



| POSGRADOS |

Maestría en

Sistemas Hidráulicos Urbanos de Abastecimiento y Protección

RPC-SO-24-NO.381-2022

Opción de Titulación:

Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

Tema:

Eficiencia del funcionamiento hidráulico en el sistema de bombeo de aguas residuales en la parroquia La Belleza, Cantón Francisco de Orellana, Provincia de Orellana.

Autor:

Cristhian Danilo Ruiz Sandoval

Director:

Maria Gabriela Soria Pugo

QUITO - Ecuador

2026

Autor:



Cristhian Danilo Ruiz Sandoval

Ingeniero Civil

Candidato a Magíster en Sistemas Hidráulicos Urbanos de Abastecimiento y Protección– Sede Quito.

danilors_1991@hotmail.com

Dirigido por:



Maria Gabriela Soria Pugo

Ingeniera Civil

Magister en Recursos Hídricos con Mención en Gestión y Manejo Ambiental Del Agua

magabysopugo@gmail.com

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2026 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

Cristhian Danilo Ruiz Sandoval

EFICIENCIA DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO EN EL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUAS RESIDUALES EN LA PARROQUIA LA BELLEZA, CANTÓN FRANCISCO DE ORELLANA, PROVINCIA DE ORELLANA.

DEDICATORIA

A efecto de transmitirles mis sentimientos en cuanto a lo que este trabajo representa para mí, dedico el mismo a toda mi familia, toda vez que esta es el pilar sobre el cual he sostenido mi caminar por estas etapas. A mis padres, por su amor incondicional, por sus sacrificios, y por haberme enseñado la importancia del trabajo, confrontando el esfuerzo constante para ir logrando los objetivos propuestos, de la mano de la perseverancia y la fe.

A quienes, habiendo tenido muchas dudas sobre mí, pese a los mismos siempre creyeron en mí: muchas gracias por recordarme, en cada paso y en cada momento de dificultad, que los sueños se logran construir con mucha paciencia, fe y constancia.

Este trabajo culminado es también tanto de ustedes, como mío.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, por ser el espacio donde crecí académica y personalmente, y por ofrecerme una formación integral basada en valores y en la excelencia.

Mi más sincero agradecimiento a mi tutora, cuyo acompañamiento, orientación y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo del presente trabajo de investigación. Su guía continua, sus observaciones adecuadas y su accesibilidad para ayudarme en cada momento hicieron posible la culminación de la presente tesis.

Al mismo tiempo, mi agradecimiento al Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Francisco de Orellana, por facilitarme el acceso a la información necesaria para el desarrollo de esta investigación, ya que su apertura y apoyo han sido una aportación digna de destacar para la calidad y viabilidad del presente estudio.

A mis docentes, por compartir el conocimiento con dedicación y vocación, y por motivarme a seguir creciendo, a mis compañeros y amigos, por su compañía, por los proyectos compartidos, por las experiencias que me ayudaron a enriquecer este proceso.

Por último, mi más profundo cariño a mi familia en especial a mi madre, por su amor incondicional, por su apoyo y por ser la fuerza que me ha animado a seguir adelante aun en los momentos más difíciles, este logro también es de ustedes.

Tabla de Contenido

Resumen	8
Abstract.....	9
1 Introducción.....	11
2 Determinación del Problema.....	13
2.1.1 Contextualización	13
2.2 Importancia y alcance.....	14
2.2.1 Importancia.....	14
2.2.2 Alcance.....	15
3 Objetivo	16
4 Marco teórico referencial.....	17
4.1 Gestión de Aguas Residuales, importancia ambiental y sanitaria	17
4.1.1 Aguas residuales y su impacto ambiental	17
4.1.2 Regulación y normativas para la gestión de aguas residuales en Ecuador	18
4.1.3 Infraestructura de saneamiento en zonas de topografía plana	19
4.2 Sistemas de Bombeo de Aguas Residuales	20
4.2.1 Componentes principales de un sistema de bombeo de aguas residuales	20
4.2.2 Tipos de bombas y su selección para aguas residuales.....	24
4.2.3 Selección de bombas al respecto de operación en régimen permanente y no permanente	27
4.2.4 Desafíos en sistema de bombeo.....	28
4.3 Confiabilidad en Sistemas de Bombeo	28
4.3.1 Impacto.....	28
4.4 Métodos de modelación hidráulica.....	24
4.4.1 Evaluación de Factores Operacionales en Sistemas de Bombeo	29
4.4.2 Succión neta positiva y factores que afectan la eficiencia hidráulica en el bombeo	31
4.4.3 Composición de las aguas residuales y sus efectos en la infraestructura	32
4.4.4 Temporalidad y variación del caudal.....	32
4.5 Modelación y Simulación en Sistemas de Bombeo de Aguas Residuales.....	33

4.5.1	Modelación en régimen permanente para optimización del sistema ...	33
4.5.2	Modelación en régimen no permanente e impactos en la operación de válvulas y bombas:.....	33
5	Materiales y metodología.....	36
5.1	Área de estudio.....	36
5.1.1	Delimitación territorial	36
5.2	Metodología	37
6	Resultados y discusión.....	40
6.1	Análisis de resultados	36
6.1.1	Análisis de la composición, temporalidad del caudal y la succión neta positiva en contraste con la eficiencia del sistema.	49
6.1.2	Análisis de la temporalidad del caudal	51
6.1.3	Análisis de la succión neta positiva para determinar la eficiencia del sistema de bombeo.	52
6.1.4	Análisis de las alternativas en régimen permanente en base a la selección de bombas de aguas residuales y diámetros de impulsión de las tuberías para mejorar la eficiencia del sistema.	41
	Referencias	70
	Anexos	74
	Anexo A. Informe de laboratorio.....	74

Eficiencia del funcionamiento
hidráulico en el sistema de bombeo
de
aguas residuales en la parroquia La
Belleza, Cantón Francisco de
Orellana,
Provincia de Orellana.

Autor:

CRISTHIAN DANILO RUIZ SANDOVAL

Resumen

Este estudio se establece en el área de sistemas hidráulicos urbanos de abastecimiento y protección, cuya problemática se enlista en la mejora de la eficiencia operativa del sistema de bombeo de La Belleza. que, de no abordarse de forma integral, supone una amenaza para el medio ambiente y la salud pública, ya que la alta frecuencia de lluvias y las fluctuaciones estacionales en los volúmenes de aguas residuales ejercen una presión adicional sobre el sistema. Por lo tanto, el objetivo principal fue evaluar la eficiencia hidráulica del sistema de bombeo de aguas residuales del La Belleza mediante un análisis técnico-operativo, identificar las causas de su bajo rendimiento y proponer una mejora sostenible para optimizar su funcionamiento. La investigación se llevó a cabo utilizando un enfoque cuantitativo, descriptivo y aplicado, con el fin de evaluar y optimizar el sistema de bombeo de aguas residuales mediante la recopilación, medición y análisis de datos hidráulicos, físicos y operativos. El proceso sistemático constó de cuatro pasos: primero, se caracterizó el sistema existente mediante documentación y análisis técnico, incluyendo planos, especificaciones de la bomba, tuberías y registros operativos. A continuación, se realizó trabajo de campo para determinar la calidad del agua y las condiciones operativas reales. Posteriormente, se llevó a cabo un modelado hidráulico en el software Hammer de Bentley, incluyendo caudal, pérdida de presión, NPSH y opciones de rediseño para evaluar la eficiencia y la selección de la bomba. Finalmente, se simuló los transitorios hidráulicos dentro de 4 casos fundamentales; cierre súbito de válvula de control, detención repentina de una bomba, puesta en marcha súbita de la bomba (sin variador de frecuencia) y, por último, golpe de ariete por flujo inverso. Entre otros hallazgos, se determinó que la bomba MP 3127 HT3-266 operaba muy por debajo de su eficiencia óptima, alcanzando solo el 18,15 % de su capacidad nominal; y con un caudal de entrada extremadamente bajo (0,016 L/s).

Palabras clave:

Eficiencia operativa, transitorios hidráulicos, Hammer, La Belleza

Abstract

This study is situated within the field of urban hydraulic systems for wastewater conveyance and protection, addressing the core challenge of improving the operational efficiency of the La Belleza pumping system. If not approached comprehensively, this issue represents a potential threat to both the environment and public health, as the high frequency of rainfall and seasonal fluctuations in wastewater volumes exert additional stress on the system. Therefore, the main objective was to evaluate the hydraulic efficiency of the La Belleza wastewater pumping station through a technical-operational analysis, identify the causes of its low performance, and propose a sustainable improvement to optimize its functionality. The research was conducted using a quantitative, descriptive, and applied approach to evaluate and optimize the wastewater pumping system through the collection, measurement, and analysis of hydraulic, physical, and operational data. The systematic process consisted of four stages: first, the existing system was characterized through documentation and technical analysis, including drawings, pump specifications, pipeline dimensions, and operational records. Next, fieldwork was conducted to assess water quality and real operating conditions. Subsequently, a hydraulic modeling process was carried out using Bentley's Hammer software, incorporating flow rate, head loss, NPSH, and redesign alternatives to assess efficiency and pump selection. Finally, hydraulic transients were simulated under four critical scenarios: sudden closure of a control valve, abrupt pump shutdown, sudden pump startup (without a variable-frequency drive), and water hammer due to reverse flow. Among the key findings, it was determined that the MP 3127 HT3-266 pump was operating significantly below its optimal efficiency, reaching only 18.15% of its nominal performance, and that the inflow rate was extremely low (0.016 L/s).

Keywords:

Operational efficiency, hydraulic transients, Hammer, La Belleza

1 Introducción

A nivel mundial, la gestión de aguas residuales es una prioridad ante el crecimiento poblacional y la urbanización, ya que el aumento en su generación exige sistemas más eficientes y sostenibles (Giralt, 2024). El bombeo de aguas residuales, esencial para trasladar grandes volúmenes de agua contaminada a plantas de tratamiento, enfrenta desafíos significativos relacionados con la eficiencia hidráulica (transporte de fluido y periodo de funcionamiento continuo) el consumo energético y la durabilidad de los equipos, lo que impacta la economía, el medio ambiente y aumenta la huella de carbono (Alcocer, 2019). Este contexto Lui *et al.*, (2024) subrayan la importancia de desarrollar tecnologías avanzadas que optimicen recursos, reduzcan costos operativos, emisiones, y promuevan infraestructuras de saneamiento sostenibles.

Por otro lado, en América Latina la gestión de aguas residuales enfrenta retos significativos debido a factores socioeconómicos, geográficos y políticos; pues menos del 50% de las aguas residuales reciben un tratamiento adecuado, lo que afecta tanto a la salud pública como a ecosistemas clave como la región amazónica (Quimper et al., 2023). Esto aunado a que la infraestructura de saneamiento es especialmente limitada en áreas rurales y de difícil acceso, y las deficiencias en los sistemas de bombeo y tratamiento contribuyen a la degradación de los cuerpos de agua, dificultando el cumplimiento de estas metas.

Sin embargo, aunque los gobiernos latinoamericanos han promovido iniciativas para mejorar la infraestructura de saneamiento, persisten desafíos relacionados con el financiamiento y la implementación de tecnologías sostenibles (Giralt, 2024). Los sistemas de bombeo, con su elevado consumo energético, representan un obstáculo adicional al incrementar los costos operativos y las emisiones de CO₂. En consecuencia, adaptar estos sistemas es esencial para garantizar servicios básicos, reducir impactos ambientales y proteger la biodiversidad (Calles y Gonzáles, 2011).

A nivel local, la parroquia La Belleza, ubicada en el cantón Francisco de Orellana en la provincia de Orellana (Lagos y Lascano, 2021), es un ejemplo concreto de los desafíos de la gestión de aguas residuales en las regiones amazónicas. Esta parroquia ha experimentado un rápido crecimiento poblacional y urbano, lo que ha aumentado la demanda de servicios sanitarios (Alcocer, 2019). El sistema de aguas residuales de la parroquia está compuesto por una red diseñada para recolectar exclusivamente aguas residuales, las cuales son transportadas a través de aproximadamente 15 km de tuberías hacia una estación principal de bombeo. Desde allí, el agua es impulsada mediante dos bombas centrífugas de 15 kW cada una, con una capacidad combinada de 30 L/s, hasta una planta de tratamiento ubicada a 8 km al norte de la parroquia. Este sistema atiende a una población aproximada de 3,000 habitantes, con un caudal promedio diario de 1,500 m³/día, alcanzando picos de hasta 2,000 m³/día durante la temporada lluviosa. Sin embargo, enfrenta problemas significativos, como el desgaste acelerado de las bombas debido a la abrasión causada por partículas suspendidas, obstrucciones recurrentes en los emisarios por acumulación de sólidos y un rendimiento hidráulico reducido al 65%, lo que incrementa los costos operativos y el riesgo de fallas (Gobierno Autónomo Parroquial Rural De La Belleza, 2023).

Por ende, es acertado acotar que, desde una perspectiva técnica y científica, es fundamental analizar y optimizar el sistema de bombeo de aguas residuales de La Belleza, dado el rápido crecimiento poblacional y el constante aumento de los volúmenes de aguas residuales. En este contexto, una evaluación técnica del rendimiento hidráulico y energético del sistema constituye una importante contribución científica para identificar posibles mejoras que optimizarán la eficiencia, prolongarán la vida útil de los equipos y garantizarán el funcionamiento sostenible del sistema local de aguas residuales.

De manera similar, el estudio de este sistema proporciona información técnica importante para la gestión del agua en Ecuador, ya que destaca problemas comunes en los sistemas de aguas residuales de las zonas amazónicas y rurales, como la baja eficiencia hidráulica, el alto consumo de energía y el desgaste prematuro de los equipos. En consecuencia, el análisis de estas condiciones permite desarrollar criterios técnicos para el diseño, la operación y la optimización de estaciones de bombeo en contextos similares en todo el país, contribuyendo así al desarrollo de soluciones más eficientes, sostenibles y adaptadas hidráulicamente a las condiciones hidráulicas, ecológicas y socioeconómicas del Ecuador.

Esto genera e impulsa a efectuar un análisis de la eficiencia del funcionamiento hidráulico en el sistema de bombeo de aguas residuales en la parroquia La Belleza con el fin de identificar oportunidades de mejora que permitan optimizar su desempeño, reducir consumo energético y operativo. Esto no solo beneficiará al sector, sino que también podrá ser replicado en otras comunidades del país, promoviendo así la sostenibilidad ambiental y el bienestar social del Ecuador.

2 Determinación del Problema

A lo largo del apartado anterior se definieron una serie de carencias, mismas que no sólo afectan la eficiencia operativa, sino también; representan una amenaza para el medio ambiente y la salud pública. Un sistema inadecuado puede provocar bloqueos, desbordamientos y fugas, provocando el vertido de aguas residuales no tratadas que pueden contaminar el suelo y los cuerpos de agua circundantes, provocando graves problemas de salud a la población.

Es de esta manera que la parroquia La Belleza enfrenta graves problemas en su sistema de bombeo de aguas residuales, los cuales se ven agravados por las condiciones climáticas y operativas de la zona lo que refleja un funcionamiento subóptimo con altas pérdidas energéticas. Es así que durante las épocas de lluvia, las estaciones de bombeo experimentan picos repentinos de demanda hidráulica, superando su capacidad de diseño y provocando cortes eléctricos, desbordamientos y vertidos de aguas sin tratar al medio ambiente.

Además de la sobrecarga por lluvias, el sistema sufre de obstrucciones frecuentes debido a la acumulación de sólidos y sedimentos arrastrados por las aguas residuales, lo que reduce el flujo y daña los equipos. La falta de mantenimiento preventivo y el desgaste de las bombas por cavitación empeoran su rendimiento, incrementando los costos operativos y el riesgo de colapsos parciales. Estos problemas no solo afectan la infraestructura, sino que también representan una amenaza directa para la salud pública, ya que los desbordamientos contaminan fuentes de agua cercanas, suelos y cultivos, exponiendo a la población a enfermedades gastrointestinales e infecciones; dejando esta pregunta de investigación a ser valorada y/o analizada. ¿De qué manera el desempeño hidráulico y energético del sistema de bombeo de aguas residuales de la parroquia La Belleza influye en la eficiencia operativa considerando las condiciones climáticas y operativas propias de la zona?

2.1.1 Contextualización

En la parroquia La Belleza, ubicada en el cantón Francisco de Orellana, provincia de Orellana, las condiciones geográficas y climáticas presentan desafíos caracterizada por una topografía plana y niveles de descarga limitados, ya que no tiene pendientes que permitan el movimiento por gravedad de las aguas residuales hacia un sitio de tratamiento adecuado (GAD Parroquial, 2024). Por lo tanto, es necesaria la instalación de estaciones de bombeo para transportar las aguas residuales a plantas de tratamiento antes de que fluyan a los afluentes.

En La Belleza, los sistemas de bombeo manejan no sólo agua, sino también una variedad de desechos sólidos y materiales que complican su operación. Estos sistemas deben tratar la mezcla de materia orgánica, sólidos, grasas, aceites y otros desechos que se encuentran en las aguas residuales (Gobierno Autonomo Parroquial Rural De La Belleza, 2023). La variabilidad en la cantidad y composición de estos materiales está influenciada por factores como el origen de las aguas residuales y las prácticas de consumo de agua de la comunidad, tal es el caso de los desechos de hogares, industrias y actividades agrícolas pueden contener partículas de diferentes tamaños y densidades que

obstruyen las bombas y dañan los equipos (Aguilar, 2020). Esta acumulación de residuos sólidos y orgánicos en tuberías y bombas provoca obstrucciones que reducen la capacidad operativa del sistema (Pedreira, 2023).

De acuerdo con Vega (2022) las grasas en las aguas residuales también plantean un desafío operativo. Estos elementos se depositan en las paredes de las tuberías y las bombas, formando una capa que restringe el flujo y reduce la capacidad de bombeo. Esta acumulación aumenta la frecuencia de las tareas de limpieza y mantenimiento, lo que aumenta los costos operativos y el tiempo de inactividad del sistema. Sin mencionar el hecho que esta tipología de grasas puede congelarse en las zonas frías del equipo, bloqueando el sistema e impidiendo un funcionamiento óptimo.

De igual manera, uno de los problemas más graves asociados con los sistemas de bombeo para alcantarillado combinado es el desbordamiento, que es particularmente probable que ocurra durante períodos de alta demanda o en caso de falla del sistema. Las tuberías bloqueadas y el desgaste de los equipos pueden hacer que las aguas residuales se acumulen y eventualmente fluyan al medio ambiente (Benavides et al., 2023). Estos desbordes pueden provocar vertidos de aguas residuales no tratadas, que contaminan el suelo y las masas de agua circundantes. La descarga directa de aguas residuales no tratadas no sólo afecta la calidad del agua, sino que también plantea un riesgo importante para la salud pública, especialmente en las comunidades vecinas que dependen de fuentes naturales de agua (Pedreira, 2023).

El caso particular de la Parroquia La Belleza muestra que existe una necesidad urgente de la eficiencia del sistema de bombeo (Gobierno Autonomo Parroquial Rural De La Belleza, 2023). En este caso, la alta frecuencia de las precipitaciones y las fluctuaciones estacionales en el volumen de aguas residuales ejercen una presión adicional sobre el sistema de bombeo. Las estaciones de bombeo enfrentan picos de demanda durante períodos de fuertes lluvias, lo que aumenta la probabilidad de cortes y desbordamientos (GAD Parroquial, 2024).

Es por estos motivos que, para abordar eficazmente estos problemas, es necesario realizar un análisis detallado de los factores que afectan la confiabilidad del sistema de bombeo de La Belleza. Esto incluye evaluar el estado actual de los equipos, identificar puntos críticos de acumulación de escombros y mejorar las prácticas de mantenimiento. La instalación de sistemas de monitoreo en tiempo real puede ayudar a predecir fallas y prevenirlas antes de que se conviertan en problemas graves, reduciendo el riesgo de contaminación y protegiendo la salud de la comunidad local y el medio ambiente.

2.2 Importancia y alcance

2.2.1 Importancia científica

La importancia científica de esta investigación radica en generar conocimiento aplicado sobre el comportamiento hidráulico y operativo de los sistemas de bombeo de aguas residuales en zonas con acceso limitado al drenaje gravitacional, como el municipio de La Belleza. Este estudio utiliza modelos de estado estacionario y transitorio para analizar la eficiencia hidráulica, las condiciones de succión, la acumulación de sólidos y las variables clave relacionadas con el sistema operativo de la bomba. Esto proporciona una comprensión más profunda de los factores que afectan el rendimiento y la confiabilidad

del sistema de bombeo y fortalece el marco teórico y metodológico de la ingeniería hidráulica utilizada en la gestión de aguas residuales.

2.2.2 Importancia práctica

Desde una perspectiva práctica, esta investigación proporciona soluciones técnicas para mejorar el diseño, la operación y el mantenimiento del sistema de bombeo de aguas residuales en la zona de La Belleza, optimizando el transporte de aguas residuales y reduciendo el riesgo de desbordamientos y contaminación. El análisis de la selección de equipos, las disposiciones operativas y las condiciones hidráulicas ayudará a desarrollar propuestas de optimización que reduzcan los costos operativos, el consumo de energía y el desgaste de los equipos. Por lo tanto, los resultados del estudio promoverán la sostenibilidad operativa y financiera del sistema, a la vez que protegerán la salud pública y los recursos hídricos locales.

2.2.3 Alcance espacial, temporal y técnico

El alcance de esta investigación se centra en el sistema de bombeo de aguas residuales de la zona de La Belleza; sin embargo, los resultados y métodos desarrollados pueden aplicarse a otras comunidades con características geográficas y operativas similares, especialmente aquellas ubicadas en topografías planas o amazónicas. En términos temporales, este estudio examina el comportamiento actual del sistema, considerando las variaciones estacionales del caudal. Finalmente, desde una perspectiva técnica, su alcance incluye un diagnóstico del sistema existente, la cuantificación de sus deficiencias hidráulicas, la modelización en estado estacionario y no estacionario, y el desarrollo de alternativas de optimización.

2.2.4 Limitaciones

Las principales limitaciones evidenciadas en el desarrollo se relacionan con la disponibilidad y calidad de información técnica obsoleta relacionada con el sistema, como registros de caudal, fallas operativas y consumo energético. Asimismo, el estudio se limita a un análisis hidráulico y operativo del sistema de bombeo y no profundiza en los aspectos económicos o sociales que impactan la gestión del saneamiento a gran escala. Además, los casos escenario se desarrollaron para las condiciones técnicas y operativas específicas de la zona de La Belleza, por lo que su aplicación a otras zonas requerirá adaptaciones a las condiciones locales.

3 Objetivo

- Evaluar la eficiencia hidráulica del sistema de bombeo de aguas residuales en la parroquia La Belleza, mediante análisis técnico-operativos que identifiquen las causas de su bajo rendimiento con el fin de proponer mejoras sustentables que optimicen su funcionamiento, reduzcan riesgos ambientales y sirvan como modelo replicable para sistemas similares en la provincia de Orellana.

