71
N-06	3.9	13.64	71.41
N-07	5.7	17.01	66.49
N-14	3.2	16.76	80.91
N-22	30	42.51	29.43
N-17	34.6	45.88	24.59
N-18	36.1	47.55	24.08
N-31	33.7	46.96	28.24

La comparación de presiones evidencia diferencias significativas entre los valores medidos en campo y los obtenidos en el modelo hidráulico optimizado. En varios nodos del sistema existente se registran presiones nulas o deficientes, mientras que en el modelo sectorizado se alcanzan valores más uniformes y dentro de rangos hidráulicamente adecuados. La variación promedio obtenida es de 61.78 %, reflejando el cambio en el comportamiento hidráulico del sistema tras la optimización.

A partir de estos resultados se generaron factores de ajuste para presión, los cuales permiten representar de manera generalizada el comportamiento del sistema actual en toda la red de distribución.

Tabla 9

Tabla hidráulica representativa del sistema existente de presiones

Etiqueta	elevación (m)	Gradiente hidráulico (m)	Demanda (L/s)	presión (m H2O)
N-01	2752.49	2758.29	0	5.8
N-02	2746.56	2757.36	0	10.8
N-03	2751.77	2756.17	0	4.4
N-04	2756.66	2757.46	-0.35	0.8
N-05	2761.00	2761	0.35	0
N-06	2753.59	2757.49	0	3.9
N-07	2750.02	2755.72	-0.42	5.7
N-08	2755.55	2756.05	-0.12	0.5
N-09	2756.33	2756.33	0.18	0
N-10	2759.88	2759.88	0.35	0
N-11	2747.95	2755.15	-0.5	7.2
N-12	2749.44	2754.04	0	4.6
N-13	2751.00	2753.1	0	2.1
N-14	2748.00	2751.2	0.35	3.2
N-15	2733.74	2753.74	0	20
N-16	2723.01	2754.81	0	31.8
N-17	2719.49	2754.09	-0.5	34.6
N-18	2717.53	2753.63	-0.25	36.1
N-19	2718.00	2753.2	0.35	35.2
N-20	2716.30	2754.2	0.3	37.9
N-21	2719.42	2752.82	0	33.4
N-22	2721.36	2751.36	0	30
N-23	2722.00	2750.5	-0.15	28.5
N-24	2722.00	2750	-0.18	28
N-25	2722.00	2749.8	0.18	27.8
N-26	2721.92	2749.42	0.35	27.5
N-27	2720.26	2749.16	0	28.9
N-28	2719.00	2748.7	0	29.7
N-29	2717.56	2748.06	0	30.5
N-30	2716.42	2747.82	0	31.4
N-31	2714.43	2748.13	0.22	33.7
N-32	2713.94	2748.04	0.18	34.1

En el sistema actual, las presiones registradas evidencian condiciones hidráulicas no uniformes, con sectores críticos en zonas de mayor cota donde se presentan valores nulos o insuficientes. En contraste, el modelo hidráulico optimizado muestra una distribución más estable y homogénea de presiones en toda la red, lo que refleja una mejora en la continuidad y estabilidad del servicio bajo condiciones sectorizadas de operación.

b) Comparación de Velocidades

La comparación de velocidades tiene como finalidad evaluar el comportamiento hidráulico del flujo en los tramos representativos del sistema, contrastando las condiciones registradas en campo frente a los resultados obtenidos en el modelo hidráulico optimizado.

Tabla 10

Comparación de velocidades entre campo y modelo hidráulico optimizado

Tramo	Velocidad en campo (m/s)	Velocidad modelada (m/s)	Variación (%)
|N-04 – N-05	1.05	0.31	70.48
N-06 – N-07	0.9	0.35	61.11
N-08 – N-10	0.06	0.32	81.25
N-13 – N-14	3.1	0.39	87.42
N-17 – N-18	2.2	0.39	82.27
N-22 – N-23	3.8	0.74	80.53
N-31 – N-32	0.01	0.34	97.06

El análisis comparativo evidencia una variabilidad significativa entre las velocidades del sistema existente y las obtenidas en el modelo optimizado. En el sistema actual se identifican tramos con velocidades elevadas, asociadas principalmente a condiciones geométricas y topográficas desfavorables, así como sectores con circulación deficiente.

En contraste, el modelo hidráulico optimizado presenta velocidades más uniformes y dentro de rangos operativos adecuados para sistemas de distribución de agua potable. La variación promedio obtenida es de 52.29 %, reflejando la diferencia de comportamiento hidráulico entre ambas condiciones.

A partir de los factores de ajuste obtenidos, se elaboró una representación general del comportamiento de velocidades en el sistema existente, permitiendo estimar su distribución hidráulica en toda la red de distribución.

Tabla 11

Tabla hidráulica representativa del sistema existente de velocidades

tubería	Longitud (m)	Inicio de nodo	Fin de nodo	diámetro (mm)	Material	Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)
1	122.16	RES-CAPT	N-01	55.4	HDPE	1.2	0.62
2	238.15	N-01	N-02	55.4	HDPE	1.2	0.62
3	210.5	N-02	N-03	55.4	HDPE	1.15	0.6
4	200.75	N-03	N-04	55.4	HDPE	1.1	0.58
5	30.78	N-05	N-04	29.4	PVC	-0.5	1.05
6	105.73	N-04	N-06	43.4	PVC	1	0.9
7	49.69	N-06	N-07	43.4	PVC	1	0.9
8	22.89	N-07	N-08	29.4	PVC	0.9	1.8
9	46.35	N-09	N-08	29.4	PVC	-0.3	0.04
10	30.6	N-08	N-10	29.4	PVC	0.5	0.06
11	26.23	N-07	N-11	43.4	PVC	1	0.9
12	71.53	N-11	N-12	29.4	PVC	0.9	2.4
13	100.05	N-12	N-13	29.4	PVC	0.9	2.8
14	100.28	N-13	N-14	29.4	PVC	0.85	3.1
15	146.11	N-11	N-15	43.4	PVC	1	0.9
16	128.76	N-15	N-16	43.4	PVC	1	0.9
17	121.57	N-16	N-17	43.4	PVC	1	0.9
18	36.06	N-17	N-18	29.4	PVC	0.8	2.2
19	19.67	N-19	N-18	22.9	PVC	-0.6	2.8
20	28.76	N-18	N-20	29.4	PVC	0.7	2.1
21	37	N-17	N-21	29.4	PVC	1.1	3.2
22	23.8	N-21	N-22	29.4	PVC	1.1	3.5
23	21.86	N-22	N-23	29.4	PVC	1.05	3.8
24	8.32	N-23	N-24	29.4	PVC	0.7	1.9
25	4.17	N-24	N-25	29.4	PVC	0.25	0.02
26	15.2	N-24	N-26	22.9	PVC	0.5	2.4
27	27.25	N-23	N-27	29.4	PVC	0.9	3
28	33.84	N-27	N-28	29.4	PVC	0.9	3.2
29	32.45	N-28	N-29	29.4	PVC	0.9	3.4
30	28.52	N-29	N-30	29.4	PVC	0.85	3.5
31	17.25	N-30	N-31	29.4	PVC	0.85	3.7
32	9.29	N-31	N-32	29.4	PVC	0.2	0.01

En el sistema existente se identifican tramos con velocidades elevadas y sectores con circulación deficiente, lo que evidencia un comportamiento hidráulico no controlado dentro de la red. Por el contrario, el modelo optimizado presenta un régimen de flujo más uniforme, con velocidades dentro de rangos adecuados de operación, lo que refleja una mejora en la estabilidad hidráulica del sistema.

c) Comparación de resultados en la Perdida de cargas

La comparación de pérdidas de carga permite evaluar la disipación de energía hidráulica en los tramos analizados, contrastando el comportamiento del sistema existente con el modelo hidráulico optimizado bajo condiciones equivalentes de operación.

Tabla 12

Comparación de perdida de carga en el sistema existente y modelo hidráulico optimizado

Tramo	Pérdida en campo (m)	Pérdida modelada (m)	Variación (%)
N-04 – N-05	3.4	0.15	95.59
N-06 – N-07	4.2	0.19	95.48
N-08 – N-10	4.8	0.14	97.08
N-13 – N-14	15.8	0.80	94.94
N-17 – N-18	6.5	0.29	95.54
N-22 – N-23	12.9	0.54	95.81
N-31 – N-32	1.8	0.01	99.44

El análisis evidencia diferencias marcadas entre las pérdidas de carga del sistema existente y las obtenidas en el modelo optimizado. En el sistema actual se registran valores elevados de pérdida de energía, asociados principalmente a condiciones hidráulicas desfavorables, mientras que en el modelo optimizado estos valores se reducen significativamente debido a la reorganización de la red.

La variación promedio obtenida es de 96.27 %, lo que refleja una diferencia sustancial en la disipación de energía entre ambos escenarios.

A partir de los factores de ajuste determinados, se desarrolló una representación generalizada de las pérdidas de carga del sistema existente, permitiendo caracterizar su comportamiento hidráulico a nivel global.

Tabla 13

Tabla hidráulica representativa del sistema existente de perdida de cargas

Tuberia	Longitud (m)	Inicio de nodo	Fin de nodo	Diametro (mm)	Material	Caudal (L/s)	Perdidad de carga (m)
1	122.16	RES-CAPT	N-01	55.4	HDPE	1.2	4.2
2	238.15	N-01	N-02	55.4	HDPE	1.2	7.8
3	210.5	N-02	N-03	55.4	HDPE	1.15	7.1
4	200.75	N-03	N-04	55.4	HDPE	1.1	8.6
5	30.78	N-05	N-04	29.4	PVC	-0.5	3.4
6	105.73	N-04	N-06	43.4	PVC	1	6.9
7	49.69	N-06	N-07	43.4	PVC	1	4.2
8	22.89	N-07	N-08	29.4	PVC	0.9	5.8
9	46.35	N-09	N-08	29.4	PVC	-0.3	3.9
10	30.6	N-08	N-10	29.4	PVC	0.5	4.8
11	26.23	N-07	N-11	43.4	PVC	1	3.5
12	71.53	N-11	N-12	29.4	PVC	0.9	10.6
13	100.05	N-12	N-13	29.4	PVC	0.9	14.2
14	100.28	N-13	N-14	29.4	PVC	0.85	15.8
15	146.11	N-11	N-15	43.4	PVC	1	7.2
16	128.76	N-15	N-16	43.4	PVC	1	6.8
17	121.57	N-16	N-17	43.4	PVC	1	6.2
18	36.06	N-17	N-18	29.4	PVC	0.8	6.5
19	19.67	N-19	N-18	22.9	PVC	-0.6	7.1
20	28.76	N-18	N-20	29.4	PVC	0.7	5.8
21	37	N-17	N-21	29.4	PVC	1.1	14.8
22	23.8	N-21	N-22	29.4	PVC	1.1	13.2
23	21.86	N-22	N-23	29.4	PVC	1.05	12.9
24	8.32	N-23	N-24	29.4	PVC	0.7	3.6
25	4.17	N-24	N-25	29.4	PVC	0.25	1.4
26	15.2	N-24	N-26	22.9	PVC	0.5	6.8
27	27.25	N-23	N-27	29.4	PVC	0.9	9.8
28	33.84	N-27	N-28	29.4	PVC	0.9	10.6
29	32.45	N-28	N-29	29.4	PVC	0.9	11.2
30	28.52	N-29	N-30	29.4	PVC	0.85	11.6
31	17.25	N-30	N-31	29.4	PVC	0.85	10.8
32	9.29	N-31	N-32	29.4	PVC	0.2	1.8