Objetivos específicos

- Identificar la composición, temporalidad del caudal y la succión neta positiva para determinar la eficiencia del sistema de bombeo.
- Modelar alternativas en régimen permanente en base a la selección de bombas de aguas residuales y diámetros de impulsión de las tuberías para mejorar la eficiencia del sistema.
- Modelar en régimen no permanente las alternativas planteadas incluyendo operación de válvulas y arranques del sistema de bombeo de aguas residuales.

4 Marco teórico referencial

4.1 Gestión de Aguas Residuales, importancia ambiental y sanitaria

4.1.1 Aguas residuales y su impacto ambiental

Las aguas residuales son una combinación de desechos líquidos y sólidos de actividades domésticas, industriales, comerciales y agrícolas, vertidos a sistemas de alcantarillado y transportados a instalaciones de tratamiento o volcados directamente a cuerpos de agua. En su composición, estas aguas contienen sustancias en suspensión, materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), patógenos (bacterias, virus y parásitos), metales pesados y compuestos químicos, todos los cuales representan un notorio riesgo ambiental si no se realiza su adecuada gestión (Alfárez y Nieves, 2019).

Por otro lado, al respecto del impacto de las aguas residuales, estas al no ser tratadas suponen una grave amenaza para el medio ambiente, principalmente debido a su capacidad de contaminar masas de agua como ríos, lagos y mares. Cuando estas aguas se vierten directamente en estos cuerpos de agua se produce un fenómeno llamado eutrofización (Montero et al., 2020), en el que el exceso de nutrientes estimula el crecimiento descontrolado de algas y plantas acuáticas. Este crecimiento bloquea la luz solar y reduce los niveles de oxígeno disuelto en el agua, creando condiciones desfavorables para los peces y otros organismos acuáticos (Lagos y Lascano, 2021). Con el tiempo, este agotamiento de oxígeno provoca desapariciones masivas de especies y una pérdida significativa de biodiversidad del ecosistema acuático, comprometiendo su salud y su capacidad de autorregulación (Alcocer, 2019).

Otro impacto ambiental significativo es la contaminación del suelo y las aguas subterráneas, que constituyen una fuente de agua potable para muchas zonas. Cuando las aguas residuales se filtran en el suelo, los patógenos, los metales pesados y los compuestos orgánicos persistentes presentes en ellas pueden ingresar a los acuíferos (Guerra y Logroño, 2019).

A la par se puede acotar que las aguas residuales también contribuyen al cambio climático a través de las emisiones de gases de efecto invernadero. La descomposición de la materia orgánica en las aguas residuales libera gases como metano y dióxido de carbono, ambos relacionados con el calentamiento global. Por ende, la falta de tratamientos adecuados para reducir o capturar estos gases podría aumentar sus concentraciones en la atmósfera, exacerbando el cambio climático y sus efectos sobre el planeta y sus habitantes (Cedeño, 2020).

Por último, las aguas residuales no tratadas también son un vector de transmisión de enfermedades. Los patógenos y bacterias presentes en estas aguas, al entrar en contacto con el agua potable o el suelo, pueden provocar la propagación de enfermedades infecciosas como el cólera, la hepatitis y la disentería, especialmente en comunidades donde el saneamiento es inadecuado (Martínez et al., 2019). Un resumen de esta información se enlista en la figura 1 a continuación:

Figura 4.1. Impacto ambiental de aguas residuales



Nota: La información destaca los 4 puntos esenciales en los cuales se puede producir contaminación al respecto de aguas residuales. Elaborador: Autor.

4.1.2 Regulación y normativas para la gestión de aguas residuales en Ecuador

En Ecuador la gestión de aguas residuales es un tema prioritario por su impacto en la salud pública, el medio ambiente y el desarrollo sostenible. La legislación ecuatoriana establece normas específicas para el tratamiento, disposición y reúso de aguas residuales a través de diversos instrumentos legales y regulatorios. Algunas de ellas se enlistan a continuación:

- **Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA)**

Esta ley, aprobada en 2014, establece principios y disposiciones generales relacionados con el uso y gestión de los recursos hídricos en el Ecuador. La LORHUyA define la responsabilidad del Estado en materia de gestión del agua y saneamiento, y prohíbe explícitamente la descarga de aguas residuales no tratadas a cuerpos de agua (Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA), 2014).

- **Reglamento para el Control de la Contaminación de los Recursos Hídricos (RCCRH)**

Este reglamento establece límites permisibles para los contaminantes presentes en las aguas residuales vertidas a cuerpos de agua naturales. También define requisitos para el control y seguimiento de los vertidos de aguas residuales y prevé sanciones en caso de incumplimiento de la normativa ambiental (Reglamento para el Control de la Contaminación de los Recursos Hídricos (RCCRH), 2015).

- **Normativa de calidad de aguas y control de vertidos**

El Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) regula la calidad de las aguas residuales y fija las normas de funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), 2019). Esta regulación permite garantizar que las aguas residuales tratadas cumplan con los estándares requeridos antes de que puedan ser descargadas o reutilizadas.

- **Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT)**

Los municipios ecuatorianos necesitan integrar el saneamiento de aguas residuales en su PDOT, incluido el desarrollo de infraestructura de tratamiento y bombeo, especialmente en áreas donde las condiciones geográficas complican la descarga y el tratamiento por gravedad (Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT), 2018). Sin embargo, aunque Ecuador cuenta con un marco legal, los desafíos en su implementación incluyen la falta de recursos técnicos y financieros, especialmente en regiones rurales y amazónicas. Esto limita la capacidad de muchas localidades para construir y mantener sistemas de tratamiento de aguas residuales adecuados, lo cual a su vez contribuye a problemas de salud y contaminación ambiental.

4.1.3 Infraestructura de saneamiento en zonas de topografía plana

De acuerdo con Benavides *et al.*, (2023) en áreas con terreno plano, como la parroquia de La Belleza en la Amazonía ecuatoriana, la infraestructura de saneamiento enfrenta desafíos específicos y significativos. En estas zonas, la falta de pendiente natural impide que las aguas residuales fluyan por gravedad, característica que facilita el transporte a plantas de tratamiento en otras zonas. Por lo tanto, la instalación de un sistema de bombeo se convierte en una condición necesaria para el saneamiento. Al permitir la recogida de aguas residuales, estas infraestructuras no sólo contribuyen al saneamiento básico, sino que también protegen la salud pública evitando el estancamiento y la acumulación de contaminantes en zonas pobladas (Cedeño, 2020).

Las estaciones de bombeo desempeñan un papel de alta estima en el transporte de aguas residuales en zonas llanas. En ausencia de una infraestructura adecuada, las aguas residuales pueden estancarse en su punto de origen, provocando problemas de salud y saneamiento, así como olores desagradables, que pueden afectar la calidad de vida de los residentes (Sánchez, 2020). Además, las aguas residuales estancadas pueden atraer insectos y otros vectores de enfermedades, lo que aumenta los riesgos para la salud pública. Las estaciones de bombeo ayudan a garantizar un flujo continuo y controlado de aguas residuales hacia las plantas de tratamiento, lo que reduce estos problemas.

Otro beneficio de la infraestructura de saneamiento es la prevención de la contaminación y los desbordamientos (Benavides *et al.*, 2023). En la Amazonía ecuatoriana, las comunidades suelen vivir cerca de cuerpos de agua, que también son fuentes de agua potable. Los sistemas de bombeo evitan que las aguas residuales fluyan y se propaguen sin tratamiento, evitando así la contaminación de estas fuentes. En ausencia de una infraestructura adecuada, el riesgo de desbordamiento aumenta significativamente, aumentando el potencial de contaminación cruzada entre aguas residuales y fuentes de agua limpia, lo que puede causar graves problemas de salud pública e impactar a las comunidades de la zona (Guerra y Logroño, 2019).

Además de proteger el medio ambiente, los sistemas de bombeo de aguas residuales también desempeñan un papel fundamental en la reducción de los riesgos para la salud

pública. El transporte controlado de aguas residuales a las instalaciones de tratamiento garantiza la eliminación de patógenos y contaminantes antes de que sean liberados al medio ambiente. Esto ayuda a reducir la carga de enfermedades infecciosas, mejorando así la salud y el bienestar de las comunidades circundantes. Este proceso de eliminación de patógenos y compuestos tóxicos es esencial para reducir las enfermedades relacionadas con el contacto con agua contaminada, especialmente en áreas vulnerables donde el acceso a un tratamiento eficaz de aguas residuales es limitado (Alfárez y Nieves, 2019).

La infraestructura de saneamiento también contribuye a la conservación de ecosistemas locales en áreas sensibles ricas en biodiversidad, como la Amazonía ecuatoriana. Una buena gestión de las aguas residuales protege los ríos, lagos y otros cuerpos de agua de la región, evitando su contaminación y previniendo daños irreparables a los ecosistemas acuáticos (Martínez N. , 2021). Esto es especialmente notorio en el Amazonas, una región conocida por su rica biodiversidad y por albergar especies de flora y fauna que dependen de un ambiente limpio y saludable. Al evitar la acumulación y dispersión incontrolada de contaminantes, se preserva el equilibrio ecológico de estos delicados ecosistemas (Aguilar, 2020).

En última instancia, esta infraestructura contribuye significativamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. El Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, que proporciona acceso a agua potable y saneamiento, y el Objetivo de Desarrollo Sostenible 3, que se centra en la salud y el bienestar, se benefician de la construcción y el mantenimiento de estaciones de bombeo en la Amazonía ecuatoriana. Estas instalaciones garantizan un saneamiento adecuado y la reducción de la contaminación ambiental, lo que promueve el desarrollo sostenible a nivel local y regional, mejora la calidad de vida de las comunidades y protege el medio ambiente para las generaciones futuras (Cedeño, 2020).

4.2 Sistemas de Bombeo de Aguas Residuales

Castro (2021) denota que los sistemas de bombeo de aguas residuales son necesarios para transportar desde áreas bajas o lugares donde no pueden ser liberadas por gravedad hasta plantas de tratamiento o puntos de descarga. Estos sistemas desempeñan un papel vital en la gestión segura de las aguas residuales, la protección ambiental y la salud pública, y son una parte fundamental de la infraestructura urbana y rural (Calles y Gonzáles, 2011).



4.2.1 Componentes principales de un sistema de bombeo de aguas residuales

De acuerdo con Montero *et al.*, (2020) un sistema de bombeo de aguas residuales cuenta con varios componentes esenciales que garantizan el correcto transporte y manejo de estas aguas:

1. **Estación de Bombeo:** Es el lugar donde se alojan los equipos de bombeo y los controles eléctricos. La estación de bombeo debe ser diseñada para soportar las cargas hidráulicas y proteger los equipos de cualquier daño externo.
2. **Bomba de Aguas Residuales:** La bomba es el corazón del sistema, encargada de impulsar el agua residual a través de las tuberías hasta el punto de descarga o tratamiento.

3. **Tubos de Succión y Descarga:** Estas tuberías conectan la bomba con el punto de recolección y descarga. Las tuberías deben tener un diámetro adecuado para evitar atascos y permitir un flujo constante.
4. **Válvulas:** Las válvulas de retención, de compuerta y de liberación de aire controlan el flujo y previenen el retroceso de aguas, lo cual protege las bombas y el sistema en general.
5. **Interruptores de Flotador o Sensores de Nivel:** Estos dispositivos miden el nivel del agua en el pozo de bombeo. Cuando el nivel sube o baja a un valor específico, activan o desactivan la bomba.
6. **Panel de Control:** Es el sistema de gestión que regula el encendido y apagado de las bombas según los niveles de agua y otros parámetros, protegiendo así el sistema de fallos.
7. **Sistema de Ventilación:** La ventilación permite la salida de gases que se acumulan en el sistema, evitando la corrosión y acumulación de gases tóxicos o explosivos.
8. **Generador de Respaldo:** Para sistemas críticos, los generadores garantizan que las bombas sigan funcionando en caso de cortes eléctricos, evitando desbordamientos y problemas sanitarios.
9. **Sistema de cribado o trituración de desechos sólidos:** Este sistema tiene como propósito principal eliminar sólidos gruesos y residuos voluminosos antes de su ingreso al sistema de bombeo, protegiendo las bombas y tuberías de obstrucciones y daños. Entre sus ventajas destacan la reducción del mantenimiento, el aumento de la vida útil de las bombas y la mejora general del sistema.
10. **Sistema de pretratamiento Adicional:** Estos son tanques de sedimentación que se implementan según el origen de las aguas residuales para separar partículas pesadas antes del bombeo. Su propósito es prevenir acumulaciones y sedimentación dentro de las tuberías, protegiendo el sistema y facilitando su mantenimiento.
11. **Sistemas de Neutralización de Olores:** Los sistemas de neutralización de olores, como la neutralización química o los biofiltros, complementan el tratamiento biológico capturando compuestos malolientes. Su propósito es mejorar la aceptación ambiental del sistema y evitar molestias a las comunidades cercanas.

Tabla 4.1. Componentes empleados en un sistema de bombeo

Estación de Bombeo	Bomba de Aguas Residuales
	

Tubos de Succión y Descarga



Válvulas



**Interruptores de Flotador o
Sensores de Nivel**



Sistema de Ventilación



Generador de Respaldo



**Sistema de cribado o trituración de desechos
sólidos**



Nota: Los elementos mostrados corresponden a un sistema de bombeo. Tomado de: (Montero et al., 2020)

4.2.2 Elementos del sistema de bombeo de La Belleza

La estación de bombeo de la Belleza constituye un componente esencial en los sistemas de alcantarillado del sector, ya que permite el transporte del caudal desde zonas de menor cota hacia puntos más elevados o hacia las plantas de tratamiento. Por ende, dispone de varios componentes, mismo que fueron detallado en la tabla 4.1. Sin embargo, una explicación profunda de cada uno se destaca a continuación:

Estación de Bombeo

Una estación de bombeo es una instalación esencial dentro de los sistemas de alcantarillado, cuya función principal es elevar el caudal de aguas servidas desde niveles bajos hacia puntos de descarga o tratamiento más elevados. Su diseño permite mantener un flujo continuo y eficiente, evitando acumulaciones y garantizando el funcionamiento hidráulico del sistema. Estas estaciones están compuestas por diversos equipos y componentes que trabajan en conjunto para asegurar la operación confiable y segura del proceso (Benavides et al., 2023).

Bomba de Aguas Residuales

Estas son el corazón de la estación de bombeo, encargadas de impulsar el fluido hacia la línea de descarga o hacia una planta de tratamiento. Están diseñadas para manejar líquidos con alto contenido de sólidos y materiales abrasivos, por lo que suelen ser de tipo centrífugo o sumergible. Su correcta selección depende del caudal, altura de impulsión y características del fluido, buscando siempre una operación eficiente y de bajo mantenimiento (Giralt, 2024).

Tubos de Succión y Descarga

Los tubos de succión y descarga conforman el sistema de conducción del flujo dentro de la estación. La tubería de succión permite la entrada del agua residual hacia la bomba, mientras que la de descarga transporta el fluido bombeado hacia el sistema de alcantarillado o la planta de tratamiento. Estos conductos deben diseñarse con materiales resistentes a la corrosión y al desgaste, y con un dimensionamiento adecuado para minimizar pérdidas de carga y evitar cavitación (Granda y Chica, 2023).

Válvulas

Estas desempeñan un papel fundamental en el control del flujo dentro de la estación de bombeo. Se utilizan para regular, aislar o evitar el retorno del agua en la línea de impulsión. Entre las más comunes se encuentran las válvulas de compuerta, retención y de cierre rápido. Su correcta disposición facilita el mantenimiento y la operación segura del sistema, protegiendo los equipos de sobrepresiones o contraflujos (Guerra y Logroño, 2019).

Interruptores de Flotador o Sensores de Nivel

Los interruptores de flotador o sensores de nivel automatizan el arranque y parada de las bombas en función del volumen de agua almacenado en el pozo de bombeo. Estos dispositivos garantizan una operación eficiente, evitando tanto el funcionamiento en seco como el desbordamiento del sistema. Su calibración y mantenimiento son esenciales para prevenir fallos operativos y asegurar la continuidad del servicio (Granda y Chica, 2023).

Sistema de Ventilación

El sistema de ventilación tiene como objetivo eliminar los gases acumulados en la estación, producto de la descomposición de materia orgánica en las aguas residuales. Una ventilación adecuada previene la corrosión de los equipos, reduce riesgos de explosión y mejora las condiciones de seguridad y salubridad del entorno. Puede incluir

extractores, ductos de ventilación y filtros de carbón activado para neutralizar olores (Guerra y Logroño, 2019).

Generador de Respaldo

El generador de respaldo proporciona energía eléctrica en caso de fallos en la red principal, asegurando el funcionamiento continuo de las bombas y sistemas de control. Este equipo es indispensable para evitar el colapso del sistema durante cortes prolongados de energía, especialmente en zonas críticas (Sánchez , 2020).

Sistema de cribado o trituración de desechos sólidos

El sistema de cribado o trituración tiene la función de eliminar o reducir el tamaño de los sólidos presentes en las aguas residuales antes de que ingresen a las bombas. Esto evita obstrucciones, daños mecánicos y disminuye la necesidad de mantenimiento. Es de esta manera que, dependiendo del diseño de la estación, puede implementarse un tamiz, una reja o un triturador mecánico, garantizando la protección del equipo y la eficiencia del proceso de bombeo (Jimenes , 2019).

4.2.3 Tipos de bombas y su selección para aguas residuales

La elección de las bombas de aguas residuales depende del caudal, la altura de bombeo y las características de los sólidos presentes en las aguas residuales. Existen varios tipos de bombas comunes que se pueden utilizar en este tipo de aplicaciones:

- Bombas centrífugas: son las más comunes en aplicaciones de tratamiento de aguas residuales. Utilizan una hélice para generar energía cinética en el agua y están diseñados para tratar aguas residuales con bajo contenido de sólidos.
- Bombas de tornillo: Son adecuadas para el tratamiento de aguas residuales con alto contenido de sólidos y lodos espesos. Su diseño evita que sólidos obstruyan el sistema y reduce el desgaste de las piezas internas.
- Bombas de diafragma: funcionan a través de una membrana que empuja el agua y se usan comúnmente para aguas residuales con alto contenido de sólidos y fibras, aunque son menos comunes en aplicaciones de mayor volumen.
- Bombas de desplazamiento positivo: Se utilizan cuando se requiere un caudal constante a pesar de las variaciones de presión. Es menos probable que estas bombas se obstruyan y son ideales para líquidos viscosos o de alta densidad.
- Bomba Sumergible: Estas bombas están diseñadas para instalarse dentro de la cámara de purificación y ofrecen mayor flexibilidad en instalación y operación. Son ideales para sistemas donde el espacio es limitado (Payano, 2023).

Por otro lado, al momento seleccionar una bomba de aguas residuales requiere la evaluación de muchos factores técnicos y operativos para garantizar la durabilidad y seguridad del sistema de bombeo. Una selección incorrecta puede provocar problemas de rendimiento, elevados costes operativos y de mantenimiento o incluso daños a todo el sistema. A continuación, se presenta un desarrollo más detallado sobre aspectos clave de la selección de bombas de aguas residuales:

Criterios de Selección de Bombas para Aguas Residuales

- **Caudal (Q)**

El caudal es la cantidad de agua que la bomba debe mover en un tiempo determinado, generalmente medido en litros por segundo (l/s) o metros cúbicos por hora (m³/h). Este valor depende de la cantidad de aguas residuales generadas y es fundamental para determinar la capacidad de la bomba. El caudal debe calcularse en función del volumen de aguas residuales producido en el sistema y puede variar en función de la hora del día,

la estación del año, e incluso del tipo de instalaciones o industrias conectadas al sistema (Herrera y Martínez, 2024).

- **Altura de Elevación (H)**

La altura de elevación o altura total de bombeo es la suma de la altura estática (diferencia de altura entre el punto de succión y descarga) y la pérdida de carga (resistencia de la tubería, válvulas y accesorios al flujo de agua). La altura de elevación requerida determina la potencia necesaria de la bomba para vencer la presión en el sistema. Esta variable se calcula considerando factores como la longitud, el diámetro y la rugosidad de las tuberías, así como los accesorios instalados (Cedeño, 2020).

- **Tamaño y Tipo de Sólidos en Suspensión**

Las aguas residuales contienen sólidos de diferentes tamaños y formas, como arena, trozos de basura, materiales orgánicos e incluso fibras largas. El tamaño y tipo de sólidos en suspensión afecta directamente el tipo de impulsor y el diseño de la bomba, ya que algunos modelos pueden manejar sólidos de mayor tamaño sin obstrucciones. En sistemas donde los sólidos son comunes, se utilizan bombas con impulsores abiertos, semiabiertos o diseñados para el paso libre de sólidos (Giralt, 2024).

- **Viscosidad y Densidad del Fluido**

Las aguas residuales no son uniformes y pueden tener variaciones en viscosidad y densidad, especialmente cuando contienen lodo, grasa o productos químicos. Estos factores afectan el rendimiento de la bomba, y se debe considerar tanto la densidad como la viscosidad del fluido a bombear para determinar el tipo y potencia de la bomba adecuada (Cedeño, 2020).

- **Tipo de Impulsor**

El impulsor es el componente clave que proporciona energía cinética al agua en la bomba. Los impulsores más comunes para aguas residuales incluyen:

Impulsores Abiertos: Son adecuados para manejar sólidos, pero pueden desgastarse rápidamente y requieren mantenimiento frecuente.

Impulsores Semiabiertos: Tienen una estructura parcialmente abierta que permite el paso de sólidos medianos.

Impulsores Cerrados: Son ideales para aplicaciones de esfuerzo medio, pero no se recomiendan para aguas con sólidos grandes (Herrera y Martínez, 2024).

4.2.4 Aspectos comparativos entre distintas tipologías de bombas

Desde la perspectiva de la ingeniería hidráulica, la selección, operación y mantenimiento adecuados de las bombas inciden directamente en la eficiencia energética, la fiabilidad operativa y la sostenibilidad de los sistemas; por ende, conocer criterios para la clasificación de bombas, rangos de eficiencia, límites operativos recomendados y condiciones óptimas de operación es fundamental.