En el sistema actual se registran pérdidas de carga elevadas y variables, asociadas a condiciones hidráulicas desfavorables en distintos tramos de la red. En contraste, el modelo optimizado presenta una reducción significativa de la disipación de energía, evidenciando un comportamiento hidráulico más eficiente y estable bajo la configuración sectorizada del sistema.

3.4. Interpretación de los Resultados

Objetivo específico 1: Recopilar y sistematizar la información del sistema de abastecimiento de agua potable existente en el centro poblado de Caja

La recopilación y sistematización de la información del sistema de abastecimiento de agua potable del centro poblado de Caja permitió identificar las principales deficiencias hidráulicas que afectan su funcionamiento. Los resultados obtenidos durante la evaluación de campo evidenciaron presiones insuficientes en las zonas altas, presiones elevadas en los sectores de menor cota, velocidades de flujo fuera de los rangos recomendados y pérdidas de carga significativas en diversos tramos de la red.

Estos resultados se dieron principalmente debido a las características topográficas de la localidad, ya que las diferencias de elevación influyen directamente en la distribución de las presiones dentro del sistema. Las bajas presiones registradas en las zonas altas se explican por la pérdida de energía que experimenta el agua durante su recorrido, mientras que las presiones elevadas observadas en las zonas bajas son consecuencia del funcionamiento del sistema por gravedad y de las diferencias altimétricas existentes entre la captación y los puntos de consumo.

Asimismo, las velocidades inadecuadas y las pérdidas de carga identificadas se encuentran asociadas al reducido diámetro de algunas tuberías, a las pendientes pronunciadas del terreno, al deterioro de la infraestructura y a la ausencia de elementos de regulación hidráulica, como válvulas de control y dispositivos para el manejo de presiones. Estas condiciones generan un comportamiento hidráulico desequilibrado que afecta la eficiencia del sistema y limita la continuidad del servicio.

Por lo tanto, la información recopilada permitió comprender las causas que originan los problemas hidráulicos del sistema existente, constituyendo una base técnica fundamental para el planteamiento de la propuesta de sectorización hidráulica y las medidas de optimización desarrolladas en la presente investigación.

De acuerdo con la Norma OS.050 del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), la presión estática en los sistemas de abastecimiento de agua potable no debe ser menor de 10 m.c.a. ni mayor de 50 m.c.a. Asimismo, según la Resolución Ministerial N.° 173-2016-VIVIENDA, la presión mínima de servicio en cualquier punto de la red de distribución o

línea de alimentación no debe ser inferior a 5 m.c.a., mientras que la presión estática máxima permitida en la red de distribución es de 60 m.c.a.

Tabla 14

Tabla hidráulica representativa del sistema existente de perdida de cargas según la norma

Punto	Cota (m.s.n.m.)	Presión (m.c.a.)	NORMA OS.050
N-05	2761	0	NO CUMPLE
N-10	2759.88	0	NO CUMPLE
N-04	2756.66	0.8	NO CUMPLE
N-06	2753.59	3.9	NO CUMPLE
N-07	2750.02	5.7	CUMPLE
N-14	2748	3.2	NO CUMPLE
N-22	2721.36	30	CUMPLE
N-17	2719.49	34.6	CUMPLE
N-18	2717.53	36.1	CUMPLE
N-31	2714.43	33.7	CUMPLE

Los resultados de presión obtenidos en campo evidencian que el sistema de abastecimiento de agua potable del centro poblado de Caja presenta deficiencias hidráulicas significativas, debido a que los nodos evaluados registran presiones inferiores al mínimo de 5 m.c.a. establecido por la resolución ministerial RM-173-2016-VIVIENDA, 2016. Esta situación se presenta principalmente en las zonas de mayor elevación, donde las pérdidas de carga y la topografía reducen las presiones. En contraste, las zonas bajas presentan presiones dentro del rango normativo, evidenciando un comportamiento hidráulico desequilibrado en la red.