Tabla 4.2. Aspectos comparativos entre tipologías de bomba

Tipo de bomba	Principio de funcionamiento	Rango de	Rango típico de	Rango de	Altura manométrica	Límites operativos recomendados (HI)	Aplicación en aguas

		eficiencia (%)	caudal			residuales
Centrífuga radial	Conversión de energía cinética en presión mediante impulsor radial	65 – 90	Medio – alto	Baja – media	Operar entre 70–120 % del BEP; evitar <50 % del BEP	Muy utilizada en estaciones de bombeo; adecuada para caudales variables
Centrífuga de flujo mixto	Combinación de impulsión radial y axial	70 – 88	Alto	Baja	Mantener operación cercana al BEP; sensible a variaciones bruscas de caudal	Adecuada para grandes caudales con bajo desnivel
Centrífuga axial	Impulsión predominantemente axial	65 – 85	Muy alto	Muy baja	No operar fuera del rango de diseño; riesgo de vibraciones	Usada en sistemas de drenaje y alivio
Desplazamiento positivo (tornillo, pistón)	Desplazamiento de un volumen fijo por ciclo	60 – 85	Bajo – medio	Alta	Requiere control de presión; sensible a sólidos	Aplicaciones específicas con caudal

								controla do
								Común en
Sumergible para aguas residuales	Bomba centrífuga integrada al motor, operación sumergida	55 – 80	Bajo – medi o	Media			Control término y protección contra sólidos	sistemas compact os y estacion es pequeña s Ideal
Bombas para sólidos (non-clog)	Diseño especial del impulsor para paso de sólidos	50 – 75	Med io	Baja media	–		Evitar operación prolongada fuera del BEP	para aguas residuale s con alta carga de sólidos

Nota: Los elementos mostrados corresponden varias tipologías de bomba cada una de ellas con su nivel de eficiencia, caudal y altura. Tomado de: (Zhilong , 2019) (Karassik et al., 2019)

4.2.5 Selección de bombas al respecto de operación en régimen permanente y no permanente

La selección de la bomba según las condiciones de operación debe considerar de régimen operativo al cual se someterá la bomba. Existen dos regímenes principales:

- **Operación Continua (Régimen Permanente)** En operaciones continuas, la bomba se mantiene activa para manejar flujos constantes, ideales para instalaciones donde el volumen de aguas residuales es uniforme, como en plantas de tratamiento. Para este régimen, las bombas deben ser seleccionadas para soportar largos períodos de operación sin sobrecalentarse ni desgastarse rápidamente. Las bombas centrífugas suelen ser la elección adecuada para esta modalidad, ya que permiten un flujo constante y un diseño que facilita el mantenimiento periódico (Herrera y Martínez, 2024).
- **Operación por Ciclos (Régimen No Permanente)** En un régimen no permanente, la bomba se activa y desactiva según el nivel de agua en el pozo de bombeo. Este

régimen es más común en estaciones de bombeo donde el flujo de aguas residuales es variable. Para estos casos, se prefieren bombas que soporten ciclos de encendido y apagado frecuentes, con sensores de nivel o interruptores de flotador que las activen automáticamente. Las bombas sumergibles suelen ser preferidas en esta configuración, ya que están diseñadas para funcionar en ambientes húmedos y soportar arranques frecuentes (Ramos, 2023).

4.2.6 Desafíos en sistema de bombeo

Por otro lado, dentro de este contexto es necesario connotar que existen una serie de desafíos comunes en sistemas de bombeo de aguas residuales. De acuerdo con Grande y Chica (2023) los problemas más comunes son:

- Bloqueos y obstrucciones: Los sólidos grandes, los materiales fibrosos y los desechos pueden bloquear bombas y tuberías. Este es uno de los problemas más comunes que se pueden solucionar utilizando una criba o una amoladora.
- Corrosión y desgaste: Las aguas residuales contienen sustancias químicas que provocan corrosión, lo que afecta la longevidad de los componentes metálicos. Se deben utilizar materiales resistentes a la corrosión como acero inoxidable o revestimientos especiales.
- Acumulación de gases: Cuando la materia orgánica se descompone en las aguas residuales, se producen gases como el sulfuro de hidrógeno, que son venenosos y corrosivos. La falta de una ventilación adecuada puede provocar la acumulación de estos gases, lo que puede afectar negativamente a la seguridad del sistema y de los componentes.
- Eficiencia energética: El bombeo continuo o el uso de bombas no optimizadas aumentan los costes energéticos.
- Mantenimiento frecuente: Las bombas de aguas residuales requieren un mantenimiento frecuente debido al desgaste del concreto y los abrasivos. La limpieza y el mantenimiento periódicos son imperativos para evitar apagados inesperados del sistema.
- Mal funcionamiento del sistema de control de nivel: Los sensores y flotadores que controlan el nivel pueden fallar por acumulación de grasa o sólidos. Estas unidades deben limpiarse y revisarse con frecuencia para evitar el sobrellenado o el mal funcionamiento de la bomba.
- Sobrecarga durante la lluvia: En sistemas combinados (aguas residuales y aguas pluviales), la lluvia puede aumentar el caudal y provocar sobrecarga, sobrellenado y fallos de la bomba. En consecuencia, tener un sistema de respaldo y permitir un mayor flujo durante los períodos de lluvia.

4.3 Confiabilidad en Sistemas de Bombeo

4.3.1 Impacto

Un sistema confiable es aquel que mantiene un rendimiento estable durante largos períodos de tiempo, minimizando las interrupciones que podrían afectar los procesos operativos o la prestación de servicios críticos como agua potable, riego o tratamiento de aguas residuales (Calles y Gonzáles, 2011). La terminología eficiencia radica en su capacidad para prevenir fallas inesperadas que generan no sólo costos económicos por

reparaciones y tiempos de inactividad, sino también graves impactos ambientales y sociales, como fugas, contaminación de los recursos hídricos o interrupción del saneamiento.

Por ende, para garantizar la confiabilidad es necesario crear un diseño robusto que tenga en cuenta las especificaciones técnicas del sistema y las condiciones de operación a las que estará sometido (Granda y Chica, 2023). Esto implica seleccionar componentes de calidad, como bombas, motores y sistemas de control, que sean adecuados para la aplicación específica. Además, el mantenimiento predictivo y preventivo juega un papel vital en la identificación de problemas potenciales mediante el monitoreo continuo de parámetros clave como vibración, temperatura, presión y caudal. Las tecnologías avanzadas, como los sensores de IoT y el análisis predictivo que utilizan inteligencia artificial, están transformando la gestión de la confiabilidad al proporcionar diagnósticos y recomendaciones en tiempo real para optimizar las operaciones del sistema (Granda y Chica, 2023).

Es de esta manera que un sistema eficiente requiere menos energía para mover una cantidad específica de líquido, lo que no sólo reduce los costos, sino que también reduce el impacto en el medio ambiente. En consecuencia, según Guerra y Logroño (2019) aseveran que los factores como el diseño hidráulico de la bomba, las condiciones del fluido, las pérdidas por fricción de las tuberías y la selección adecuada de componentes afectan directamente su rendimiento (Carreño, 2019).

4.4 Criterios de Diseño y Evaluación del Desempeño en Sistemas de Bombeo

4.4.1 Evaluación de Factores Operacionales en Sistemas de Bombeo

La evaluación de factores operativos en sistemas de bombeo se enfoca en identificar y optimizar aquellas variables que afectan directamente el desempeño del sistema como es el caso de: presión, pérdidas por fricción y el estado del fluido bombeado. Es de este modo que el análisis de estos factores permite garantizar que las bombas funcionen dentro de su rango óptimo, lo que no solo mejora la confiabilidad del sistema (Amau, 2023).

En consecuencia, un enfoque integral para esta evaluación implica el uso de herramientas de modelado hidráulico y simulaciones por computadora para predecir el comportamiento del sistema en diversos escenarios operativos. Estas herramientas ayudan a identificar cuellos de botella, sobrecargas o subutilización de las bombas, y sugieren ajustes a los parámetros operativos o cambios en el diseño del sistema para optimizar el rendimiento general. Dentro de las expresiones y/o ecuaciones que pueden ser empleadas; estas se denotan a continuación:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 + \text{pérdidas} \quad \text{Ecu 1.}$$

Donde
P: presión

ρ : densidad del fluido

V: es la velocidad

g: es la gravedad

h: es la altura

Nota: las unidades dependen del sistema en el cual se esté trabajando.

A la par también es necesario emplear la ecuación de Darcy-Weisbach para pérdidas por fricción.

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecu 2.}$$

Donde:

h_f = Pérdida de carga por fricción (en metros de columna de agua)

f= Factor de fricción (adimensional)

L = Longitud de la tubería

D = Diámetro interno de la tubería

V = Velocidad del fluido en la tubería

g = Aceleración de la gravedad

A la par también se debe considerar las ecuaciones que relacionan el rendimiento de la bomba y la altura manométrica total con las condiciones del sistema.

$$\eta = \frac{P \text{ útil}}{P \text{ entrada}} \times 100\% \quad \text{Ecu 3.}$$

Donde

η : rendimiento de la bomba

P útil: potencia hidráulica entregada al fluido

P entrada: potencia consumida por el motor de la bomba.

$$H = H_g + H_v + H_f \quad \text{Ecu 4.}$$

Donde

H: altura disponible

H_g : altura geodésica

H_v : altura dinámica (debida a la velocidad)

H_f : pérdidas por fricción

Por otro lado, para el caso de las pérdidas por fricción es necesario considerar las primarias y secundarias del sistema. Las pérdidas primarias se calculan con la ecuación de Darcy-Weisbach, misma que se detalla a continuación:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecu 5.}$$

Donde:

h_f = Pérdida de carga por fricción (en metros de columna de agua)

f= Factor de fricción (adimensional)
L = Longitud de la tubería
D = Diámetro interno de la tubería
V = Velocidad del fluido en la tubería
g = Aceleración de la gravedad

Y desde este punto se considera el valor del número de Reynolds teniendo en mente régimen de flujo (si es laminar; $Re < 2000$ o turbulento $Re > 4000$).

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad \text{Ecu 6.}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds
 ρ = Densidad del fluido (kg/m^3)
 μ = Viscosidad dinámica del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

4.4.2 Succión neta positiva y factores que afectan la eficiencia hidráulica en el bombeo

La succión neta positiva requerida (NPSH) es un parámetro que garantiza que la bomba funcione correctamente, evitando la cavitación. La cavitación ocurre cuando la presión del líquido que ingresa a la bomba cae por debajo de su presión de vapor, formando burbujas de vapor que colapsan cuando alcanzan áreas de alta presión. Este fenómeno no sólo reduce la eficiencia de la bomba, sino que también provoca graves daños a componentes internos como las hélices (Benavides et al., 2023).

De acuerdo con Carreño (2019) mantener un NPSH adecuado requiere un diseño óptimo del sistema de succión que considere factores como la altura de succión disponible, las características del fluido y las pérdidas por fricción de las tuberías (Amau, 2023). Por ende, se debe minimizar las pérdidas de energía debido a la fricción en tuberías y accesorios y evitar condiciones que causen cavitación o turbulencia excesiva. Esto requiere un diseño cuidadoso utilizando componentes de alto rendimiento y materiales resistentes al desgaste, especialmente en sistemas que manejan fluidos abrasivos o corrosivos. Por otro lado, la succión neta positiva disponible (NPSH) se evalúa para evitar la cavitación en las bombas por medio de la siguiente expresión.

$$NPSH_{dis} = \frac{P_a}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} - \frac{P_{vap}}{\rho g} - hf \quad \text{Ecu 7.}$$

Donde

$NPSH_{dis}$: succión neta positiva disponible
Pa: presión atmosférica
Pvap: presión de vapor del fluido
hf: pérdidas por fricción en la succión.

4.4.3 Composición de las aguas residuales y sus efectos en la infraestructura

La composición de las aguas residuales posee sólidos en suspensión, grasas, aceites, grasas y compuestos químicos que pueden bloquear las tuberías, acelerar la corrosión y acortar la vida útil de la bomba. Además, los gases disueltos como el sulfuro de hidrógeno pueden causar problemas de olores y aumentar el riesgo de falla estructural debido a la corrosión.

Para minimizar estos efectos es necesario utilizar sistemas de pretratamiento como cribas o separadores que eliminen los sólidos y otros contaminantes antes del bombeo (Giralt, 2024). En consecuencia, en todo momento se debe utilizar materiales resistentes a la corrosión y diseñar componentes con tolerancias suficientes para hacer frente a la variabilidad de las aguas residuales. Los cálculos relacionados con las aguas residuales consideran la concentración de sólidos y la viscosidad del fluido:

$$C = \frac{m_{sólidos}}{m_{total}} \times 100\% \quad \text{Ecu 8.}$$

Donde

m sólidos: masa de sólidos

m total: masa total del fluido

4.4.4 Temporalidad y variación del caudal

La estacionalidad y las fluctuaciones del flujo son factores inherentes a muchos sistemas de bombeo, especialmente en entornos urbanos e industriales donde la demanda varía según la hora del día, la estación o las condiciones climáticas. Es fundamental, diseñar sistemas que se adapten a estos cambios para garantizar un correcto desempeño (Jimenes , 2019). Esto puede ser conseguido mediante el uso de variadores de frecuencia y estrategias de control adaptativo; así como el funcionamiento de la bomba se puede ajustar en tiempo real, optimizando el consumo de energía; reduciendo el desgaste del equipo. Además, la modelización hidráulica permite predecir estas fluctuaciones y proponer diseños que minimicen los impactos negativos (Calles y Gonzáles, 2011). Para analizar la temporalidad y variación del caudal, se emplean métodos estadísticos y de simulación:

$$Q_m = \frac{\sum Q_i}{n} \quad \text{Ecu 9.}$$

Donde

$\sum Q_i$: caudal en cada instante

n: número de observaciones

Por otro lado, se considera la desviación estándar del caudal con base en la siguiente expresión:

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum (Q_i - Q_m)^2}{n - 1}} \quad \text{Ecu 10.}$$

Este valor indica la variabilidad del caudal en el tiempo, ayudando a dimensionar reservorios y sistemas de amortiguación.

4.5 Modelación y Simulación en Sistemas de Bombeo de Aguas Residuales

4.5.1 Modelación en régimen permanente para optimización del sistema

La simulación de estado estacionario se utiliza para analizar las condiciones operativas de estado estacionario de un sistema de bombeo, teniendo en cuenta factores como el flujo, la presión y las pérdidas por fricción (Alfárez y Nieves, 2019). Este tipo de modelado es esencial para optimizar el diseño del sistema y seleccionar componentes que operen cerca del punto de máximo trabajo. Dentro de este contexto, las herramientas de software permiten simular diferentes configuraciones y escenarios operativos, identificando oportunidades para reducir los costos de energía y mejorar la productividad (Benavides et al., 2023). También facilitan la planificación de la expansión o modificación de un sistema existente. En régimen permanente se emplea la ecuación de continuidad.

$$Q = A * v \quad \text{Ecu 11.}$$

Donde

Q: caudal

v: velocidad

a: área de la sección transversal

4.5.2 Modelación en régimen no permanente e impactos en la operación de válvulas y bombas:

Definición de Flujo Transitorio y su Relevancia en Sistemas Hidráulicos

El flujo transitorio (o régimen no permanente) se refiere a las variaciones temporales de presión y caudal en un sistema hidráulico, causadas por cambios abruptos en las condiciones de operación, como el arranque/parada de bombas, cierre de válvulas o fallas eléctricas. A diferencia del flujo permanente, donde los parámetros se mantienen constantes, los transitorios generan perturbaciones dinámicas que se propagan como ondas de presión a través de las tuberías (Amau, 2023). Su estudio es crítico en sistemas de bombeo de aguas residuales, ya que estos eventos pueden comprometer la integridad estructural de la red, reducir la vida útil de los equipos e incluso provocar fallas catastróficas. Por ejemplo, en la parroquia La Belleza, donde las fluctuaciones estacionales de caudal y las operaciones intermitentes de bombeo son comunes, entender los transitorios es esencial para diseñar protecciones adecuadas y garantizar operación segura (Arzuaga, 2020).

Fenómenos Asociados: Golpe de Ariete y Oscilaciones de Presión

Los transitorios hidráulicos generan dos fenómenos principales:

- Golpe de ariete: Onda de presión generada por cambios repentinos en la velocidad del flujo (tal es el caso del: cierre rápido de válvulas). En sistemas de bombeo, puede alcanzar presiones 10 veces mayores a las normales, provocando roturas en tuberías o daños en bombas (Yan et al., 2024).
- Oscilaciones de presión: Fluctuaciones cíclicas debido a resonancia en la red, especialmente en sistemas con múltiples bombas operando en paralelo.

Estos fenómenos tienen implicancias graves en redes de bombeo de aguas residuales:

- Fallas mecánicas: Fatiga en sellos y cojinetes de bombas por presiones variables.
- Cavitación: Formación de burbujas de vapor que erosionan impulsores al colapsar.
- Desbordes: Depresiones transitorias pueden invertir flujos en pozos de bombeo (Yan et al., 2024).

Modelos Matemáticos y Numéricos para Simulación

Para predecir transitorios, se emplean modelos basados en las ecuaciones de Saint-Venant (conservación de masa y momentum), resueltos mediante el método de las características; mismo que discretiza las ecuaciones en líneas características para calcular presión y caudal en cada nodo de la red. También existe el método de ecuaciones diferenciales parciales como es el caso del modelo de Allievi o Schnyder-Bergeron para sistemas simples. Finalmente, se puede emplear software basado en FEM que aborda geometrías complejas con acoplamiento bomba-red (Vega , 2022).

Software y Técnicas de Simulación

Al momento de analizar las herramientas especializadas para análisis transitorio, se pueden connotar los siguientes: HAMMER (Bentley). Este evalúa golpe de ariete y diseña protecciones (válvulas de alivio, tanques de oscilación). A la par, existe EPANET; mismo que posee una extensión para régimen no permanente. Por último, TransAM (KYPipe) orientado hacia un modelamiento en términos de cavitación y columnas separadas (Jimenes , 2019).

Impacto en Rendimiento y Eficiencia de Bombas

Los transitorios afectan directamente a las fluctuaciones de presión, pues incrementan las pérdidas por fricción hasta en un 20%, reducen la vida útil de sellos y rodamientos debido a los ciclos repetidos, y cuando las bombas operan fuera de su punto de operación óptimo, provocan un funcionamiento inestable, aumentando el consumo de energía y las vibraciones. Por lo tanto, se recomienda implementar soluciones como el arranque y la parada suaves mediante variadores de frecuencia, el uso de dispositivos de protección pasiva como tanques de compensación o válvulas de derivación, y la monitorización en tiempo real con sensores de presión para detectar cambios transitorios anómalos (Giralt, 2024).

Es de esta manera que el modelado transitorio tiene en cuenta las condiciones que ocurren durante eventos como el inicio, el apagado o cambios repentinos de flujo. Estos cambios pueden provocar golpes de ariete y fluctuaciones de presión que dañan

válvulas, tuberías y bombas (Castro , 2021). Es acertado acotar que modelar estas condiciones permite diseñar sistemas de seguridad, como válvulas de derivación y tanques de expansión, para minimizar los impactos negativos (Amau, 2023). Este enfoque es esencial para garantizar la seguridad y la longevidad del sistema, especialmente en aplicaciones de misión crítica donde una interrupción tiene consecuencias significativas. Las expresiones empleadas se destacan a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Ecu 12.}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + R = 0 \quad \text{Ecu 13.}$$

Donde

h: altura

c: velocidad de onda

x: distancia

R: representa pérdidas

Con base en la información analizada, los escenarios de flujo transitorio son útiles para evaluar los sistemas de bombeo de aguas residuales, ya que reflejan las condiciones de operación de la infraestructura, especialmente en zonas como La Belleza, donde las bombas arrancan y paran con frecuencia, los caudales varían estacionalmente y es posible que se produzcan cortes de energía. Estos eventos provocan cambios repentinos de presión y velocidad que pueden desencadenar golpes de ariete y oscilaciones de presión, lo que provoca daños estructurales en las tuberías, cavitación en las bombas, desgaste acelerado de las piezas mecánicas y un riesgo significativo de desbordamiento en los pozos de bombeo. De igual manera, operar fuera del punto óptimo de eficiencia durante estos transitorios genera mayor pérdida de energía, vibración y una menor vida útil de los equipos. Por ello, la simulación de escenarios transitorios mediante modelos matemáticos y herramientas especializadas permite predecir el comportamiento dinámico del sistema, evaluar su vulnerabilidad en condiciones críticas y diseñar medidas de protección adecuadas, como arranques suaves, válvulas de alivio o tanques de compensación, garantizando una operación más segura, eficiente y sostenible del sistema de saneamiento.

5 Materiales y metodología

5.1 Área de estudio

La parroquia “La Belleza” pertenece al Cantón Francisco de Orellana, Provincia de Orellana; ubicada a 22 km de la ciudad del Coca, en la Vía Los Zorros, es además su cabecera parroquial. Se localiza aproximadamente entre las coordenadas geográficas: 10°48'33,06" y 0°49'28,76" de latitud sur y entre 77°4'17,84" y 77°1'54,27" de longitud oeste. Los límites de la parroquia son; Norte: Parroquia García Moreno, Sur: Parroquia Inés Arango y Cantón Tena (Provincia de Napo), Este: Dayuma y, Oeste: Cantón Loreto y Provincia de Napo. La parroquia La Belleza tiene un clima megatérmico lluvioso, la temperatura oscila entre los 22°C y 25°C y se caracteriza por tener temperaturas promedio cercanas a los 25°C. En el cantón Francisco de Orellana, la precipitación promedio anual oscila entre los 2500 a 4000 mm, los periodos de mayor humedad están comprendidos entre los meses de abril - mayo y octubre - noviembre. La parroquia La Belleza promedia precipitaciones entre 3000 a 4000 mm (Gobierno Autonomo Parroquial Rural De La Belleza, 2023).

5.1.1 Delimitación territorial

Según el último censo del INEC (2022), se determina que la parroquia tiene una población total de 4.133 habitantes repartidos de la siguiente manera 367 en el área urbana y 3.766 en el área rural. Además, las actividades económicas de la parroquia la Belleza de mayor importancia son la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca, la mayor parte de la población se concentra en el sector primario de la economía con un 70,69%, la segunda rama de actividad en importancia es la enseñanza con un 4.55%, seguido de la Industria manufactureras 2,53% y la construcción 1.59%. En la parroquia el 64.48 % corresponde al trabajo por cuenta propia, es decir que se dedican a la agricultura, ganadería, silvicultura, pesca, el 10.76% trabaja en propiedades ajenas como jornalero, un 6.21% es trabajador no remunerado y el 5.42% como empleado de instituciones públicas. Las mujeres rurales desempeñan un papel importante en el sector agropecuario en la producción de cultivos básicos, la cría de pollos y animales pequeños, los sistemas alimentarios (subsistencia diaria de las familias) además son el suministro de mano de obra para las actividades posteriores a la cosecha.

Finalmente, según datos del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (2019), cerca del 70% de las aguas residuales generadas en la parroquia son descargadas directamente en los cuerpos de agua, lo que subraya la necesidad de optimizar los sistemas de manejo y tratamiento.

5.2 Metodología

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y aplicado, con el objetivo de analizar y optimizar el sistema de bombeo de aguas residuales en la parroquia La Belleza, cantón Francisco de Orellana. Se eligió este enfoque debido a la necesidad de recolectar, medir y analizar datos numéricos relacionados con el caudal, la presión y las características físico-químicas del agua, elementos esenciales para evaluar la eficiencia hidráulica del sistema.

El carácter descriptivo permitió caracterizar el funcionamiento actual del sistema, mientras que el enfoque aplicado orientó la formulación de soluciones técnicas sustentables para mejorar su desempeño. Este método fue preferido frente a los enfoques cualitativos o exploratorios, ya que el propósito principal no fue interpretar fenómenos sociales, sino resolver un problema técnico definido, empleando herramientas analíticas y modelos informáticos que proporcionaran resultados mensurables y reproducibles (Sampieri, 2020). Es necesario señalar también que la complejidad inherente de los sistemas hidráulicos justificó la adopción de un procedimiento sistemático, que integra mediciones de campo, análisis de laboratorio y simulaciones avanzadas por computadora. La recopilación de datos se desarrolló entre marzo 2024 a mayo 2025, periodo en el cual se recopilaban los datos técnicos y operativos del sistema. Este procedimiento metodológico se sintetiza en las fases destacadas a continuación:

Fase 1: Recopilación documental y análisis técnico preliminar

En esta fase se recopiló información técnica y documental sobre el sistema de bombeo existente. Se obtuvieron planos hidráulicos, características de bombas, dimensiones de tuberías y registros históricos de operación, proporcionados por el GAD parroquial y municipal. Estos datos permitieron determinar patrones de flujo y variaciones estacionales del caudal, así como establecer una línea base del funcionamiento actual del sistema. Además, se realizó una inspección visual de las instalaciones, identificando condiciones, tipo de válvulas y conexiones del sistema.

Fase 2: Trabajo de campo y caracterización físico-química

Durante esta etapa los responsables del laboratorio acudieron al sector y desarrollaron la toma de muestras. Mismos que, con base en su acreditación (SAE LEN 14-009) y protocolos (ITO-AQLAB-01) destinaron el transporte, manipulación y efectuaron los ensayos pertinentes para después entregar el informe de resultados.

Fase 3: Modelación hidráulica en régimen permanente

En esta fase se desarrolló el modelo hidráulico en régimen permanente empleando el software Bentley HAMMER, con el propósito de representar el comportamiento estable del sistema. Se ingresaron los datos de las bombas, longitudes y diámetros de tuberías, niveles de succión y descarga, pérdidas de carga y condiciones de operación. El modelo permitió evaluar diferentes alternativas de mejora, incluyendo la selección óptima de bombas y la variación de diámetros de impulsión, para optimizar la eficiencia energética y reducir pérdidas hidráulicas. Asimismo, se calculó la succión positiva neta disponible (NPSH) aplicando las ecuaciones de Bernoulli y Darcy-Weisbach, con el fin de detectar y prevenir condiciones de cavitación o deficiencias en el diseño de la línea de

succión. Es necesario señalar que esta modelación permitió determinar si la bomba seleccionada es adecuada para el sistema. A la par, se desarrolló el análisis de temporalidad de caudal, este consistió en caracterizar el cárcamo como un pozo cilíndrico de 3.20 m de diámetro, determinando un volumen útil de 2.8149 m³ entre la base y el nivel de arranque de la bomba. A partir del tiempo de llenado (48 h), se calculó el caudal afluente mediante un balance volumen–tiempo, obteniéndose 0.05864 m³/h, valor muy bajo en comparación con la capacidad de impulsión de la bomba.

Fase 4: Simulación de transitorios hidráulicos (régimen no permanente) y validación de la propuesta.

En esta etapa se analizaron las condiciones dinámicas del sistema, simulando escenarios de arranque, paro y cierre de válvulas. Se utilizaron las herramientas transitorias del software HAMMER para evaluar fenómenos de golpe de ariete, fluctuaciones de presión y seguridad operacional. Los resultados fueron comparados con mediciones de campo para verificar la correspondencia entre los valores simulados y observados, asegurando la validez y confiabilidad del modelo.

Adicionalmente, en esta fase se evaluó el comportamiento dinámico del sistema de bombeo bajo condiciones transitorias, con el propósito de identificar riesgos operativos, presiones extremas y posibles daños estructurales derivados de eventos súbitos en la operación. Para ello, se utilizaron las herramientas de análisis transitorio del software Bentley HAMMER, aplicando los criterios establecidos por la AWWA M11 (American Water Works, 2017), AWWA M32 (American Water Works- Water Distribution Systems, 2017) y las metodologías propuestas por Wylie & Streeter (Griño y Barracó, 1998).

En esta misma fase se definieron y simularon cuatro escenarios representativos, considerados críticos para la estabilidad hidráulica del sistema:

- **Cierre súbito o rápido de válvula de control o compuerta**

Este escenario se basó en las recomendaciones de la AWWA M32, que sugiere incluir cierres rápidos en válvulas críticas ubicadas aguas abajo de estaciones de bombeo. El análisis permitió determinar las sobrepresiones generadas y evaluar la respuesta del sistema ante la detención instantánea del flujo, verificando la necesidad de incorporar dispositivos de disipación de energía o válvulas de control gradual.

- **Detención repentina de una bomba por corte eléctrico:**

Según Wylie & Streeter, la parada abrupta de una bomba constituye uno de los eventos más severos en sistemas presurizados. La simulación permitió cuantificar las depresiones y sobrepresiones producidas por la inercia del fluido al detenerse la impulsión, identificando la magnitud del golpe de ariete y la necesidad de instalar válvulas de retención anticipadoras o cámaras de aire para proteger la línea de impulsión (Griño y Barracó, 1998).

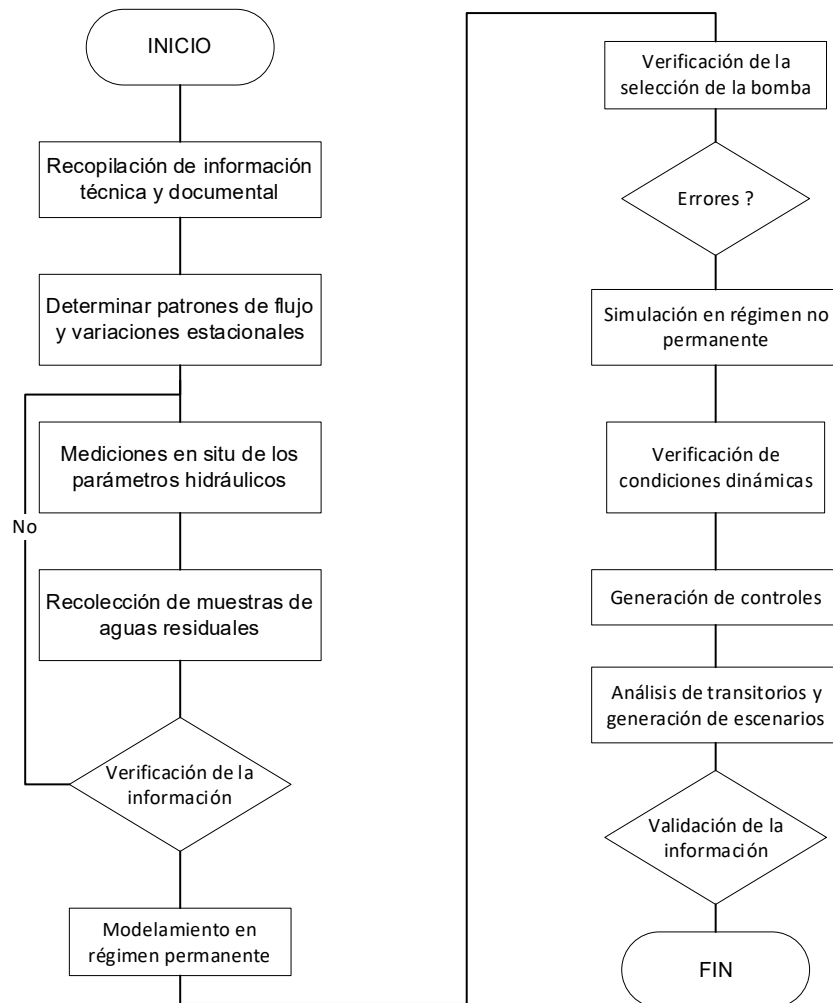
- **Puesta en marcha súbita de la bomba (sin variador de frecuencia):**

De acuerdo con la AWWA M11, este tipo de evento debe evaluarse en sistemas con arranques frecuentes. Se analizó la respuesta transitoria del sistema al iniciar el flujo de manera brusca, identificando las presiones iniciales y oscilaciones en la tubería. Los resultados sirvieron para valorar la conveniencia de implementar arrancadores suaves o variadores de frecuencia como medida de mitigación.

- **Golpe de ariete por flujo inverso durante la detención de la bomba**

Este caso se centró en el retorno del flujo cuando la válvula de retención no cierra a tiempo. Se cuantificaron las presiones transitorias generadas y se evaluó la eficacia del sistema de protección existente. Con base en los resultados, se analizó la necesidad de incorporar bypass, válvulas anticipadoras o tanques de alivio que permitan disipar el exceso de presión y evitar daños en la línea de impulsión.

Figura 5.1. *Cumplimiento de los objetivos específicos del proyecto*



Nota: Se presenta el desarrollo metodológico del proyecto. Es necesario señalar que la selección de bombas se efectuó con base en la altura de bombeo del proyecto a la par de emplear el catálogo de fabricante. La asignación de caudales se abordó con base en el diseño actual del sistema. Por su parte la rugosidad y/o coeficiente de Manning viene dado por los materiales de la tubería (PVC, Acero; localizada en el cuarto de bombeo).

6 Resultados y discusión

6.1 Resultados

En este apartado se destacan los resultados elaborados para la consecución del presente trabajo de investigación. Dentro de los mismo se abordan, alternativas de régimen, composición y temporalidad, succión neta positiva, resultados en flujo permanente y finalmente medias de protección.

6.1.1 Resultados de las alternativas en régimen permanente

En este apartado se destacan los resultados en régimen permanente que involucra la selección de bombas de aguas residuales y diámetros de impulsión de las tuberías para mejorar la eficiencia del sistema. Esta información se destaca en la tabla 6.1 mostrada a continuación:

Tabla 6.1. *Alternativas en régimen permanente para selección de bombas*

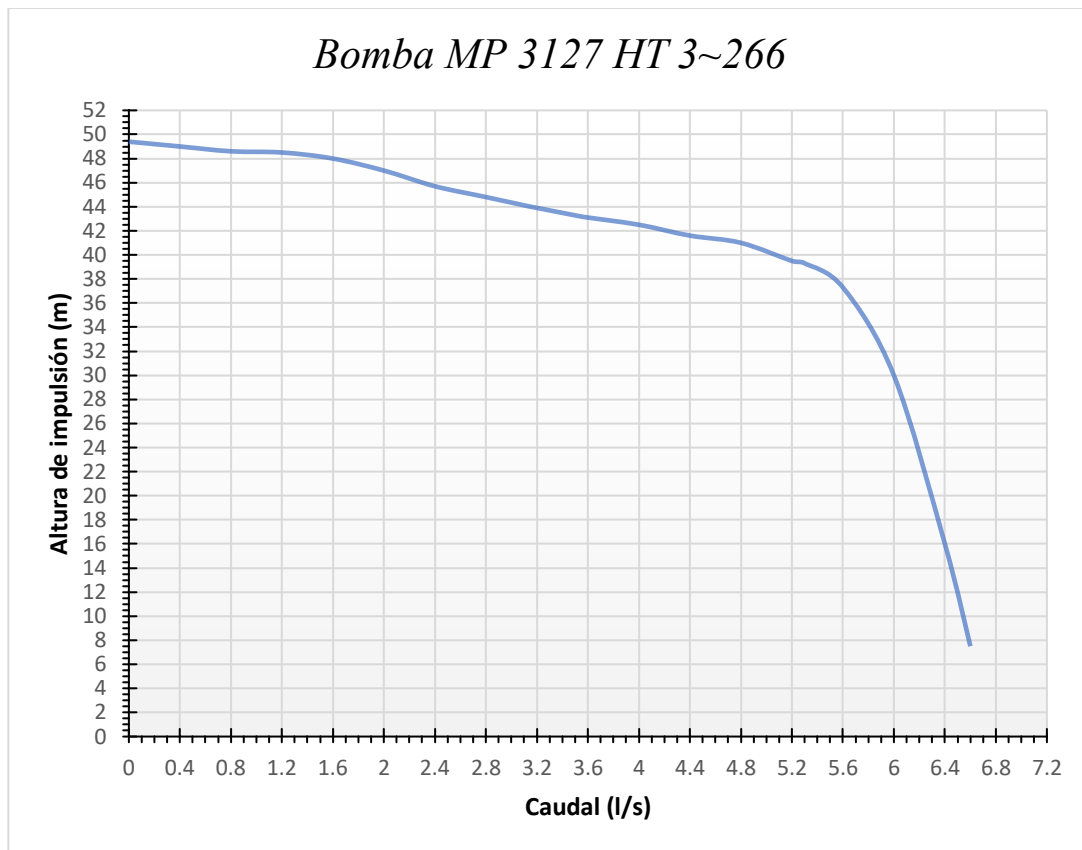
N°	Alternativa	Tipo de bomba
1	Condición Actual	MP 3127 HT3-266
2	Alternativa I	NP 3153 SH3-276.
3	Alternativa II	NP 3301 HT3-454

Nota: La información presentada señala el número de alternativas y el tipo de bomba empleado considerando el desarrollo de los objetivos. Elaborado por: Ruiz (2026)

En el análisis de las alternativas en régimen permanente se consideró el diámetro de las tuberías de la red existente, así como las características de la bomba actualmente instalada en el sistema. Adicionalmente, fueron seleccionadas dos bombas como alternativas, cuyas curvas características, proporcionadas por el fabricante, fueron incorporadas al estudio con el fin de evaluar su desempeño en comparación con la bomba en operación.

6.1.1.1 Análisis Condición Actual Bomba MP 3127 HT3-266

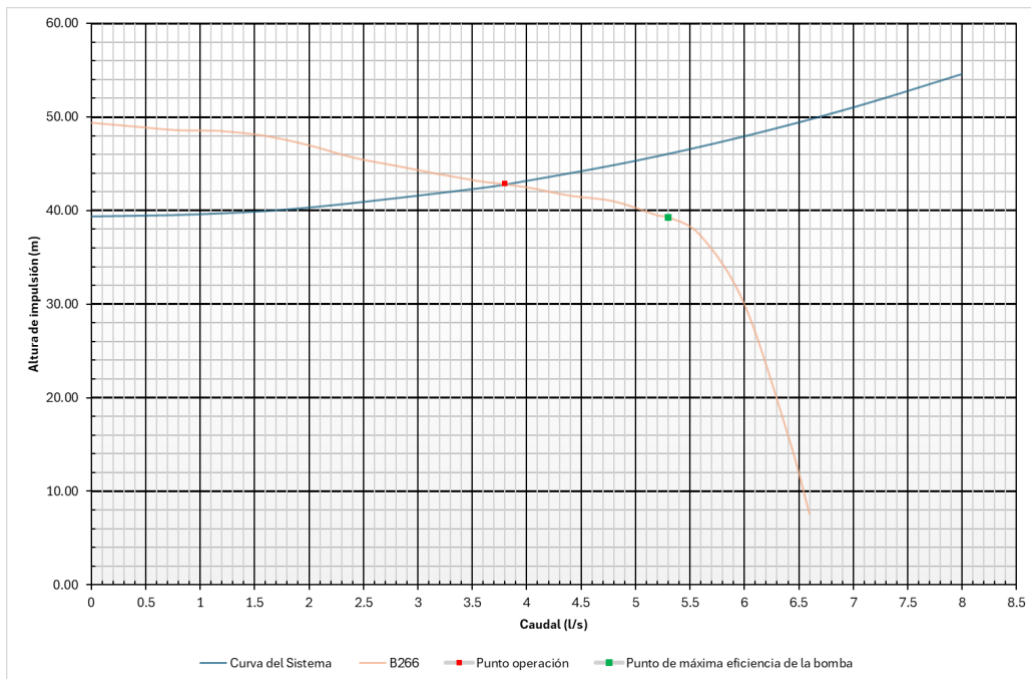
Figura 6.1. Curva de la bomba MP 3127 HT3-266.



Nota: La información destaca la curva de la bomba según ficha técnica. Elaborado: Tomado de Flygt.

La curva de las bombas fue analizada y se integró en el modelo de flujo permanente, lo que permitió la obtención gráfica de los puntos de operación resultantes y la identificación de los puntos óptimos de trabajo a partir de la curva del sistema. De esta manera, la evaluación comparativa fue desarrollada en función de la interacción entre las condiciones hidráulicas de la red y la eficiencia de la bomba.

Figura 6.2. Punto de operación/eficiencia bomba MP 3127 HT3-266.



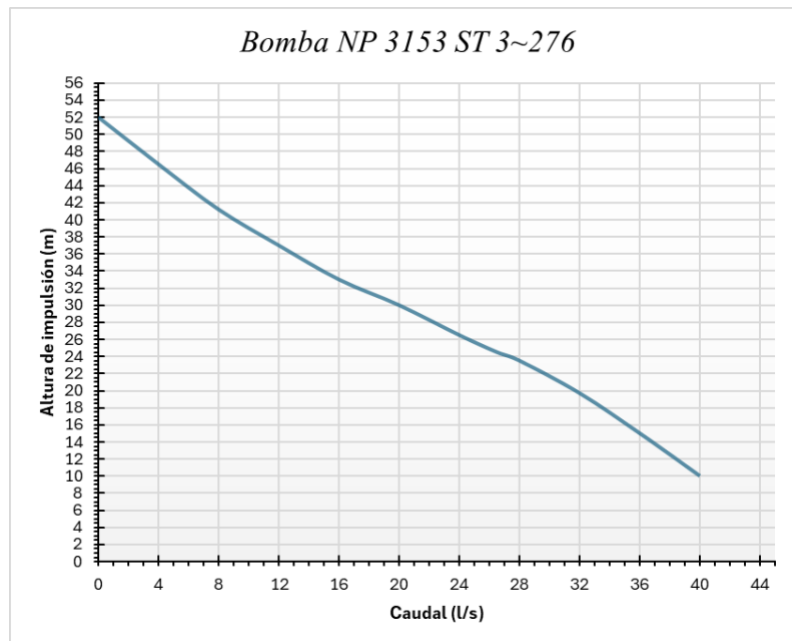
Nota: La información destaca las curvas de la bomba a la par del sistema para el análisis del punto óptimo de trabajo. Elaborado por: Ruiz (2026)

En la **Figura 6.2** se evidenció El punto de operación de la bomba fue determinado en la intersección entre la curva característica de la bomba y la curva del sistema, dicho punto se localizó a un caudal de aproximadamente 3,8 l/s y una altura manométrica de 43 m, lo cual fue corroborado en la tabla de datos de desempeño de la bomba. Este resultado mostró que el sistema fue condicionado por la resistencia hidráulica de la red existente, lo que definió el equilibrio entre la energía suministrada por la bomba y las pérdidas de carga en la conducción. Al situarse en este punto, se garantizó que la bomba operará en condiciones estables, aunque no necesariamente en el rango de su mayor eficiencia, lo que implicó que la demanda hidráulica del sistema fue cubierta de manera adecuada, pero con un margen de mejora en términos de eficiencia energética.

Por otro lado, el punto de máxima eficiencia de la bomba (P.E.B) fue identificado a un caudal de 5,3 l/s y una altura manométrica de 39,3 m, de acuerdo con los datos técnicos proporcionados por el fabricante y reflejados en la gráfica. Este punto representó la condición en la que la bomba alcanzó su mejor rendimiento hidráulico, con una menor relación de pérdidas internas y mayor aprovechamiento de la energía consumida. Al compararse con el punto de operación real, se observó que la bomba funcionó desplazada hacia un caudal menor y una altura mayor, lo que significó un desempeño más seguro frente a variaciones de presión, pero a costa de una eficiencia reducida. En consecuencia, el análisis evidenció que, si bien el sistema fue abastecido adecuadamente, la selección de una bomba cuyo punto de operación coincidiera más estrechamente con el punto de máxima eficiencia habría permitido un uso más racional de la energía y una operación más económica en el largo plazo.

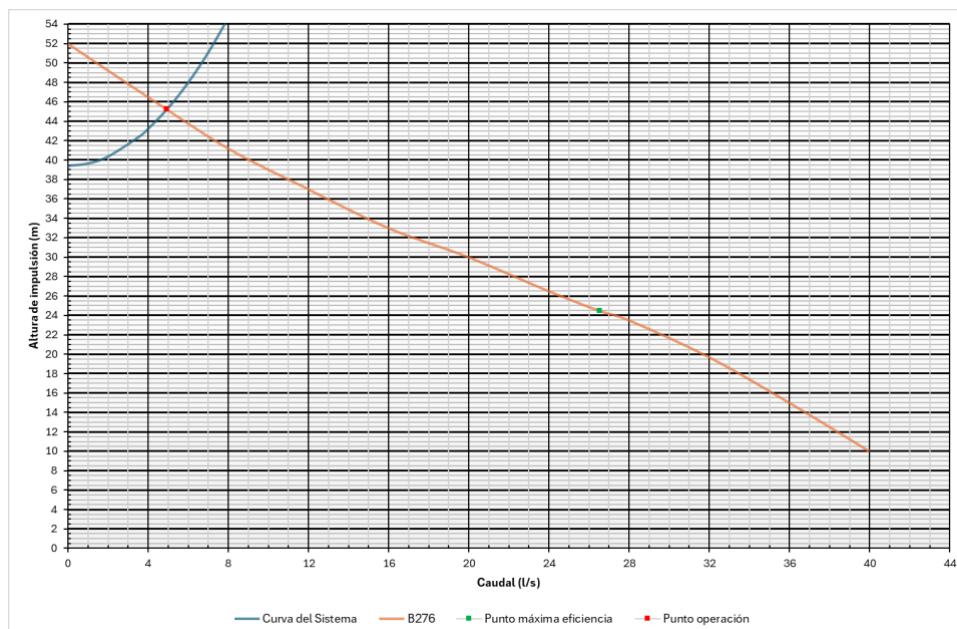
6.1.1.2 Análisis Alternativa I Bomba NP 3153 SH3-276

Figura 6.3. Curva de la bomba NP 3153 SH3-276.



Nota: La información destaca la curva de la bomba según ficha técnica. Elaborado: Tomado de Flygt.

Figura 6.4. Punto de operación/eficiencia bomba NP 3153 SH3-276.