Tabla 15

Tabla hidráulica representativa del sistema existente de velocidad según la norma

Longitud (m)	Nodo Inicial	Nodo Final	Velocidad (m/s)	RM-173-2016-VIVIENDA
30.78	N-04	N-05	1.05	CUMPLE
49.69	N-06	N-07	0.90	CUMPLE
30.6	N-08	N-10	0.06	NO CUMPLE
100.28	N-13	N-14	3.10	NO CUMPLE
36.06	N-17	N-18	2.20	CUMPLE
21.86	N-22	N-23	3.80	NO CUMPLE
9.29	N-31	N-32	0.01	NO CUMPLE

Según la Resolución Ministerial N.° 173-2016-VIVIENDA (2016), para las redes de distribución de agua potable la velocidad mínima recomendada es de 0,60 m/s, pudiendo admitirse excepcionalmente valores no menores de 0,30 m/s; asimismo, la velocidad máxima admisible es de 3,00 m/s. Asimismo, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015) y el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA, 2004), las velocidades de flujo en las redes de distribución de agua potable deben mantenerse dentro de rangos que aseguren un adecuado desempeño hidráulico del sistema. CONAGUA establece velocidades comprendidas entre 0.30 m/s y 5.00 m/s, mientras que la Norma Boliviana NB 689 recomienda valores entre 0.30 m/s y 2.00 m/s. Estos límites permiten evitar problemas de sedimentación por bajas velocidades, así como pérdidas excesivas de energía y desgaste prematuro de las tuberías por velocidades elevadas. En función de estos criterios, se realizó la evaluación de las velocidades registradas en los diferentes tramos de la red de distribución. Los resultados de velocidad muestran que el sistema presenta un comportamiento hidráulico irregular. Se identificaron velocidades inferiores a 0.30 m/s en los tramos N-08–N-10 y N-31–N-32, lo que indica una circulación deficiente del agua y posibles problemas de sedimentación. Asimismo, se registraron velocidades superiores a 3.00 m/s en los tramos N-13–N-14 y N-22–N-23, condición que puede incrementar las pérdidas de carga y acelerar el desgaste de las tuberías.

Tabla 16

Tabla hidráulica representativa del sistema existente de perdida de carga según la norma

Longitud (m)	Nodo Inicial	Nodo Final	Perdida de carga (m)	
30.78	N-04	N-05	3.4	Moderada
49.69	N-06	N-07	4.2	Moderada
30.6	N-08	N-10	4.8	Moderada
100.28	N-13	N-14	15.8	Alta
36.06	N-17	N-18	6.5	Moderada
21.86	N-22	N-23	12.9	Alta
9.29	N-31	N-32	1.8	Baja

La Norma OS.050 no establece valores máximos permisibles de pérdida de carga por tramo de tubería. Por ello, la evaluación se realizó analizando el efecto de las pérdidas de carga sobre las presiones disponibles en la red de distribución. Los tramos N-13–N-14 y N-22–N-23 presentaron pérdidas de carga de 15.8 m y 12.9 m, respectivamente, siendo los valores

más elevados de la red analizada. Estas pérdidas de energía contribuyen a la reducción de la presión disponible en los nodos ubicados aguas abajo, lo que explica la presencia de presiones inferiores a 10 m.c.a. en algunos sectores del sistema.

Objetivo específico 2: Diseñar la sectorización hidráulica del sistema y desarrollar su modelación mediante la delimitación de sectores y la incorporación de válvulas de control

Los resultados obtenidos mediante el modelamiento hidráulico de la propuesta de sectorización muestran que la mejora del comportamiento del sistema se produjo principalmente por la división de la red en cinco sectores hidráulicos y la incorporación de elementos de control. La sectorización permitió distribuir de manera más uniforme las cargas hidráulicas, reduciendo los desequilibrios de presión ocasionados por las diferencias topográficas existentes en la localidad.

Tabla 17

Tabla hidráulica representativa del sistema modelado de perdida de cargas según la norma OS.050

Nodo	Presión modelada (m.c.a.)	NORMA OS.050
N-05	10.12	CUMPLE
N-10	10.54	CUMPLE
N-04	10.98	CUMPLE
N-06	13.64	CUMPLE
N-07	17.01	CUMPLE
N-14	16.76	CUMPLE
N-22	42.51	CUMPLE
N-17	45.88	CUMPLE
N-18	47.55	CUMPLE
N-31	46.96	CUMPLE

Los resultados muestran que todos los nodos evaluados cumplen con la Norma OS.050, registrando presiones entre 10.12 m.c.a. y 47.55 m.c.a. La diferencia de presiones está relacionada con la topografía del sistema, ya que los nodos ubicados en cotas más altas presentan menores presiones, mientras que los nodos en cotas más bajas registran mayores valores debido al efecto de la gravedad. Sin embargo, la sectorización hidráulica permitió equilibrar estas diferencias y garantizar presiones adecuadas en toda la red.