Nota: La información destaca las curvas de la bomba a la par del sistema para el análisis del punto óptimo de trabajo. Elaborado por: Ruiz (2026)

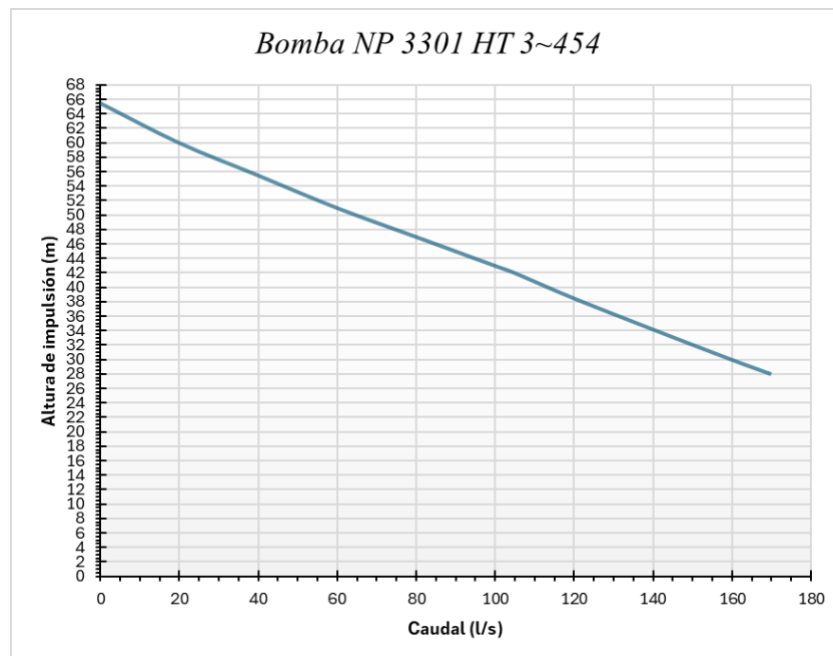
En la **Figura 6.4** el punto de operación de la bomba fue establecido en la intersección de la curva del sistema con la curva característica proporcionada por el fabricante. Este punto se ubicó a un caudal de 4,9 l/s y una altura manométrica de 45,25 m, lo que

representó la condición en la cual la bomba trabajó en equilibrio con las pérdidas de carga de la red hidráulica existente. Dicho resultado evidenció que la bomba fue obligada a operar en un régimen en el que la altura entregada fue superior a la requerida en su rango óptimo de eficiencia, garantizando el abastecimiento del sistema, pero con un rendimiento hidráulico menor al esperado. Esta condición, aunque permitió cubrir la demanda, significó que la energía consumida por la bomba no fue aprovechada en su totalidad, ya que el punto de operación se encontró desplazado hacia un caudal reducido en comparación con el de mayor eficiencia.

En contraste, el punto de máxima eficiencia de la bomba (P.E.B) fue identificado a un caudal de 26,5 l/s y una altura manométrica de 24,5 m, lo que representó la condición ideal en la cual el equipo alcanzó su mayor aprovechamiento energético. En este escenario, las pérdidas internas fueron minimizadas y la relación entre la energía suministrada y la hidráulicamente aprovechada resultó más favorable. Al realizar la comparación entre el punto de operación y el punto de máxima eficiencia, se evidenció que la bomba trabajó en un rango muy alejado de su condición óptima, generando un desempeño hidráulico estable, pero con baja eficiencia global. Este desajuste mostró que la bomba analizada no fue la más adecuada para las condiciones hidráulicas del sistema, puesto que su curva de mejor eficiencia se localizó en un caudal significativamente mayor, lo que, a largo plazo, implicó un consumo energético más elevado y una operación menos económica.

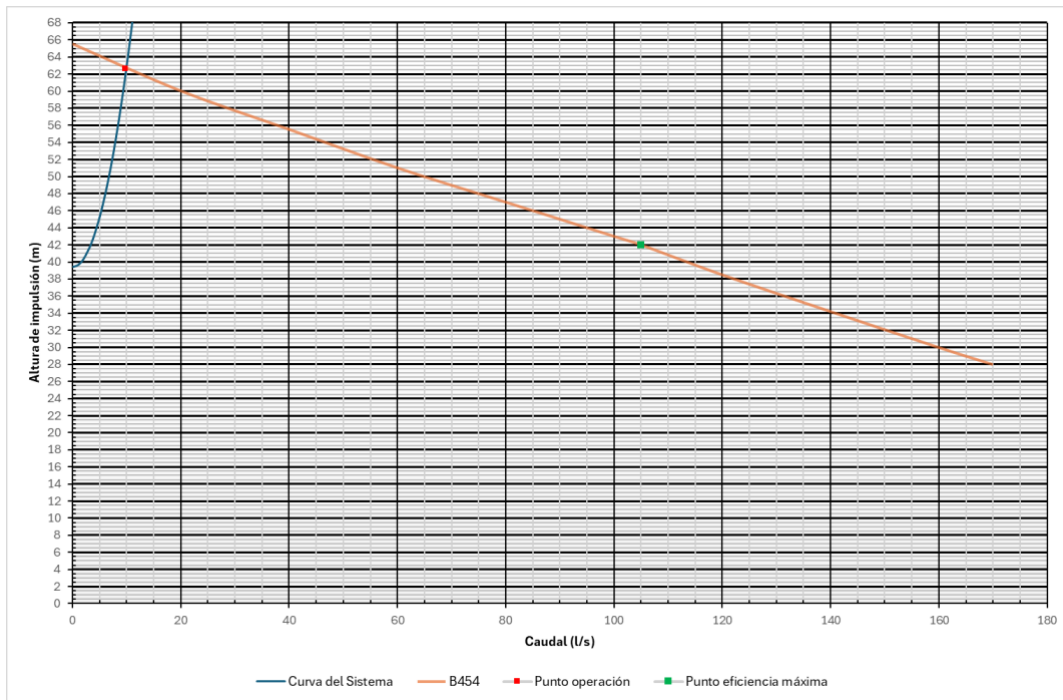
6.1.1.3 Análisis Alternativa II bomba NP 3301 HT3-454

Figura 6.5. Curva de la bomba NP 3301 HT3-454.



Nota: La información destaca la curva de la bomba según ficha técnica. Elaborado: Tomado de Flygt

Figura 6.6. Punto de operación/eficiencia bomba NP 3301 HT3-454



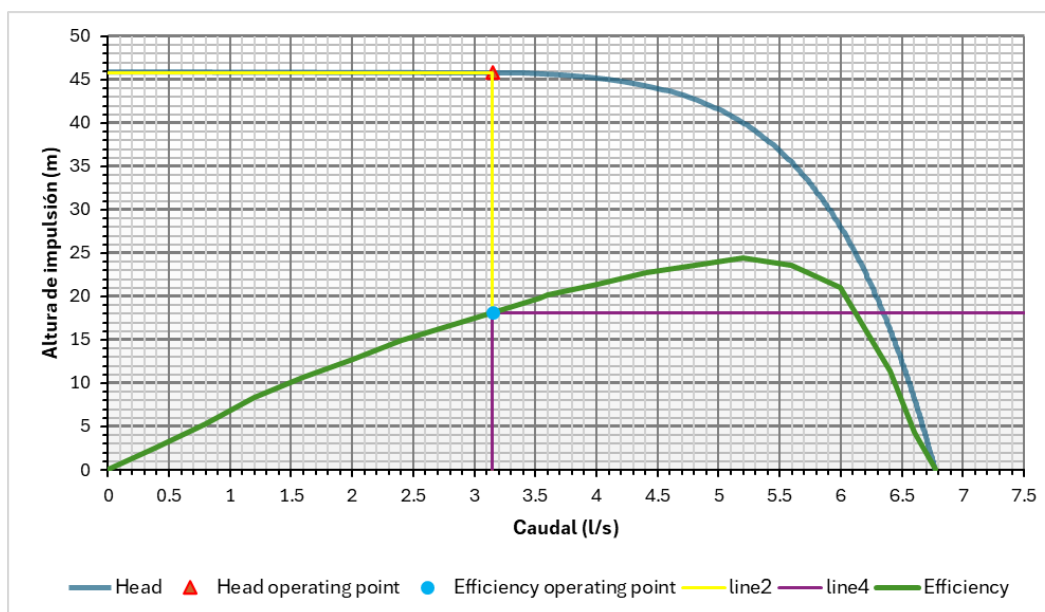
Nota: La información destaca las curvas de la bomba a la par del sistema para el análisis del punto óptimo de trabajo. Elaborado por: Ruiz (2026)

En la **Figura 6.6** el punto de operación de la bomba fue determinado a partir de la intersección entre la curva del sistema y la curva característica de la bomba, este punto se encontró a un caudal de 9,7 l/s y una altura manométrica de 62,7 m, lo que evidenció que la bomba trabajó en un régimen de caudal reducido y altura elevada en comparación con sus valores de máxima eficiencia. Esta condición significó que la energía suministrada al fluido fue superior a la requerida para un funcionamiento óptimo, lo que generó un desempeño hidráulico estable para el sistema, pero con una eficiencia energética limitada. El hecho de que el punto de operación se situara lejos del rango ideal implicó que el equipo no alcanzara su rendimiento máximo y que, en consecuencia, la relación entre el consumo de energía y el caudal bombeado no fuera la más favorable.

Por otro lado, el punto de máxima eficiencia de la bomba (P.E.B) fue identificado en la tabla técnica a un caudal de 105 l/s y una altura manométrica de 42 m, condición en la que el equipo alcanzaba su mayor aprovechamiento energético y un desempeño hidráulico balanceado. Este punto representó la situación ideal en la cual las pérdidas internas de la bomba fueron reducidas y la operación se desarrolló con el mayor rendimiento posible. Al compararse con el punto de operación real, se observó que la bomba trabajó en un rango muy alejado de su condición de máxima eficiencia, puesto que el caudal entregado fue considerablemente menor y la altura suministrada mucho mayor. Esto evidenció que la alternativa no fue la más adecuada para las condiciones hidráulicas del sistema, ya que la discrepancia entre ambos puntos reflejó un consumo energético más alto del necesario y una operación menos eficiente en términos de costo y desempeño a largo plazo.

6.1.1.4 Bomba MP 3127 HT3-266 (Hammer).

Figura 6.7. Curva de la bomba MP 3127 HT3-266 (Hammer)



Nota: La información destaca las curvas de la bomba en el programa Hammer. Elaborado por: Ruiz (2026)

La **Figura 6.7**, fue construida en HAMMER a partir de los diagramas proporcionados por el fabricante: la curva de la bomba ($H-Q$) y la curva de eficiencia ($\eta-Q$). Ambos juegos de puntos fueron ingresados y, para la hidráulica de la bomba, el software los simplificó mediante un ajuste por ecuación cuadrática del tipo $H(Q)=aQ^2+bQ+c$ Con el “Relative Speed Factor = 1.000” se trabajó a velocidad nominal y la condición de la bomba quedó activada (Pump Status: On) dentro del escenario “Bomba 1”. En el eje horizontal se representó el caudal (L/s); en el eje vertical izquierdo, la carga manométrica (m); y en el derecho, la eficiencia (%). La curva roja mostró la típica caída de cabeza con el aumento de caudal, mientras que la curva azul de eficiencia se elevó hasta un máximo y luego descendió, de acuerdo con el comportamiento esperado del equipo.

El punto de operación fue determinado por HAMMER como la intersección entre la curva cuadrática de la bomba y la curva del sistema hidráulico calculada internamente (que incluyó la altura geométrica, las pérdidas por fricción distribuidas y singulares, y las condiciones de entrega de presión/altura en el nodo de servicio). De esa intersección se obtuvo el par $(Q,H)= (3.148 \text{ L/s}, 45.833 \text{ m})$. En la gráfica, dicho punto quedó señalado con líneas punteadas que proyectaron el caudal hacia el eje de abscisas y la carga hacia el eje izquierdo, evidenciándose que la bomba trabajó en una zona de alta carga y caudal relativamente contenido, coherente con una red que exigió una altura dinámica total elevada.

De manera simultánea, fue leído el rendimiento correspondiente a ese mismo caudal sobre la curva azul de eficiencia, quedando como “punto de operación eficiente” el valor $(Q,\eta)=(3.148 \text{ L/s}, 18.15 \%)$. Es decir, a la demanda hidráulica impuesta por el sistema, la bomba entregó 45.833 m de carga con una eficiencia de 18.15 %. También se observó que el máximo de la curva de eficiencia se ubicó desplazado hacia caudales algo mayores

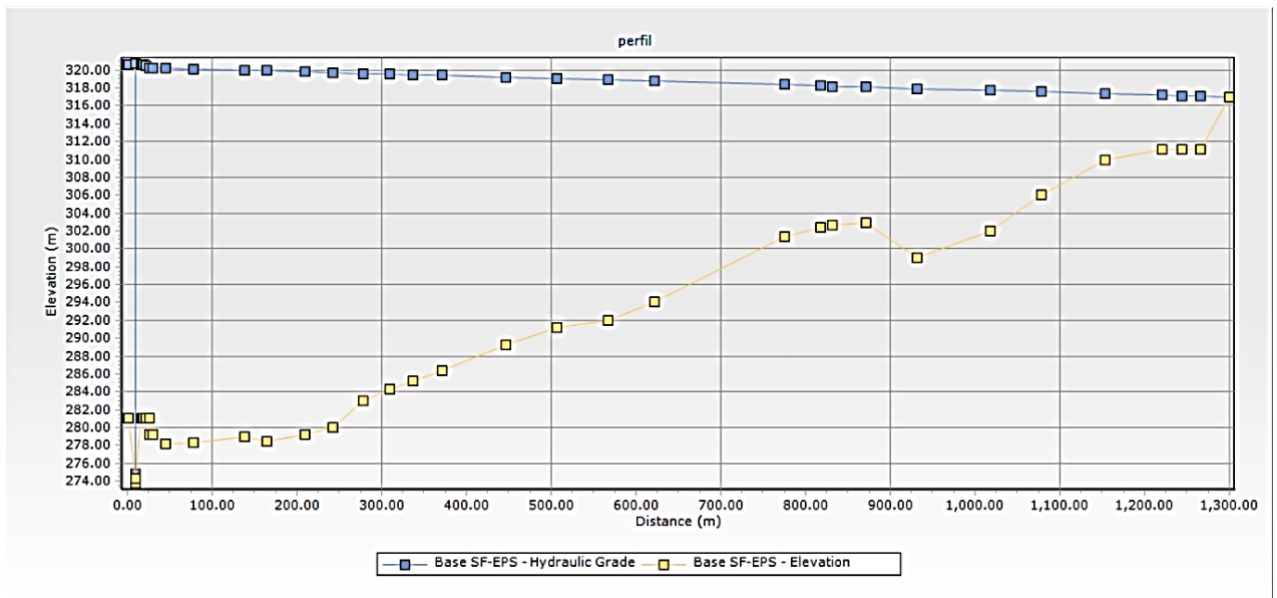
(pico visible alrededor de la mitad derecha de la gráfica), por lo que se concluyó que el equipo operó fuera de su BEP (Best Efficiency Point). Esa situación fue consecuencia directa de la intersección con la curva del sistema: al requerirse una carga alta en el punto de entrega, el caudal quedó limitado y, por ende, la operación se produjo en una zona menos eficiente del mapa de la bomba.

Los valores reportados, por lo tanto, fueron el resultado de los requerimientos y características del sistema: cotas entre succión y descarga, condición de presión mínima en el nodo servido, diámetros y longitudes de tuberías, rugosidades asumidas, accesorios presentes y pérdidas singulares, además de los niveles de los depósitos asociados. Con estos insumos, la curva del sistema fue trazada por el programa y su cruce con la curva cuadrática ajustada a los datos del fabricante arrojó el punto (3.148 L/s, 45.833 m); acto seguido, la eficiencia correspondiente a ese caudal fue tomada de la curva del fabricante, quedando $\eta=18.15\%$. En síntesis, se constató que las curvas fueron fieles a las provistas por el fabricante, que HAMMER las representó con un modelo cuadrático para la relación H–Q, y que el punto de operación y su eficiencia asociada quedaron definidos por las exigencias hidráulicas reales del sistema más que por el punto de máxima eficiencia intrínseca de la bomba.

6.1.1.5 Perfil hidráulico en condiciones de flujo permanente

A continuación, se destaca el perfil de flujo permanente para el desarrollo del presente documento, dentro del mismo se exponen y/o muestra cual es la condición de trabajo dentro del sistema.

Figura 6.8. Perfil flujo permanente.



Nota: La información destaca el perfil para condiciones iniciales de flujo permanente. Elaborado: Tomado de Hammer

6.1.1.6 Análisis del perfil hidráulico en condiciones de flujo permanente

En los resultados expuestos por la **Figura.6.8** representaron el comportamiento plano de la línea piezométrica indicó que las pérdidas de carga por fricción fueron mínimas respecto a la carga total disponible, lo que fue consistente con un caudal de operación bajo y una línea de impulsión con diámetro suficiente para transportar el flujo sin generar pérdidas significativas. Se evidenció que la línea hidráulica se mantuvo en todo momento por encima de la línea del terreno, asegurando presiones positivas en toda la conducción y evitando condiciones de cavitación o vacío hidráulico.

El punto más bajo de la elevación se presentó al inicio de la línea, en el cárcamo o estación de bombeo, con un valor aproximado de 273.75 m, mientras que el punto más alto se localizó en el extremo de descarga, cercano a 315 m. La diferencia entre la línea hidráulica y la elevación final sugirió que la bomba instalada proporcionó una carga suficiente para compensar la elevación geodésica y las pérdidas menores, manteniendo una presión estable en la descarga.

En términos hidráulicos, el perfil analizado confirmó que el sistema operó bajo condiciones estables y sin presencia de gradientes pronunciados, lo que indicó una operación eficiente en régimen permanente y una adecuada selección de potencia y diámetro de la impulsión para el caudal analizado.

6.1.1.7 Pérdidas de carga del sistema

Tabla 6.2. Pérdidas de carga menores-mayores

Pérdidas mayores	3.56	m
Pérdidas menores	0.29	m
Gradiente hidráulica (bomba)	320.75	m
Gradiente hidráulica descarga	317	m

Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo de Hammer para condiciones iniciales de flujo permanente. Elaborado por: Ruiz (2026)

Los resultados expuestos en la **Tabla 6.2** indicaron que la gradiente hidráulica generada por la bomba fue de 320.75 m, mientras que en el punto de descarga se registró un valor de 317.00 m, lo que reflejó una pérdida total de carga de 3.85 m, compuesta por 3.56 m de pérdidas mayores por fricción y 0.29 m de pérdidas menores por accesorios. Este comportamiento confirmó que la carga suministrada por la bomba fue suficiente para compensar las pérdidas hidráulicas a lo largo de la conducción, manteniéndose presiones positivas en la descarga y asegurando un régimen estable de operación.

La gráfica representó el perfil hidráulico en condiciones de flujo permanente, en el cual la línea hidráulica fue mantenida por encima de la línea de elevación a lo largo de toda la conducción, evidenciándose presiones positivas en cada tramo. Esta condición indicó que el sistema fue operado sin alcanzar la presión de vapor, por lo que no se evidenció riesgos de cavitación ni zonas de depresión crítica. El comportamiento estable de la línea

piezométrica reflejó un régimen hidráulico controlado y una adecuada capacidad de impulsión frente a la elevación topográfica del sistema.

6.1.2 Análisis de la composición, temporalidad del caudal y la succión neta positiva en contraste con la eficiencia del sistema.

En el análisis de laboratorio se evaluaron diversos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua, con el fin de determinar la calidad de la muestra y su cumplimiento frente a los límites máximos permisibles establecidos en la normativa ambiental ecuatoriana. El estudio fue realizado por el laboratorio ITE-AQLAB entre el 14 y el 19 de mayo de 2025, en condiciones ambientales que oscilaron entre una temperatura mínima de 22 °C y una máxima de 32 °C.

Los parámetros solicitados incluyeron aceites y grasas, coliformes fecales, coliformes totales, densidad, potencial de hidrógeno (pH) y sólidos totales suspendidos (STS). Para cada uno de ellos se emplearon métodos estandarizados de referencia, como los procedimientos de la EPA (Environmental Protection Agency) y la serie de métodos SM (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater). Los resultados obtenidos fueron comparados con los límites establecidos en la normativa nacional, específicamente el Acuerdo Ministerial N.º 097-A de noviembre de 2015, que regula la calidad ambiental y la descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce.

Además, es necesario destacar que cada parámetro evaluado presenta un nivel de incertidumbre asociado, expresado en porcentaje o en valores absolutos, lo que permite establecer el rango de confiabilidad de los resultados. Esta información se destaca en la tabla mostrada a continuación:

Tabla 6.3. Análisis descriptivo del agua con base en los resultados de laboratorio.

Parámetros / Análisis Solicitado	Método de Referencia	Límite Máximo Permisible	Unidad	Resultado	Incertidumbre (k=2)
Aceites y Grasas	EPA1664 B SM 5520 C/36	30,0	mg/L	< 0,3	± 27 %
Coliformes Fecales	IDEXX COLILERT 18, Test Quanti-tray/40	2000	NMP/100 ml	> 2419,6	± 20 %

Coliformes	SM	9222	No	ufc/100		
Totales	B/28		establecido	ml	9400	± 15 %
Densidad	SM	2540	No	g/ml	0,19	~
	B/03		establecido			
Potencial						
Hidrógeno	SM	4500-	6,0 – 9,0	pH	6,99	± 0,09
(pH)	H+B/01					
<hr/>						
Sólidos						
Totales	SM	2540		mg/L	20,00	~
Suspendidos	D/05		130			
(STS)						

Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el informe de laboratorio. Elaborado por: Ruiz (2026)

El análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua proveniente del sistema de descarga permite identificar de manera precisa el grado de cumplimiento de la normativa ecuatoriana vigente. En el caso de los aceites y grasas, el valor registrado fue menor a 0,3 mg/L, frente a un límite máximo permisible de 30 mg/L. Este resultado es altamente favorable, pues evidencia que el sistema de descarga no está aportando contaminantes oleosos al cuerpo receptor, lo que reduce el riesgo de formación de películas superficiales y alteraciones en el intercambio gaseoso. Al encontrarse muy por debajo del valor de referencia, se concluye que este parámetro cumple satisfactoriamente con la normativa ambiental.

El parámetro de coliformes fecales presentó un valor mayor a 2419,6 NMP/100 ml, superando el límite establecido de 2000 NMP/100 ml para descargas a cuerpos de agua dulce. Este hallazgo es de gran relevancia, ya que representa un incumplimiento normativo y una señal de contaminación fecal en el efluente. La presencia de coliformes fecales en concentraciones superiores al valor permitido constituye un riesgo sanitario elevado, dado que son indicadores de la posible presencia de bacterias patógenas, virus y parásitos (Calles y Gonzáles, 2011). En el contexto de un sistema de descarga, este resultado implica que el agua vertida no cumple con las condiciones mínimas de calidad requeridas por la legislación ambiental ecuatoriana, lo que puede conllevar sanciones regulatorias y, sobre todo, impactos negativos en la salud de las comunidades y en el equilibrio ecológico del cuerpo receptor.

El análisis del efluente de la tubería de descarga muestra que, aunque algunos parámetros cumplen con la normativa, existen aspectos críticos que requieren atención. En el caso de los coliformes totales, se reportó un valor de 9400 ufc/100 ml. Si bien la normativa no establece un límite específico para este indicador, la cifra es muy elevada y evidencia una alta carga microbiológica que confirma el incumplimiento detectado en los coliformes fecales, cuyo valor superó los 2419,6 NMP/100 ml frente al límite de 2000

NMP/100 ml permitido por el TULSMA. Esto demuestra la presencia de contaminación fecal significativa, con riesgos directos para la salud y el ambiente (Decreto Ejecutivo 3516, 2017).

En contraste, los parámetros físico-químicos presentan resultados favorables. El pH (6,99) se encuentra dentro del rango de 6 a 9 exigido por la normativa, lo que garantiza condiciones de neutralidad química; los sólidos suspendidos totales (20 mg/L) están muy por debajo del límite de 130 mg/L, evitando problemas de turbidez y sedimentación; y el valor de aceites y grasas (<0,3 mg/L) cumple ampliamente el máximo de 30 mg/L. Incluso la densidad (0,19 g/ml), aunque no regulada, aporta información útil para caracterizar el efluente. Estos resultados indican que el agua descargada no representa un riesgo físico-químico significativo para el cuerpo receptor.