Tabla 18

Tabla hidráulica representativa del sistema modelado de velocidad según la norma RM-173-2016-VIVIENDA

Tramo	Velocidad modelada (m/s)	RM-173-2016-VIVIENDA
N-04 – N-05	0.31	CUMPLE
N-06 – N-07	0.35	CUMPLE
N-08 – N-10	0.32	CUMPLE
N-13 – N-14	0.39	CUMPLE
N-17 – N-18	0.39	CUMPLE
N-22 – N-23	0.74	CUMPLE
N-31 – N-32	0.34	CUMPLE

De acuerdo con la Resolución Ministerial N.° 173-2016-VIVIENDA, en redes de distribución de agua potable en el ámbito rural la velocidad mínima recomendada es de 0.60 m/s, no debiendo ser inferior a 0.30 m/s, mientras que la velocidad máxima admisible es de 3.0 m/s. Asimismo, cumple con las normas de CONAGUA (2015) y la Norma Boliviana NB 689 (IBNORCA, 2004), que estipulan que las velocidades de flujo deben mantenerse entre 0.30 m/s y 5.00 m/s, y entre 0.30 m/s y 2.00 m/s, respectivamente, a fin de garantizar un adecuado desempeño hidráulico del sistema.

Tabla 19

Tabla hidráulica representativa del sistema modelado de perdida de cargas

Tramo	Pérdida modelada (m)	
N-04 – N-05	0.15	Baja
N-06 – N-07	0.19	Baja
N-08 – N-10	0.14	Baja
N-13 – N-14	0.80	Baja
N-17 – N-18	0.29	Baja
N-22 – N-23	0.54	Baja
N-31 – N-32	0.01	Baja

Las pérdidas de carga obtenidas en el modelo hidráulico son bajas en todos los tramos evaluados, alcanzando valores prácticamente nulos como en el tramo N-31–N-32 (0.01 m). Desde el punto de vista técnico, la pérdida de carga representa la disipación de energía del

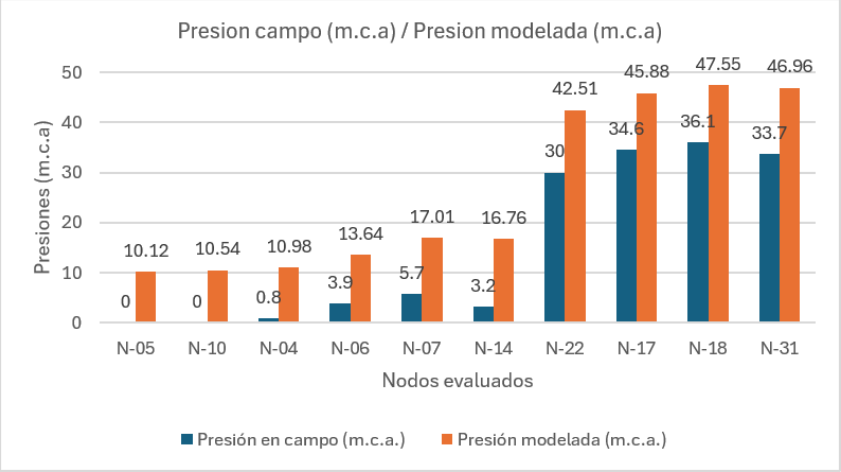
flujo debido a la fricción en las tuberías y pérdidas locales en accesorios. En ese sentido, los valores obtenidos indican una baja disipación de energía, lo que permite conservar la carga hidráulica a lo largo de la red.

Objetivo específico 3: Comparar el comportamiento hidráulico del sistema actual con el sistema propuesto mediante el análisis de presión de nodos, pérdidas de carga y velocidad de flujo.

Los resultados obtenidos en la comparación entre el sistema actual y el sistema sectorizado se dieron debido a la implementación de sectores hidráulicos y elementos de control que optimizaron el funcionamiento de la red. La mejora de las presiones se explica por una distribución más uniforme de la energía hidráulica y por la reducción de las pérdidas de carga, permitiendo que los nodos ubicados en zonas elevadas alcancen valores adecuados de presión. Asimismo, la disminución de las sobrepresiones en los sectores bajos fue posible gracias a la incorporación de válvulas reductoras de presión, las cuales permitieron controlar el exceso de energía generado por las diferencias topográficas. Finalmente, las velocidades de circulación presentaron valores más uniformes y cercanos a los criterios de diseño. En conjunto, estos resultados demuestran que la propuesta mejoró la eficiencia hidráulica del sistema y permitió una distribución más equilibrada del agua potable en el centro poblado de Caja.

Figura 9

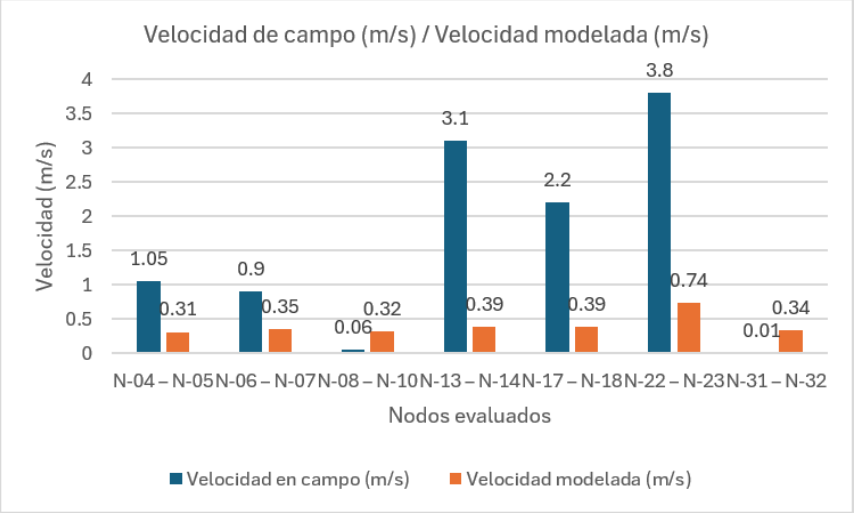
Comparación de la presión del sistema existente y la presión del sistema modelado