No obstante, el incumplimiento en materia microbiológica es determinante. El Libro VI del TULSMA establece la obligación de los operadores de sistemas de descarga de asegurar el cumplimiento de los parámetros mediante medidas de tratamiento y control. En este caso, los resultados muestran la necesidad urgente de reforzar el proceso de desinfección.

6.1.3 Análisis de la temporalidad del caudal

El cárcamo de almacenamiento fue caracterizado como un pozo cilíndrico de 3.20 m de diámetro, y su área en planta fue calculada en 8.0425 m². La cota de base fue fijada en 274.10 m y la cota de arranque de la primera bomba fue establecida en 274.45 m, por lo que la lámina útil de almacenamiento fue determinada en 0.35 m. Con esos parámetros, el volumen disponible entre la base y el nivel de arranque fue cuantificado en 2.8149 m³.

El ascenso del nivel hasta el arranque fue producido en un periodo de 2 días (48 h); considerando que para 2025 se dispone de una población de diseño de 575 habitantes y que mediante monitoreo operacional del cárcamo (seguimiento del incremento de nivel hasta la cota de arranque) se registró el tiempo de llenado del volumen útil, el caudal promedio afluente se obtuvo a partir del balance volumen–tiempo, resultando de aproximadamente 0.05864 m³/h. Ese mismo valor fue expresado en unidades operativas como 58.64 L/h, 0.977 L/min y 0.0163 L/s. En términos relativos, la afluencia representó alrededor de 0.5 % de una capacidad de impulsión típica de 3.15 L/s, de modo que el aporte entrante fue clasificado como muy bajo frente a la capacidad de la bomba.

Como verificación operativa, el volumen útil calculado fue contrastado con una bomba que entregó un caudal del orden de 3.15 L/s. Considerando la afluencia media, el tiempo de vaciado por ciclo fue estimado en aproximadamente 15 min y la velocidad de descenso del nivel fue del orden de 1.40 m/h, coherente con la reducción de 0.35 m en torno a un cuarto de hora. Con ello, fue corroborado que el régimen de explotación fue configurado como ciclos de acumulación prolongada y descarga breve: el tiempo de retención hidráulica fue mantenido en 48 h, el número esperado de maniobras fue ubicado en 0.5 arranques/día, es decir, un arranque cada 2 días y el volumen evacuado por ciclo coincidió con el volumen útil de almacenamiento previamente determinado.

Adicionalmente, debido a que el sistema fue operado con una afluencia baja y con periodos prolongados de retención hidráulica, fue identificado un riesgo potencial de sedimentación de sólidos en el fondo del cárcamo y de generación de olores por condiciones anóxicas o sépticas. Este comportamiento fue considerado consistente con

los tiempos de permanencia elevados y con la baja renovación de agua, por lo que la eficiencia hidráulica del sistema pudo verse comprometida en escenarios de operación continua.

6.1.4 Análisis de la succión neta positiva en contraste con la eficiencia del sistema.

La evaluación de la altura neta de succión positiva (NPSH) es un parámetro fundamental para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de bombeo. El análisis de NPSH ayuda a determinar la capacidad real del sistema para prevenir la cavitación y asegurar un funcionamiento estable. Esta sección explica la NPSH en el contexto de la eficiencia general del sistema.

Tabla 6.4. Resultados succión neta positiva disponible y requerida.

Parámetros	Resultados	Unidades
hsp	10.03	mca
hs	0.35	mca
hf	2.98	m
hvp	0.24	m
NPSH_A	7.16	m
NPSH_R	0 - 1	m

Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo numérico de cálculo (Anexo B). Elaborado por: Ruiz (2026)

En base a la **Tabla 6.4**, para el caso analizado, la presión absoluta disponible en la zona donde se encontraba la bomba se estableció en 10.03 mca, la cual representaba la inmersión efectiva y la presión estática ejercida por la columna de agua. La carga estática adicional fue determinada como positiva y tuvo un valor de 0.35 mca debido a que la bomba se hallaba sumergida por debajo del nivel del líquido. A su vez, las pérdidas de carga en el sistema de succión fueron estimadas en 2.98 m, incluyendo tanto las pérdidas distribuidas como las pérdidas singulares ocasionadas por rejillas, codos y la entrada al impulsor. Finalmente, la carga por presión de vapor del agua, correspondiente a las condiciones de temperatura de operación, se estableció en 0.24 m. Al combinar todos estos términos, el valor de la NPSH disponible resultó de 7.16 m, lo cual representó la presión neta remanente sobre la presión de vapor del fluido en el ojo del impulsor.

Posteriormente, los resultados fueron interpretados en función de la comparación con la succión neta positiva requerida (NPSH_r) indicada por el fabricante. De acuerdo con los

criterios técnicos aplicados, se consideró que el sistema sería seguro siempre que la NPSH disponible superara a la NPSH requerida en al menos 0.5 a 1.0 m o en un rango de 10 a 20 %. Finalmente, fue considerado que, al tratarse de una bomba sumergible, la NPSH requerida pudo ser cercana a cero, debido a que la instalación bajo el nivel del líquido eliminó dos de los factores más influyentes que reducen la NPSH en bombas convencionales: la altura de succión estática y la pérdida de carga por fricción en la tubería de succión. En este caso, la bomba se encontró completamente inmersa, por lo que la presión en la entrada del impulsor fue superior a la atmosférica gracias al peso de la columna de agua que se encontraba encima. Esta condición favoreció la operación hidráulica y permitió que la cavitación fuera prácticamente inexistente. En consecuencia, la comparación entre la NPSH disponible de 7.16 m y la requerida, que en bombas sumergibles pudo considerarse mínima o prácticamente nula, evidenció que la instalación presentó un margen muy holgado de seguridad hidráulica, lo cual aseguró un funcionamiento eficiente y libre de fenómenos de cavitación.

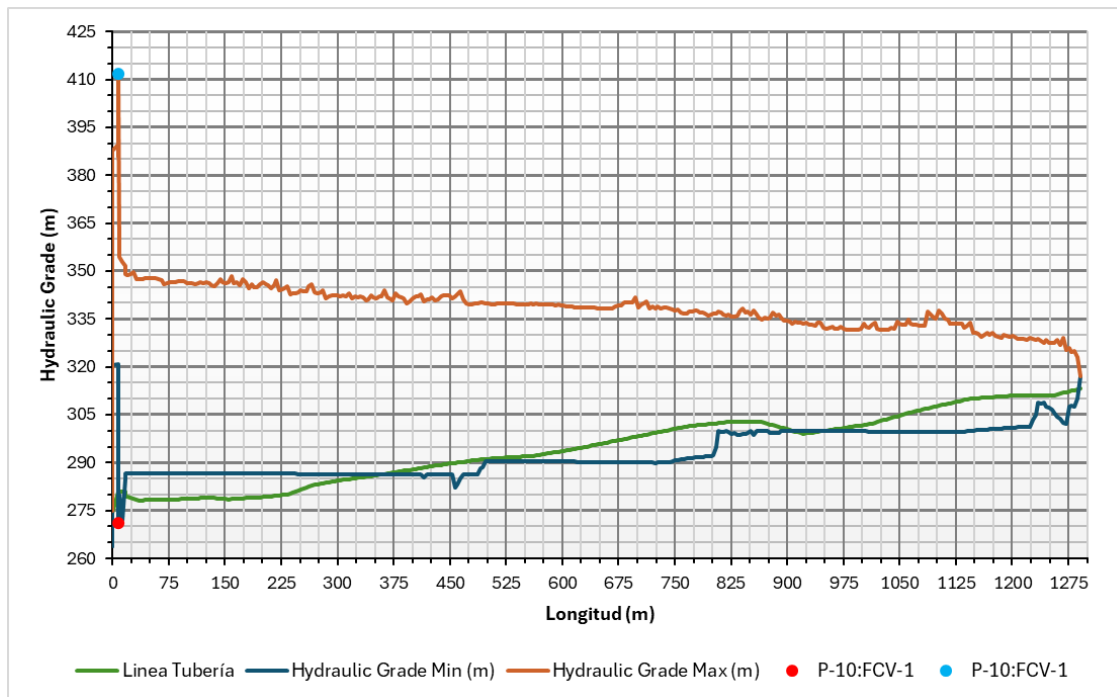
6.1.5 Resultados Flujo no permanente (escenarios transitorios)

El análisis de flujo no estacionario permite evaluar el comportamiento del sistema en condiciones transitorias, donde las variables operativas varían con el tiempo. Es de esta manera que la sección a continuación presenta los resultados de las simulaciones transitorias y su impacto en el rendimiento del sistema.

6.1.5.1 *Caso I: Cierre súbito de válvulas*

6.1.5.1.1 Perfil gradiente hidráulica

Figura 6.9. Perfil gradiente hidráulica Caso I



Nota: La información destaca los valores de gradiente hidráulica para el caso de cierre súbito de válvulas. Elaborado por: Ruiz (2026)

Tabla 6.5. Valores máximos – mínimos de la gradiente hidráulica Caso I

Punto	Distancia (m)	Gradiente Hidráulica (m)
P-10: FCV-1	7.86	411.68
P-10: FCV-1	7.86	271.00

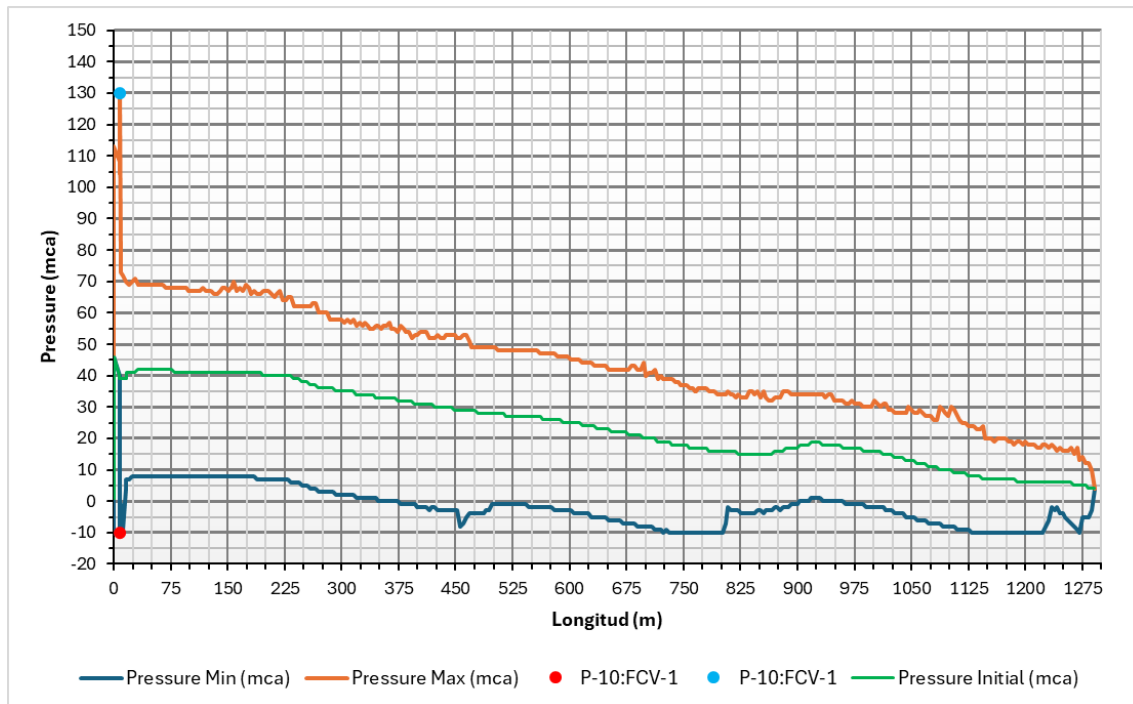
Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo de Hammer para el Caso I. Elaborado por: Ruiz (2026)

6.1.5.2 Análisis Caso I: Cierre súbito de válvulas

El cierre repentino de la válvula fue considerado con un tiempo de cierre de 0.1 s al 100 %, y en ese contexto se registraron en **Figura.6.9** para el nudo P-10: FCV-1 ($x = 7.86$ m) dos gradientes hidráulicos expresados en la **Tabla 6.5** de 411.68 m y 271.00 m, lo que representó un incremento transitorio de 140.68 m de carga en dicho punto. Al haberse impuesto un tiempo de cierre tan corto frente al tiempo de propagación de la onda, la energía cinética del flujo fue transformada de forma casi instantánea en carga piezométrica, por lo que la onda de presión fue generada y propagada con elevada celeridad.

6.1.5.2.1 Perfil sobrepresiones

Figura 6.10. Perfil presiones Caso I



Nota: La información destaca las sobrepresiones para el caso de cierre súbito de válvulas. Elaborado por: Ruiz (2026)

Tabla 6.6. Valores máximos – mínimos de las sobrepresiones Caso I

Punto	Distancia (m)	Presión MAX-MIN (mca)
P-10: FCV-1	7.86	130
P-10: FCV-1	7.86	-10

Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo de Hammer para el Caso I. Elaborado por: Ruiz (2026)

La magnitud del pico ($\Delta H = 130$ mca) fue interpretada como una sobrepresión significativa que superó con holgura la condición de régimen permanente y que implicó riesgo elevado de daño por sobrepresión en la válvula, tubería y uniones inmediatas. Además, se observó que la onda tuvo capacidad de reflejarse y amplificarse en discontinuidades geométricas, por lo que la integridad estructural pudo haber quedado comprometida en tramos próximos.

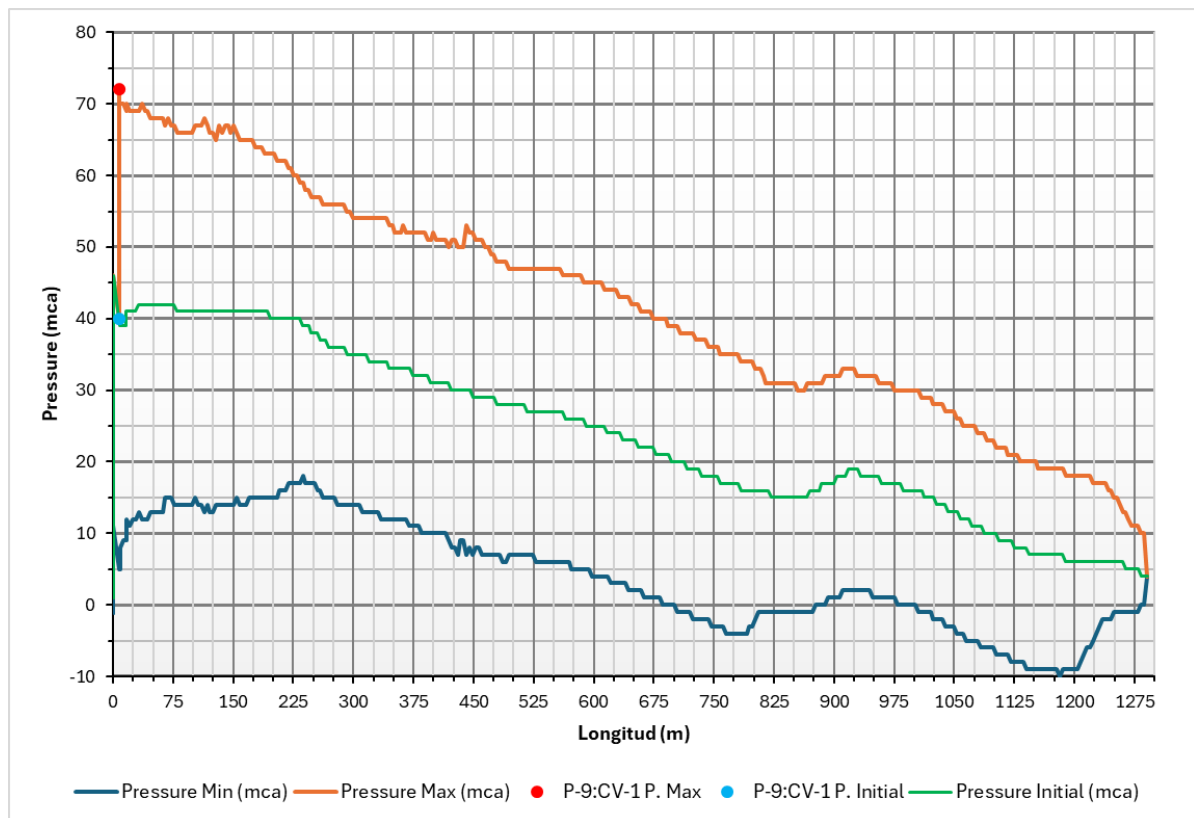
Se consideró que la tubería del sistema fue de 16 bar (PN-16), equivalente a ≈ 163.15 m.c.a (1 bar ≈ 10.197 m.c.a) o 1,600 kPa, y los resultados transitorios previos fueron comparados con esa capacidad nominal: a partir de la **Tabla 6.6** se pudo observar el pico

de sobrepresión registrado en P-10 de 130 m.c.a ($\approx 1,274.9$ kPa ≈ 12.75 bar) permaneció por debajo de la presión nominal de la tubería (16 bar), dejando un margen teórico de ≈ 33.15 m.c.a (≈ 325.1 kPa ≈ 3.25 bar). No obstante, se señaló que dicha comparación fue realizada únicamente a nivel de capacidad nominal y que la resistencia real a fallos fue condicionada por factores adicionales (temperatura de servicio, envejecimiento del material, calidad de las uniones, accesorios, y factores de seguridad establecidos por la norma), por lo que no se consideró que la ausencia de sobrecarga nominal invalidara la necesidad de mitigación. Además, la depresión mínima observada en la **Tabla 6.6** de -10 m.c.a (≈ -98.07 kPa ≈ -0.98 bar), fue interpretada como una condición subatmosférica crítica que favoreció la separación de columna y la cavitación, riesgos que podían provocar daños aun cuando la presión positiva máxima hubiera estado dentro de la capacidad nominal.

6.1.5.3 Caso II: Apagado repentino de bomba

6.1.5.3.1 Perfil sobrepresiones

Figura 6.11. Perfil presiones Caso II



Nota: La información destaca las sobrepresiones para el caso apagado repentino de bombas. Elaborado por: Ruiz (2026)

Tabla 6.7. Valores máximos – mínimos de las sobrepresiones Caso II

Punto	Distancia (m)	Presión MAX (m H ₂ O)	Presión inicial (mca)
P-9: CV-1	7.65	72	40
P-8: PMP-1	0.28	46	46

Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo de Hammer para el Caso II. Elaborado por: Ruiz (2026)

6.1.5.4 Análisis Caso II: Apagado repentino de bombas

En el caso II, descrito por la **Figura.6.11** el evento transitorio fue originado por un apagado repentino de las bombas con un patrón instantáneo y sin variador de frecuencia, aplicado en un tiempo de apagado de 0.1 s con un factor igual a 1 (100%), lo que generó un cambio abrupto en las condiciones hidráulicas de la línea de impulsión. A partir de la **Tabla 6.7**, se identificó que en el punto P-9: CV-1, ubicado a 7.65 m, la presión inicial fue de 40 m.c.a (≈ 392.3 kPa ≈ 3.92 bar) y la presión máxima alcanzada fue de 72 m.c.a (≈ 706.2 kPa ≈ 7.06 bar) representando un incremento transitorio de 32 m.c.a (≈ 313.9 kPa ≈ 3.14 bar). Este aumento no se produjo de forma instantánea tras el apagado, sino que alcanzó su valor máximo a los 10 s de simulación, momento en el que se registró el retorno de la onda de golpe de ariete, evidenciando así el efecto reflejado de la sobrepresión aguas abajo sobre el punto de la válvula de retención. La magnitud y el momento de este pico indicaron un comportamiento característico de sistemas cerrados con válvula check activa, en los que la energía cinética del fluido es reflejada y concentrada en puntos de control hidráulico.

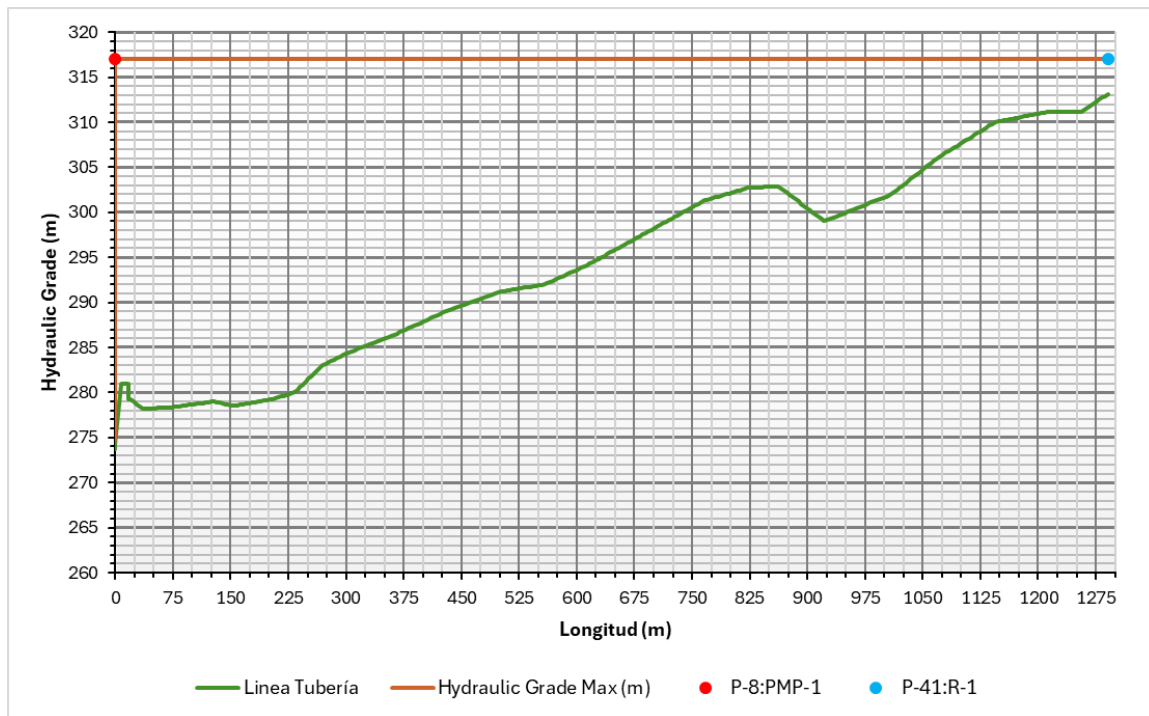
Es importante destacar que esta sobrepresión máxima fue soportada principalmente por la válvula check, la cual se activó de forma adecuada, evitando que la onda se propagara hacia la bomba. Esta condición fue verificada al no registrarse incrementos de presión en el punto P-8: PMP-1, ubicado a 0.28 m, donde la presión permaneció constante en 46 m.c.a (≈ 470.9 kPa ≈ 4.71 bar) (**Tabla 6.7**). La estabilidad en este nodo confirmó que la válvula check actuó como elemento disipador y de protección hidráulica, evitando sobrecargas en la unidad de impulsión.

Si bien el valor máximo de presión (72 m.c.a) permaneció por debajo de la presión nominal de la tubería PN-16 (163.15 m.c.a), lo que proporcionó un margen de seguridad de aproximadamente 91.15 m.c.a (≈ 894 kPa ≈ 8.9 bar), la rapidez y la magnitud de la onda evidenciaron un riesgo potencial por esfuerzos repetitivos si estos eventos transitorios ocurren con frecuencia.

6.1.5.5 Caso III: Encendido súbito de bomba

6.1.5.5.1 Perfil gradiente hidráulica

Figura 6.12. Perfil gradiente hidráulica Caso III



Nota: La información destaca los valores de gradiente hidráulica para el caso de encendido súbito de bomba. Elaborado por: Ruiz (2026)

Tabla 6.8. Valores de la gradiente hidráulica Caso III

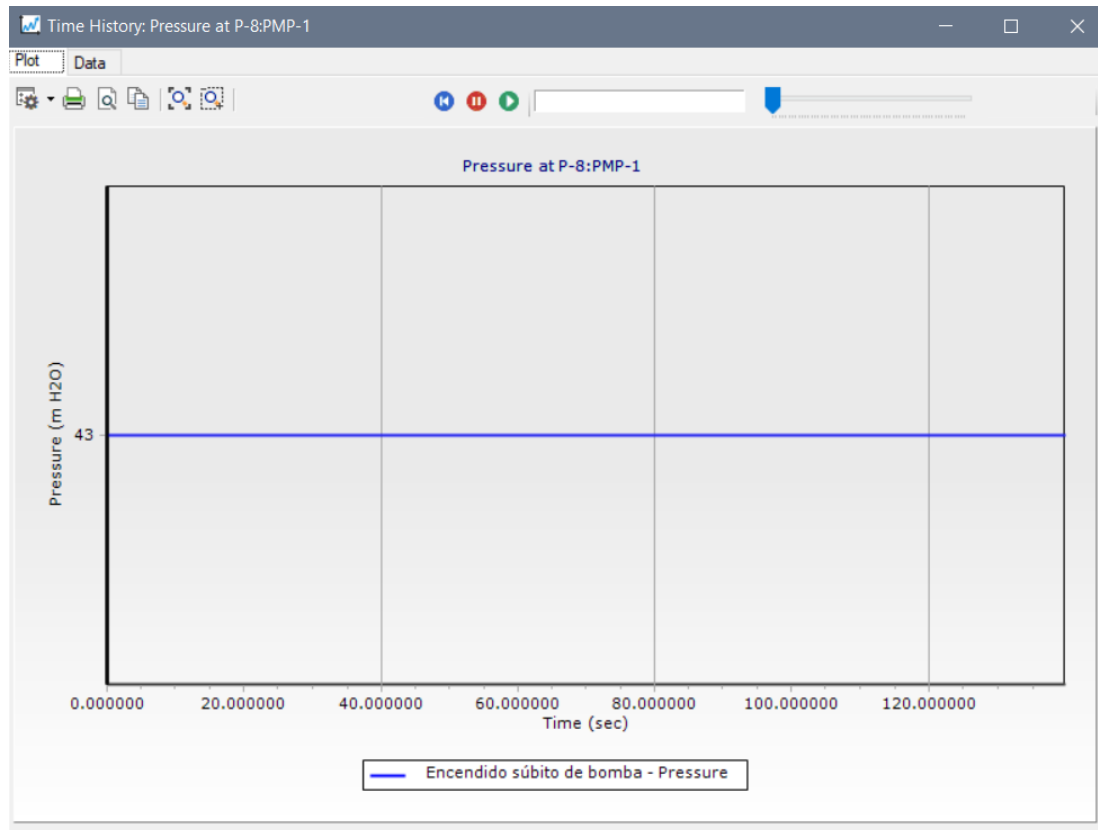
Punto	Distancia (m)	Gradiente Hidráulica (m)
P-8: PMP-1	0.28	317.00
P-41: R-1	1291	317.00

Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo de Hammer para el Caso III. Elaborado por: Ruiz (2026)

Para el Caso III, A partir de la **Tabla 6.8** en un arranque súbito sin variador de frecuencia desde rpm = 0, la respuesta inicial del sistema queda gobernada por la inercia de la columna de agua y del conjunto rotor–fluido junto con las condiciones de contorno (niveles en reservorios y elementos rígidos), por lo que en los primeros décimos de segundo la línea piezométrica se comporta casi “rígida” y la gradiente hidráulica se mantiene uniforme entre los puntos inicial y final (P-8 y P-41), reflejando que aún no existe aceleración efectiva del caudal ni cabeza útil entregada por la bomba

6.1.5.5.2 Gráfica presión en el nodo P-8: PMP-1

Figura 6.13. Gráfica presión en el nodo P-8: PMP-1



Nota: La información destaca los valores de presión constante en el nodo P-8: PMP-1 para el caso de encendido súbito de bomba. Elaborado: Tomado de Hummer.

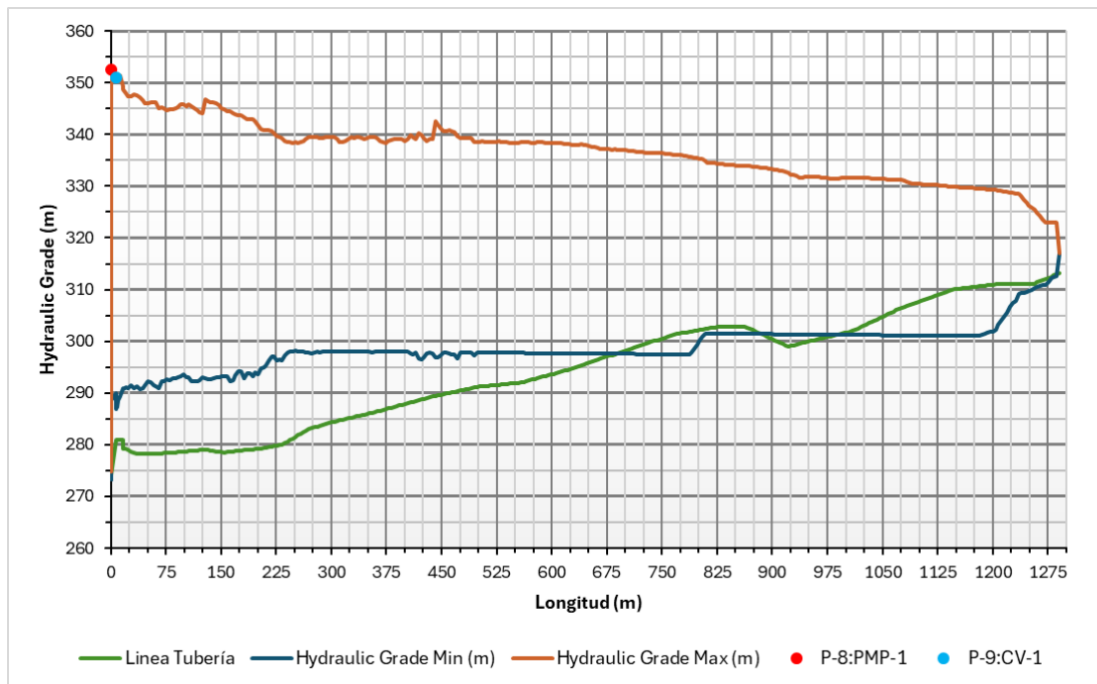
En el intervalo (P-8 y P-41) , la presión en el punto de la bomba permanece en su valor máximo constante de 43 m.c.a (**Figura.6.13**) porque el impulsor, a baja velocidad angular, no ha transferido energía específica al fluido y el estado local está dominado por la carga geodésica y la impedancia hidráulica del sistema, mientras que cualquier perturbación se propaga como ondas de presión cuya celeridad está limitada por la compresibilidad efectiva del agua y la deformabilidad de la tubería, sin alcanzar todavía el extremo de la línea.

A medida que el rotor acelera y crece el caudal, la máquina empieza a desarrollar cabeza, se rompe la uniformidad de la gradiente y se establece un perfil piezométrico con descenso de presión a lo largo de la conducción por pérdidas distribuidas (Darcy-Weisbach) y menores, de modo que el valor de 43 m.c.a en la cercanía de la bomba empieza a disminuir progresivamente aguas abajo, superponiéndose a ello las oscilaciones transitorias propias del régimen no estacionario hasta que el sistema alcanza un estado estable.

6.1.5.6 Caso IV: Flujo inverso

6.1.5.6.1 Perfil gradiente hidráulica

Figura 6.14. Perfil gradiente hidráulica Caso IV



Nota: La información destaca los valores de gradiente hidráulica para el caso flujo inverso. Elaborado por: Ruiz (2026)

Tabla 6.9. Valores máximos – mínimos de la gradiente hidráulica Caso IV

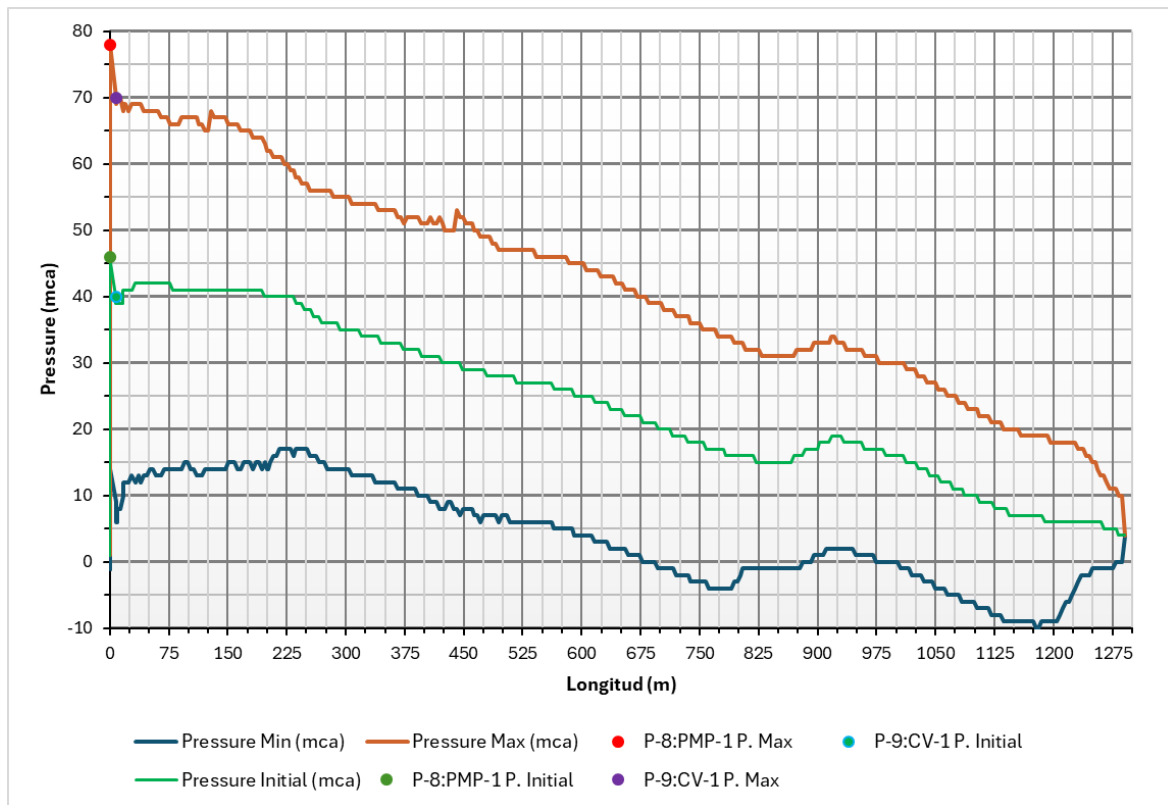
Punto	Distancia (m)	Gradiente Hidráulica (m)
P-8: PMP-1	0.28	352.62
P-9: CV-1	7.65	350.98

Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo de Hammer para el Caso IV. Elaborado por: Ruiz (2026)

Para el Caso IV, en flujo inverso con la check configurada para activarse después de la llegada de la primera onda, el contorno bomba–válvula permanece momentáneamente “abierto” a la reflexión y se comporta como una frontera de alta impedancia de modo que la onda incidente encuentra una resistencia hidráulica grande y se refleja en compresión (coeficiente de reflexión positivo). Por eso, aun cuando al inicio la HGL se mantiene casi rígida por inercia.

6.1.5.6.2 Perfil sobrepresiones

Figura 6.15. Perfil presiones Caso IV



Nota: La información destaca las sobrepresiones para el caso de flujo inverso. Elaborado por: Ruiz (2026)

Tabla 6.10. Valores máximos – mínimos de las sobrepresiones Caso IV.

Punto	Distancia (m)	Presión MAX (m H ₂ O)	Presión inicial (mca)
P-8: PMP-1	0.28	78	46
P-9: CV-1	7.65	70	40

Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo de Hammer para el Caso II. Elaborado por: Ruiz (2026)

Las presiones iniciales son moderadas (46 m.c.a en P-8: 0.28 m y 40 m.c.a en P-9: 7.65 m) (Tabla 6.10), a medida que las ondas van y vienen por la línea con tiempos y superposiciones sucesivas, la energía se acumula en el entorno bomba-check. El máximo se observa \approx a los 15 s cuando el retorno de una onda de compresión coincide con el todavía incompleto cierre de la check y con el “empuje” del flujo inverso hacia la bomba: ahí se registran las presiones pico de 78 m.c.a en P-8 y 70 m.c.a en P-9 (Tabla 6.10), que son soportadas mayoritariamente por la propia bomba y la válvula check. Esa concentración de esfuerzos en la frontera explica que no se vean incrementos aguas

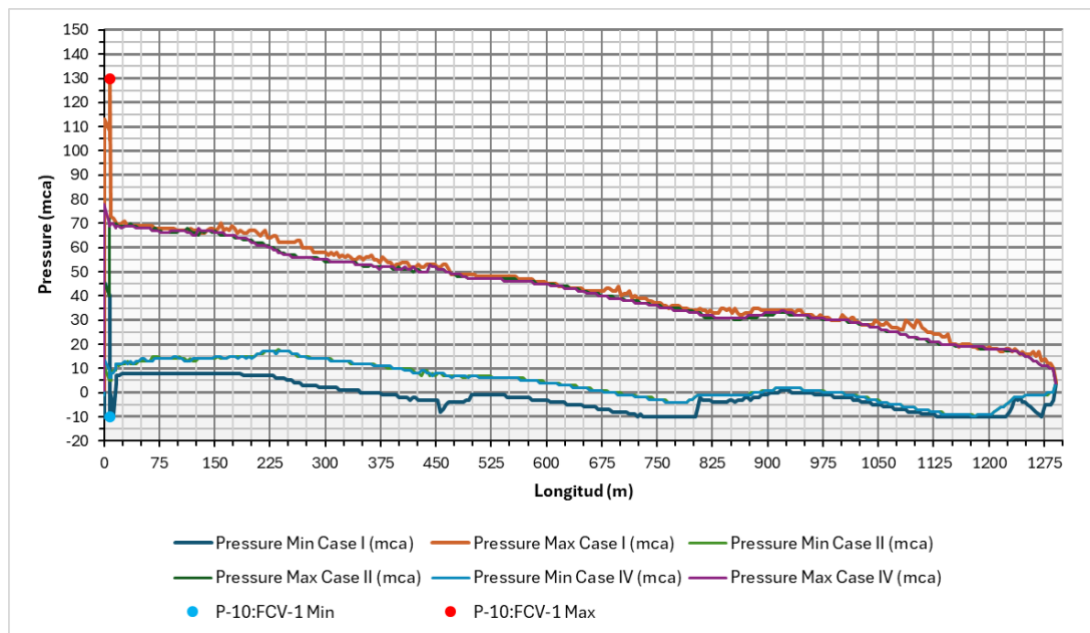
abajo con la misma magnitud, ya que parte del pulso se refleja y otra parte se disipa en pérdidas distribuidas y locales.

El perfil de presión decrece por pérdidas (Darcy–Weisbach y menores) y por la transmisión parcial de las ondas, pudiendo presentarse mínimos transitorios e incluso sub-presiones en tramos distales cuando una onda de depresión se superpone con el gradiente por fricción; ello es consistente con los volúmenes puntuales de aire/vapor, observados en el perfil HGL–volumen, típicos de cavitación transitoria durante el ciclo de inversión y cierre. Una vez que la check termina de cerrar, el contorno pasa a condición prácticamente rígida, se interrumpe el flujo inverso y disminuye la posibilidad de nuevas amplificaciones en la bomba; a partir de ahí el sistema tiende al equilibrio con oscilaciones amortiguadas.

6.1.5.7 Resultados globales Caso I-IV

6.1.5.7.1 Perfil sobrepresiones

Figura 6.16. Perfil sobrepresiones globales.



Nota: La información destaca las sobrepresiones globales. Elaborado por: Ruiz (2026)

Tabla 6.11. Valores máximos – mínimos de las sobrepresiones Caso I-II-IV

Caso I		
Punto	Distancia (m)	Presión MAX-MIN (mca)
P-10: FCV-1	7.86	130

P-10: FCV-1	7.86	-10
Caso II		
P-9: CV-1	7.65	72
P-8: PMP-1	0.28	46
Caso IV		
P-8: PMP-1	0.28	78
P-9: CV-1	7.65	70

Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo de Hammer para el Caso I-II-IV. Elaborado por: Ruiz (2026)

A partir de la **Tabla 6.11**, se identificaron las sobrepresiones de mayor magnitud en el Caso I, correspondiente al cierre súbito de la válvula, donde se registró una presión máxima de 130 m.c.a y una mínima de -10 m.c.a. En el análisis global de los casos I, II y IV, se evidenció que este escenario generó las mayores oscilaciones transitorias dentro del sistema, atribuibles a la brusca interrupción del caudal y a la consiguiente onda de sobrepresión reflejada a lo largo de la línea de impulsión, lo que indicó un comportamiento más crítico desde el punto de vista hidráulico transitorio.

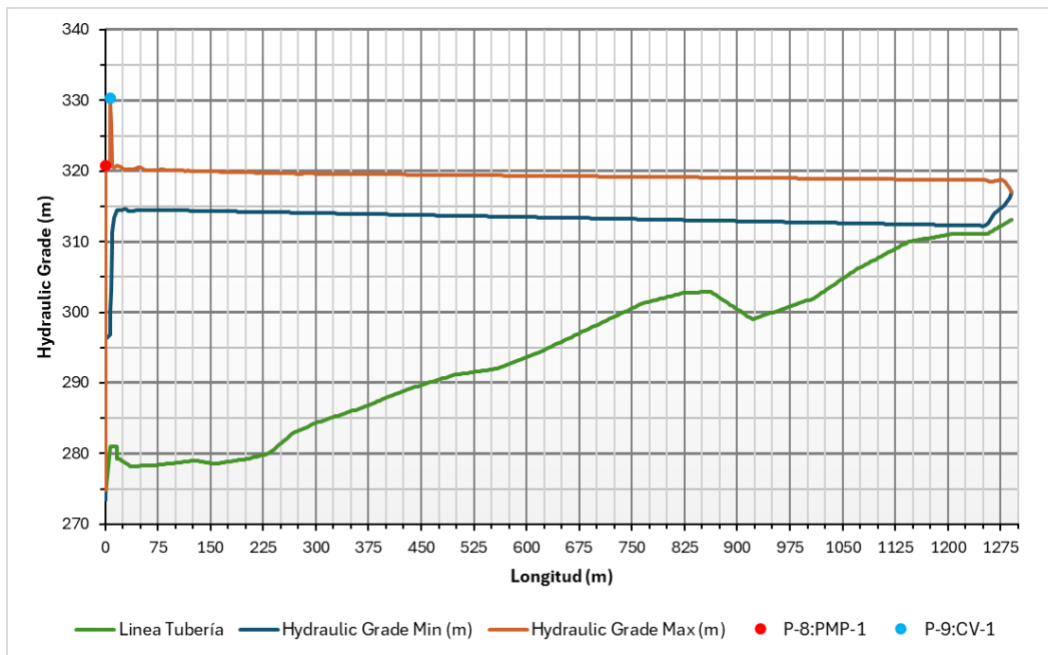
6.1.6 Resultados para medidas de protección

Finalmente, este acápite permite determinar si el sistema es capaz de responder a situaciones críticas y prevenir fallos operativos. Estos resultados demuestran el rendimiento de los dispositivos de protección y su eficacia en situaciones de riesgo.

6.1.6.1 Tanque Hidroneumático

6.1.6.1.1 Perfil gradiente hidráulica

Figura 6.17. Perfil gradiente hidráulica Tanque Hidroneumático



Nota: La información destaca los valores de gradiente hidráulica para el tanque hidroneumático. Elaborado por: Ruiz (2026)

Tabla 6.12. Valores máximos – mínimos de la gradiente hidráulica tanque hidroneumático

Punto	Distancia (m)	Gradiente Hidráulica (m)
P-8: PMP-1	0.28	320.75
P-9: CV-1	7.65	330.27

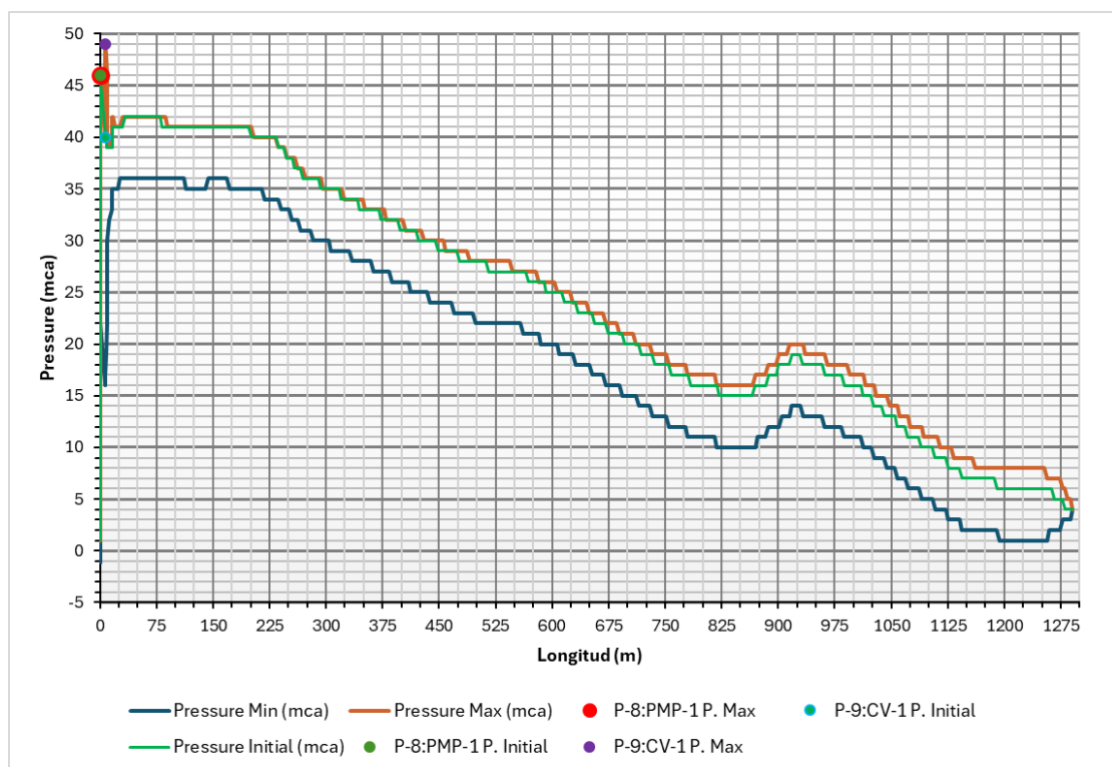
Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo de Hammer para el tanque hidroneumático. Elaborado por: Ruiz (2026)

El uso de un tanque hidroneumático dentro de un sistema de impulsión permitió controlar de manera efectiva tanto las sobrepresiones positivas como las depresiones o presiones negativas que se generaron durante eventos transitorios. Este elemento actuó como un amortiguador hidráulico al absorber el exceso de energía cuando la presión se elevó bruscamente, por ejemplo, durante un arranque instantáneo de las bombas y liberar dicha energía cuando la presión disminuyó, estabilizando así la línea de gradiente hidráulica y evitando la separación de columna. De esta forma, el tanque

no solo protegió la integridad de la tubería y accesorios, sino que también redujo el riesgo de cavitación y daños estructurales en la bomba y en el sistema de conducción. Las características del tanque hidroneumático fueron definidas como un tanque sellado con vejiga (bladder) de 1.000 L de volumen total y 500 L de volumen líquido inicial (0,5 m³ de agua), modelado mediante la ley de gases con un exponente de 1.20, correspondiente a un comportamiento ligeramente no isotérmico. La presión de gas preajustada fue de 40 m.c.a (\approx 3,92 bar), mientras que la presión atmosférica fue considerada en 10,33 m.c.a (\approx 101,3 kPa). El orificio de entrada del tanque presentó un diámetro de 25 mm y se establecieron coeficientes de pérdidas de 2,5, tanto para la razón de pérdidas como para la pérdida menor, con lo cual se incorporaron adecuadamente la inercia volumétrica y las pérdidas locales en la respuesta transitoria del sistema.