Las presiones obtenidas en el modelo hidráulico muestran una mejora significativa en todos los nodos evaluados, especialmente en aquellos que inicialmente presentaban valores críticos o nulos. Este incremento se debe a una mejor distribución de la carga hidráulica en la red, permitiendo que una mayor presión llegue a los puntos de consumo. Como resultado, nodos como N-05 y N-10, que registraban presiones nulas, alcanzaron valores superiores a 10 m.c.a., mientras que los demás nodos presentaron incrementos que favorecen las condiciones de abastecimiento. Estos resultados evidencian un comportamiento hidráulico más eficiente, al garantizar una distribución más uniforme de la presión en toda la red.

Figura 10

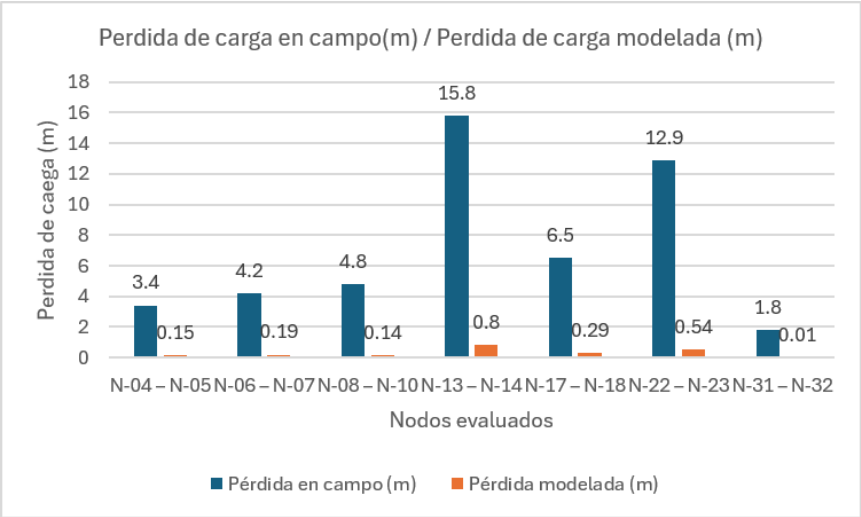
Comparación de la velocidad del sistema existente y la presión del sistema modelado



Los resultados muestran que la sectorización hidráulica permitió uniformizar las velocidades de flujo dentro de la red. Los tramos que inicialmente presentaban velocidades excesivas, como N-13–N-14 y N-22–N-23, redujeron sus valores hasta encontrarse dentro de los límites recomendados. Asimismo, los tramos con velocidades muy bajas incrementaron sus valores, favoreciendo una mejor circulación del agua. Como resultado, el cumplimiento de los criterios de velocidad pasó de 71.4 % en el sistema actual a 100 % en el sistema modelado, evidenciando una mejora significativa en el comportamiento hidráulico de la red.

Figura 11

Comparación de la perdida de carga del sistema existente y la presión del sistema modelado



Los resultados muestran una reducción significativa de las pérdidas de carga en todos los tramos evaluados. Los valores disminuyeron desde pérdidas de hasta 15.80 m en el sistema actual a un máximo de 0.80 m en el sistema modelado. Esta mejora se debe a la sectorización hidráulica, la redistribución de caudales y la incorporación de elementos de control que optimizaron las condiciones de circulación del flujo dentro de la red. La disminución de las pérdidas de energía permitió incrementar la presión disponible en los nodos y mejorar la eficiencia hidráulica del sistema de abastecimiento de agua potable.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.2. Conclusiones

- El diagnóstico del sistema de abastecimiento de agua potable evidenció que la red de distribución fue desarrollada de manera empírica, sin criterios técnicos de diseño hidráulico ni una adecuada planificación de su crecimiento. Como consecuencia, se identificaron conexiones realizadas de forma no planificada a partir de ramales existentes, generando una configuración hidráulica deficiente que ocasionó desequilibrios en las presiones, velocidades fuera de los rangos recomendados y pérdidas de carga elevadas en diversos sectores de la red. Esta situación confirmó la necesidad de implementar una propuesta de sectorización hidráulica que permita optimizar las condiciones de funcionamiento del sistema y garantizar una distribución más eficiente del agua potable.

- La recopilación y sistematización de la información del sistema de abastecimiento de agua potable del centro poblado de Caja permitió diagnosticar las principales deficiencias hidráulicas de la red existente. Los resultados evidenciaron que el sistema presentaba presiones insuficientes en las zonas de mayor elevación, registrándose valores entre 0 y 3.9 m.c.a. en varios nodos, incumpliendo la presión mínima de 10 m.c.a. establecida por la Norma OS.050.

- La evaluación hidráulica del sistema de abastecimiento de agua potable del centro poblado de Caja permitió determinar que la red de distribución existente no garantizaba condiciones adecuadas de servicio en todos los sectores de la población. Los resultados obtenidos evidenciaron que los nodos ubicados en las zonas de mayor elevación, como N-05, N-10, N-04, N-06, N-07 y N-14, presentaban presiones entre 0 y 5.7 m.c.a., incumpliendo la presión mínima de 10 m.c.a. establecida por la Norma OS.050. No obstante, con la implementación de la propuesta de sectorización hidráulica, dichos nodos alcanzaron presiones comprendidas entre 10.12 y 17.01 m.c.a., cumpliendo con los criterios normativos y mejorando significativamente las condiciones de abastecimiento. En consecuencia, se demuestra que la sectorización hidráulica permitió corregir las deficiencias de presión identificadas en la red actual, optimizando su desempeño y garantizando una distribución más adecuada del agua potable.

- El análisis hidráulico de la red existente evidenció velocidades fuera de los rangos recomendados para sistemas de distribución de agua potable, registrándose valores mínimos de 0.01 m/s y máximos de 3.80 m/s. Estas condiciones favorecían la sedimentación de partículas en los sectores con bajas velocidades y generaban pérdidas excesivas de energía en los tramos con velocidades elevadas. Como resultado de la sectorización hidráulica propuesta y la incorporación de dispositivos de control, se logró optimizar el comportamiento hidráulico de la red, obteniéndose velocidades comprendidas entre 0.31 m/s y 0.74 m/s. Estos valores cumplen con los criterios establecidos por el RNE – Norma OS.050 (2016), que recomienda velocidades entre 0.30 m/s y 3.00 m/s. Asimismo, se encuentran dentro de los rangos establecidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que considera velocidades mínimas de 0.30 m/s y máximas de 3.00 m/s, garantizando condiciones adecuadas de operación. Además, las velocidades obtenidas cumplen con los criterios de la Norma Boliviana IBNORCA, la cual establece una velocidad mínima de 0.30 m/s para asegurar la autolimpieza de la red y una velocidad máxima de 2.00 m/s.

- El análisis de pérdidas de carga demostró que la sectorización hidráulica mejoró significativamente la eficiencia de la red de distribución, reduciendo los valores observados en todos los tramos evaluados. La mayor pérdida de carga registrada en la condición actual correspondió al tramo N-13–N-14, con un valor de 15.80 m; sin embargo, tras la implementación de la sectorización hidráulica, este mismo tramo presentó una pérdida de carga de solo 0.80 m. Asimismo, el tramo N-31–N-32 registró la menor pérdida de carga en el sistema modelado, con un valor de 0.01 m. Considerando que las pérdidas de carga representan energía disipada por fricción y deben mantenerse en niveles reducidos para garantizar un funcionamiento hidráulico eficiente, los resultados obtenidos evidencian una mejora sustancial en el desempeño de la red, optimizando el aprovechamiento de la energía disponible y favoreciendo una distribución más eficiente del agua potable.

- La modelación hidráulica desarrollada mediante WaterCAD demostró que la propuesta de sectorización mejora significativamente las condiciones de presión de la red. Los nodos evaluados alcanzaron presiones comprendidas entre 10.12 m.c.a. y 47.55 m.c.a., logrando que el 100% de los nodos analizados cumplan con la Norma OS.050. Este

resultado evidencia que la redistribución de cargas hidráulicas y el control de presiones permitieron compensar los efectos negativos de la topografía, garantizando niveles de servicio adecuados en las zonas altas y evitando sobrepresiones en los sectores bajos.

- La evaluación de pérdidas de carga evidenció que el sistema existente presentaba una disipación excesiva de energía hidráulica, alcanzando valores de hasta 15.8 m en tramos críticos debido a diámetros reducidos, pendientes pronunciadas y ausencia de elementos de control. La implementación de la sectorización hidráulica permitió reducir significativamente estas pérdidas, obteniéndose valores comprendidos entre 0.01 m y 0.92 m en la mayor parte de la red, mejorando la eficiencia hidráulica y el funcionamiento operativo del sistema.

- El análisis de velocidades determinó que el sistema actual presentaba valores fuera de los rangos recomendados, registrándose velocidades mínimas de 0.01 m/s y máximas de 3.80 m/s, generando problemas de sedimentación en algunos sectores y pérdidas excesivas de energía en otros. Mediante la propuesta de sectorización hidráulica y la incorporación de dispositivos de control, se logró estabilizar las velocidades de circulación dentro de rangos más adecuados para la operación del sistema, mejorando las condiciones de transporte y distribución del agua potable.

4.3. Recomendaciones

- Se recomienda implementar la sectorización hidráulica propuesta y los dispositivos de control planteados en el modelamiento, con el fin de mantener niveles adecuados de presión en toda la red de distribución, especialmente en los sectores altos donde se identificaron condiciones deficientes de abastecimiento. Asimismo, se debe realizar un monitoreo periódico de las presiones para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

- Se recomienda ejecutar acciones de optimización en los tramos que presentan mayores pérdidas de carga, mediante la adecuada operación de válvulas de control y el mantenimiento periódico de las tuberías. Estas medidas permitirán reducir la disipación de energía, mejorar la eficiencia hidráulica y garantizar una distribución más uniforme del agua potable en la red.