6.1.6.1.2 Perfil sobrepresiones

Figura 6.18. Perfil presiones Tanque Hidroneumático



Nota: La información destaca las sobrepresiones para el caso del tanque hidroneumático. Elaborado por: Ruiz (2026)

Tabla 6.13. Valores máximos – mínimos de las sobrepresiones tanque hidroneumático

Punto	Distancia (m)	Presión MAX (m H ₂ O)	Presión inicial (mca)
P-8: PMP-1	0.28	46	46

P-9: CV-1	7.65	49	46
-----------	------	----	----

Nota: La información presentada en la tabla fue obtenida según el modelo de Hammer para el tanque hidroneumático. Elaborado por: Ruiz (2026)

Con esta configuración, se verificó que el tanque actuó como un amortiguador efectivo de las transitorias: la energía cinética del fluido fue parcialmente absorbida por la compresión del gas en la vejiga, reduciendo así la amplitud de los picos de presión generados por el encendido y apagado instantáneo de las bombas, evitando además la aparición de presiones negativas aguas abajo que pudieran inducir separación de columna. Los resultados indicaron que la presión máxima en el punto de la bomba (P-8) alcanzó 46 m.c.a (**Tabla 6.13**), partiendo de una presión inicial de 46 m.c.a (**Tabla 6.13**), mientras que en la válvula de retención (P-9) la presión pasó de 46 a 49 m.c.a, confirmando que la válvula check actuó de forma adecuada al no registrarse aumentos en la bomba. Esta respuesta controlada demostró que el tanque hidroneumático redujo eficazmente las sobrepresiones y sub-presiones a lo largo de la línea, manteniendo la presión dentro de un rango seguro para la tubería de 16 bar y evitando esfuerzos estructurales que pudieran comprometer su vida útil.

Los resultados obtenidos para el tanque hidroneumático muestran un comportamiento consistente con la teoría clásica del golpe de ariete (Empresa Pública de Medellín, 2013), en la que un volumen comprimido absorbe la energía cinética del fluido, reduciendo la sobrepresión y evitando la sub-presión. La estabilización del gradiente hidráulico entre 320 m y 330 m en los puntos de monitoreo confirma que el sistema respondió según lo predicho por el modelo de golpe de ariete, evitando la separación de la columna y la formación de vacíos. Teóricamente, un tanque con compresión adiabática parcial, modelada con un exponente de 1,20, mitigaría las fluctuaciones rápidas de presión, lo cual concuerda con los resultados, donde no se registró una sub-presión significativa ni un aumento repentino del gradiente.

Por otro lado, las presiones medidas en los puntos P-8 y P-9 (entre 46 y 49 m.c.a) se encuentran dentro de los límites aceptados por las normas internacionales para la protección contra transitorios. Tal es el caso de las directrices de análisis de transitorios de Sydney Water (2022). Esta estipula que los dispositivos de protección deben mantener la presión dentro de los límites estructurales de la tubería, sin exceder su presión nominal.

En definitiva, una comparación integrada entre la teoría, la normativa y los resultados del modelo demuestra que el tanque hidroneumático es una medida de protección adecuada y eficaz para el sistema de bombeo de La Belleza. Su capacidad para estabilizar la línea de gradiente hidráulico, limitar las fluctuaciones de presión y prevenir fallas relacionadas con el golpe de ariete cumple con las expectativas de un sistema bien diseñado.

Conclusiones

-
- El sistema de bombeo presentó una eficiencia hidráulica limitada debido a que la bomba MP 3127 HT3-266 operó lejos de su rendimiento máximo, alcanzando caudales entre 3,8 L/s y 4,9 L/s, en comparación con su punto de máxima eficiencia, ubicado entre 5,3 L/s y 26,5 L/s según las opciones evaluadas. De igual manera, la altura manométrica real (43-45 m) fue superior a la requerida en el rango óptimo (24-39 m), lo que indica una altura adicional que redujo la eficiencia a un bajo valor del 18,15 % (Hammer). La baja eficiencia observada significa que la bomba está funcionando fuera de su rango óptimo, lo que en la práctica conlleva un mayor consumo de energía para un menor transporte de agua.
 - El análisis del caudal de entrada reveló un caudal promedio de tan solo 0,058 m³/h (0,016 l/s), lo que corresponde al 0,5 % de la capacidad de bombeo (3,15 l/s). Esto ocasionó ciclos de bombeo con tiempos de vaciado de 15 minutos y periodos de retención de 48 horas, incrementando el riesgo de sedimentación. La calidad del agua mostró una grave infracción por coliformes fecales (>2419,6 NMP/100 ml), superando el límite de 2000 NMP/100 ml. Finalmente, El análisis NPSH mostró una disponibilidad de agua de 7,16 m³, valor significativamente superior al requerido para bombas sumergibles, lo que garantiza un funcionamiento sin cavitación. El caudal extremadamente bajo provoca que la bomba funcione en vacío de forma intermitente durante largos periodos, lo que conlleva la acumulación de sólidos y el deterioro de la calidad de las aguas residuales.
 - Las simulaciones revelaron que todas las bombas probadas operaban muy por debajo de su punto de máxima eficiencia (BEP). La bomba actual registró caudales de 3,8 litros/segundo y 43 metros, y de 4,9 litros/segundo y 45,25 metros, mientras que su eficiencia máxima era de 5,3 litros/segundo y 39,3 metros, lo que afectó su rendimiento. Las opciones de mayor diámetro mostraron discrepancias aún mayores, alcanzando caudales de 9,7 litros/segundo y 62,7 metros en comparación con un BEP de 105 litros/segundo y 42 metros, lo que indica claramente un consumo excesivo de energía y una subutilización de la capacidad. En la práctica, este resultado implica que el sistema utiliza bombas que no solo operan fuera de su rango óptimo, sino que también consumen más energía de la necesaria para suministrar un caudal significativamente menor en relación con su potencia nominal.
 - El escenario mayormente ponderante y/o importante fue el cierre repentino de las válvulas (Caso I), durante el cual se midió una sobrepresión máxima de 130 m.c.a y una presión mínima de -10 m.c.a, lo que suponía un riesgo de desintegración de la columna. La parada repentina de la bomba (Caso II) provocó un aumento transitorio de 32 m.c.a a 72 m.c.a, que, sin embargo, se mantuvo dentro de los límites de la tubería PN-16 (163,15 m.c.a). Durante el flujo de retorno (Caso IV), se observaron valores máximos de 78 m.c.a en P-8 y de 70 m.c.a en P-9. Es de esta manera que la instalación de un depósito hidroneumático redujo significativamente estas fluctuaciones, limitando la presión máxima a 46 m.c.a en P-8 y a 49 m.c.a en P-9, lo que demuestra una mitigación eficaz de los eventos transitorios.
 - El estudio careció principalmente de disponibilidad y representatividad de datos operativos, ya que los caudales de entrada registrados fueron muy inferiores a
-

la capacidad instalada del sistema, lo que limitó la extrapolación de los resultados a escenarios de mayor demanda. Asimismo, el análisis se centró en evaluaciones hidráulicas, energéticas y transitorias del sistema de bombeo, sin considerar en detalle los aspectos económicos, sociales o institucionales que también inciden en la gestión integral del saneamiento.

- La investigación proporciona evidencia técnica cuantitativa del impacto negativo de operar bombas por encima de su punto máximo de eficiencia. Demuestra que esta condición conlleva una reducción de la eficiencia hidráulica, un mayor consumo de energía y mayores requisitos de mantenimiento. El estudio también incluye análisis de estado estacionario y transitorio, identificando condiciones críticas como cierres repentinos de válvulas y evaluando la eficacia de dispositivos de protección, como depósitos hidroneumáticos, para mitigar la sobrepresión.
- Los hallazgos tienen importantes implicaciones para la ingeniería hidráulica en la Amazonía, donde las pendientes suaves, las variaciones estacionales del caudal y las duras condiciones ambientales dificultan el funcionamiento eficiente de los sistemas de saneamiento. El estudio destaca la necesidad de adaptar la selección de bombas y las estrategias operativas a los caudales reales, así como de incorporar análisis transitorios y sistemas de protección hidráulica en las primeras etapas del diseño.

Recomendaciones

- Se recomienda socializar la selección de la bomba para que los involucrados en las instalaciones consideren el caudal real del sistema y con base en esta aproximación se reinterprete la altura de elevación enfocando en que el funcionamiento se aproxime al punto de máxima eficiencia.
- Además, debe optimizarse la gestión del caudal mediante la comprobación de conexiones, fugas u otros problemas en la red. Asimismo, deben implementarse sistemas de homogeneización o lavado para evitar la permanencia prolongada del agua y reducir la sedimentación.
- Con base en el modelo se recomienda profundizar para posteriores trabajos el análisis del sistema teniendo en cuenta los nuevos diámetros impulsión, las bombas adaptadas, evaluando cada combinación hasta encontrar una curva que garantice la mínima pérdida de energía considerando en todo momento el tema presupuestario.
- Finalmente, el tanque hidroneumático debe mantenerse como una medida permanente y complementarse con válvulas de alivio de presión, sensores de presión y análisis transitorios regulares para garantizar que su rendimiento se mantenga dentro de límites seguros.

Referencias

- Martínez, P., Díaz, C., & Moeller, G. (2019). Seguridad hídrica en México: diagnóstico general y desafíos principales. *Ingeniería del agua*, 23(2). <https://iwaponline.com/IA/article/23/2/107/68023/Seguridad-hidrica-en-Mexico-diagnostico-general-y>
- Aguilar, H. (2020). *Tendencias de la descentralización en América Latina en el siglo XXI: el caso de los gobiernos amazónicos en Ecuador, Bolivia y Perú*. Universidad Andina Simón Bolívar. <https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/7806>
- Alcocer, J. (2019). *Proyecto de factibilidad para la implementación de una planta procesadora de pasta de cacao en la parroquia La Belleza, cantón Francisco de Orellana, provincia de Orellana, periodo 2018*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13603>
- Alfárez, L., y Nieves, N. (2019). *Plantas de tratamiento de aguas residuales (ptar): impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/06/tratamiento-aguas-residuales.html/hdl.handle.net/20.500.11763/caribe1906tratamiento-aguas-residuales>
- Amau, C. (2023). *Análisis comparativo en eficiencia de tuberías acorrojadas y macizos de anclaje, para soportar esfuerzos de empuje en transitorio hidráulico en el proyecto sistema Vilcanota II, Cusco –2023*. Universidad Andina del Cusco. <https://repositorio.uandina.edu.pe/item/517671a9-47c6-469d-9b9d-177999b168eb>
- American Water Works. (2017). *Steel Pipe- A guide for desing and instalation*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://webstore.ansi.org/preview-pages/AWWA/preview_M11-2017_with_Errata.pdf?srsId=AfmBOop3vbTI0tagAs0CW1axGOYE45RR73ikZltrHdvsJYR2FON8ObCO&utm_source
- American Water Works- Water Distribution Systems. (2017). *Computer Modeling of Water Distribution Systems*.
- Arias, J. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf
- Arzuaga, J. (2020). *ANALISIS DE CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS DE BOMBEO DE AGUAS RESIDUALES*. Cartagena: Universidad industrial de Santander.
- Benavides, K., Bolaños, J., Ortega, A., & Ruiz, E. (2023). Entre tubos, operaciones y procesos: explorando sistemas de tratamiento de aguas residuales en terreno. *Boletín Informativo CEI*, 10(3). <https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/3958>
- Calles, J., y Gonzáles, P. (2011). *La Biblia del Footprinting*.
- Carreño, D. (2019). *Economía circular (EC), una herramienta para el logro de los objetivos del desarrollo sostenible (ODS)*. Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/items/1bab6bc0-c3cb-402e-bd5a-81c4f7b47834>
-

-
- Castro , J. (2021). *Tratamiento de agua residual industrial con sistema de bombeo para recirculación de agua tratada en una empresa de mantenimiento de maquinarias*, Lima, 2020. Universidad del callao. <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/6207>
- Cedeño, D. (2020). Impacto ambiental de las lagunas de tratamiento de aguas residuales. Sector Colinas San José, Ciudad de Rocafuerte. *Polo del Conocimiento*, 5(1). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7436040>
- Decreto Ejecutivo 3516. (2017). *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/TULSMA.pdf>
- Empresa Pública de Medellín. (2013). *Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín. E. S. P. Empresas Públicas de Medellín. E. S. P.* https://www.scribd.com/document/425126895/Norma-Diseno-Alcantarillado-2013-pdf?utm_source
- GAD Parroquial. (2024). <https://gaplabeledeza.gob.ec/index.php/gad-parroquial/principios-y-valores#:~:text=La%20parroquia%20LA%20BELLEZA%20en,en%20la%20regi%C3%B3n%20amaz%C3%B3nica%20nororiental>.
- Giralt, R. (2024). *Análisis de la situación hídrica de Ecuador e implementación de una alternativa*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/412296>
- Gobierno Autonomo Parroquial Rural De La Belleza. (2023). <https://conagopare-orellana.gob.ec/parroquias/detalle/parroquia-la-belleza-1/>
- Granda, B., y Chica, H. (2023). *Diseño y construcción de un sistema para el tratamiento de aguas servidas para uso agrícola mediante carbón activado y nanopartículas de cobre*. Escuela Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/20373>
- Griño , C., y Barracó, M. (1998). *Optimización de las Estrategias de Control de Redes de Transporte Hidráulico*. Universidad Politécnica de Catalunya. <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/download/2751/2733/7986>
- Guerra, G., y Logroño, S. (2019). Evaluación del impacto ambiental de los sistemas de alcantarillado sanitario y planta de tratamiento de aguas residuales en Ecuador. *Creatividad y Desarrollo*, 3(1). <https://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/view/783>
- Herrera, D., y Martinez, R. (2024). *Optimización del sistema hidráulico de bombeo para mejorar el drenaje de aguas residuales en la Minera Jardín del Sur S.A - Caravelí - Arequipa, 2023*. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/8617>
- INEC. (2022). *Censo de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadística y Censos*. Ecuador.
- Jimenes , B. (2019). *Integración de los procesos agronómicos e hidráulicos del riego a presión en un entorno SIG para la gestión eficiente de comunidades de regantes*. Universitat Politècnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/4101>
- Karassik , I., Messina , J., Cooper , P., & Heald , C. (2019). *Pumb Handbook*. McGrawHill. chrome-
-

- extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.mediadars.com/wp-content/uploads/Books/PumphandbookbylgorKarassikKnovel.pdf
- Lagos, G., y Lascano, S. (2021). *Prevalencia de parásitos gastrointestinales en bovinos de 12 a 36 meses de edad en la parroquia La Belleza, cantón Francisco de Orellana*. <http://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/16275>
- Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (LORHUyA). (2014). <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>
- Liu, G., Deng, Y., & Liu, Z. (2024). Potential risks in balancing flexibility and investment of pumped storage plants: Hydraulic disturbances during transient processes in parallel operation of fixed-speed and variable-speed units sharing a diversion tunnel. *Journal of Energy Storage*, 88(30). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X24010685>
- Martínez, N. (2021). *Diseño del sistema integral de saneamiento básico contribuyendo a mejorar la calidad de vida del distrito de Talavera, Andahuaylas, Apurímac*. Universidad Cesar Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/74723>
- (2019). *Ministerio de Medio Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE)*. <https://www.ambiente.gob.ec/>
- Montero, F., Molina, C., Santana, K., & Sarduy, L. (2020). Evaluación del impacto ambiental de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales. Caso río Pindo Chico, Puyo, Pastaza, Ecuador. *Revistas Académicas*, 3(1). <https://revistas.intec.edu.do/index.php/cienacli/article/view/1803>
- Payano, H. (2023). *Implementación de un sistema de automatización para mejorar el control de pH en la planta de tratamiento de aguas residuales ubicado en la estación 19 del Metro 2 de Lima*. Universidad Tecnológica del Perú. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/7976>
- Pedreira, L. (2023). *Cálculos hidráulicos y modelado de una estación depuradora de aguas residuales con software Allievi*. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/77516>
- (2018). *Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT)*. <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/08/Folletos-autoridades-provinciales.pdf>
- Quimper, L., Ñaupari, G., & Chinchay, M. (2023). *Los proyectos de inversión pública para mejorar la infraestructura y servicios de las instituciones educativas del Perú*. <https://dilemascontemporaneoseduccionpoliticayvalores.com/index.php/dilemas/article/view/3676>
- Ramos, G. (2023). *Diseño de sistema de evacuación de agua residuales de una vivienda multifamiliar en la ciudad de El Alto*. Universidad Mayor de San Andrés. <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/33528>
- (2015). *Reglamento para el Control de la Contaminación de los Recursos Hídricos (RCCRH)*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Reglamento-Ley-Recursos-Hidricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>
- Sampieri, R. (2020). *Metodología de la Investigación*. McGrawHill. <https://bit.ly/3V4KwgJ>

-
- Sánchez , F. (2020). *Metodología para el diseño de estaciones de bombeo basado en el método AHP*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/146817>
- Sydney Water. (2022). *Sydney Water Transient Analysis Guideline D0002125*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.sydneywater.com.au/content/dam/sydneywater/documents/transient-analysis-guideline.pdf?utm_source
- Tapia, J. (2020). La sostenibilidad del concepto de Desarrollo Sostenible. ¿Cómo hacerlo operativo? *UDA AKADEM*, 6(1). <https://udaakadem.uazuay.edu.ec/article/view/320>
- Vega , I. (2022). *Estudio de los beneficios hidrológicos en función de las prácticas de reforestación y forestación de áreas degradadas en zona de recarga de la subcuenca del Río Teaone en Esmeraldas, Ecuador*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/11894>
- Yan, J., Zhang , H., Wang, Y., & Zhu , Z. (2024). Pump-stopping-induced hydraulic oscillations in long-distance district heating system: Modelling and a comprehensive analysis of critical factors. *Energy*, 294(1). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544224005917>
- Zhilong . (2019). *Centrifugal pump selection and characteristics*. https://www.zhilong-pump.com/article/Industry-Knowledge/692.html?utm_source

Anexos

Anexo A. Informe de laboratorio



INFORME DE ENSAYO N° 21 710 a

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

Coca, 19 de mayo de 2025

Empresa:	RUIZ SANDOVAL CRISTHIAN DANILO.			
Solicitado por:	Ing. Danilo Ruiz.	Dirección:	Orellana.	
Toma de muestra:	Técnico Laboratorio AQLAB Ing. Rolando Zapata.	Fecha y Hora:	2025-05-14	9:45
Identificación de la muestra:	Agua Ingreso Carcamo de Bombeo, Locación La Belleza.			

Coordenadas UTM:	x: 272284
18M	y: 9927439

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

Fecha y hora ingreso al Laboratorio:	2025-05-14	10:00
Fecha Final de Análisis:	2025-05-19	

Condiciones Ambientales	T max: 32°C
	T min: 22°C

PARÁMETROS, MÉTODO / REFERENCIA y RESULTADOS

Parámetros / Análisis Solicitado	Método de Referencia ITE-AQLAB	Límite Máximo Permisible @	Unidad	Resultado	Incertidumbre (k=2)
Aceites y Grasas	EPA1664 B SM 5520 C / 36	30,0	mg/L	< 0,3	± 27 %
Coliformes Fecales	IDEXX COLILERT 18, Test Quanti-tray / 40	2 000	NMP/100ml	> 2419,6	± 20 %
Coliformes Totales	SM 9222 B / 28	**	ucf/100ml	9400	± 15%
*Densidad	SM 2540 B / 03	**	g/ml	0,19	~
Potencial hidrógeno	SM 4500-H+B / 01	6,0 a 9,0	PH	6,99	± 0,09
*Sólidos totales suspendidos	SM 2540 D / 05	130	mg/L	20,00	~

Fuente: Acuerdo Ministerial N° 097-A 04 Noviembre 2015. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua. Tabla 9 Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.
** No establecido en la tabla.

REFERENCIA Y OBSERVACIONES:

El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por El cliente.

Los límites permisibles de las Normativas (@) y los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.

Cuando la muestra es tomada por el personal de AQLAB, las condiciones de toma de muestra son controladas según el ITO-AQLAB-01, éstas no inciden en los resultados que se describen en el presente informe.

El informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo, los datos relacionados a la muestra son conforme a lo solicitado por el cliente.

Prohibida la reproducción parcial por cualquier medio sin el permiso escrito del laboratorio.




Ing. Armando Meléndrez Lara
DIRECTOR TÉCNICO
AUTORIZADO

21 710 a

Anexo B. Succión neta positiva disponible

NPSHA		
$NPSH_A = h_{sp} + h_s - h_f - h_{vp}$		
<i>h_{sp}</i>	10.03	mca
<i>h_s</i>	0.35	mca
<i>h_f</i>	2.98	m
<i>h_{vp}</i>	0.24	m
NPSHA	7.16	m