- Se recomienda mantener velocidades de circulación dentro de los rangos establecidos por la normativa aplicable para sistemas de abastecimiento de agua potable, realizando inspecciones periódicas y evaluaciones hidráulicas que permitan identificar sectores con velocidades excesivas o insuficientes. De esta manera se evitarán problemas de sedimentación, desgaste prematuro de tuberías y pérdidas innecesarias de energía.

- Se recomienda que las entidades responsables de la operación del sistema realicen la actualización periódica del modelo hidráulico conforme se produzcan variaciones en la demanda, ampliaciones de la red o crecimiento poblacional, con la finalidad de evaluar oportunamente el desempeño hidráulico del sistema y garantizar el cumplimiento de los criterios técnicos de diseño establecidos por la normativa vigente.

- Se recomienda complementar el estudio con un análisis de la calidad del agua dentro de la red de distribución, evaluando parámetros como edad del agua, cloro residual y posibles zonas de estancamiento, a fin de determinar el impacto de la sectorización hidráulica sobre las condiciones sanitarias del Sistema

- Se recomienda que futuras investigaciones amplíen la recopilación de datos de campo mediante un mayor número de mediciones de presión, caudal y nivel de servicio en diferentes periodos de operación, con la finalidad de fortalecer el proceso de calibración del modelo hidráulico y mejorar la precisión de los resultados obtenidos.

5. REFERENCIAS

Alsaydalani, M. O. (2024). *Hydraulic Modelling for Leakage Reduction in Water Distribution Systems Through Pressure Control*. *P*18, e18741495289971. https://doi.org/10.2174/0118741495289971240112101323

Bishwokarma, K., Bhusal, R., Tiwari, S., Ghimire, S. & Shrestha, S. (2023). Design of gravity water supply system, phedi, tarakeshwor. Editorial IOE Pulchok Campus. https://elibrary.tucl.edu.np/handle/123456789/18639

Cueva, J., et al. (2023). *Sectorización hidráulica y análisis de redes de distribución de agua potable mediante EPANET*. Revista de Ingeniería Hidráulica: https://doi.org/10.24054/bistua.v21i2.2432

Cueva, J., Pérez, L., & Ramírez, M. (2023). Sectorización hidráulica y análisis de redes de distribución de agua potable mediante EPANET. *Revista de Ingeniería Hidráulica, 15*(2), 45–60.

Giustolisi, O., Berardi, L., Laucelli, D., & Savic, D. A. (2023). *Leakage modelling in water distribution networks: A novel framework for embedding FAVAD formulation into EPANET 2.2*. Journal of Water Resources Planning and Management, 146(6), 04020038. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001207

Guerrero Coronel, J. T. (2020). *Diseño del sistema de abastecimiento de agua y desagüe para el asentamiento Humano Asociación Familiar Esperanza del Hogar, San Juan de Lurigancho–Perú, 2020, incluyendo controladores electrónicos*. [Tesis de titulación, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. https://hdl.handle.net/20.500.12692/54435

Guillén, J. (2020). *Aplicación del software WaterCAD en el modelamiento del sistema de abastecimiento de agua potable para la comunidad de Espite, Ayacucho – 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. https://repositorio.unsch.edu.pe/

Gutti, M., & Vásquez, L. (2025). *Propuesta de sistema de agua potable y alcantarillado utilizando WaterCAD y SewerCAD para el asentamiento humano Nuevo Horizonte, Nuevo Chimbote* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]. https://repositorio.uns.edu.pe/

Hafsi, M., Triki, A., & Ksibi, M. (2026). *Hydraulic modeling of water distribution systems for leakage reduction using pressure control*. Water, 18(1), 100. https://doi.org/10.3390/w18010100

Ministerio de Servicios y Obras Públicas, Viceministerio de Servicios Básicos. (2004). *Norma Boliviana NB 689: Instalaciones de agua – Diseño para sistemas de agua potable* (2.ª revisión). Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). https://es.scribd.com/document/579185470/Norma-Nb-689-Agua-Potable

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2016). *Guía de Opciones Tecnológicas para Sistemas de Abastecimiento de Agua para Consumo Humano y Saneamiento en el Ámbito Rural* (Resolución Ministerial N.° 173-2016-VIVIENDA). Gobierno del Perú. https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/12701-173-2016-vivienda

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Norma OS.050: Redes de distribución de agua para consumo humano*. Reglamento Nacional de Edificaciones. Gobierno del Perú. https://sl1nk.com/6nrjabv

Ramos, J. (2023). *Diseño del sistema de agua potable mediante el software WaterCAD en el centro poblado de Huayllay Chico – Lircay, 2023* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. https://repositorio.unh.edu.pe/

Silva, P. (2023). *Modelamiento del sistema de agua potable del centro poblado Huangamarca mediante el programa WaterCAD, distrito y provincia de Otuzco, La Libertad – 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. https://dspace.unitru.edu.pe/

Torres, L., et al. (2024). *Detección de fugas en redes de distribución de agua potable mediante modelos hidráulicos y métodos computacionales*. Revista de Recursos Hídricos https://doi.org/10.14483/23448350.18275

Vargas, R. (2020). *Diseño de redes de agua potable y alcantarillado de la comunidad campesina La Ensenada de Collanac, distrito de Pachacamac mediante el uso de los programas WaterCAD y SewerCAD* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. https://repositorio.unfv.edu.pe/