

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

OPTIMIZACIÓN DE LOS FLUJOS DE AGUAS SUPERFICIALES MEDIANTE UN NUEVO SISTEMA DE BOMBEO EN UNA MINERA DE CAJAMARCA-PERÚ, 2024

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Wilson Javier Jacobo Barreto

Cesar Augusto Bardales Diaz

Asesor:

Mg. Ing. Julián Ricardo Díaz Ruiz

<https://orcid.org/0000-0002-1870-6648>

Trujillo - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	WILBERTO EFFIO QUEZADA
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	EDUARDO MANUEL NORIEGA VIDAL
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	JULIAN RICARDO DIAZ RUIZ
	Nombre y Apellidos

Informe de Similitud



3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

A mi padre celestial, por permitirme haber logrado este objetivo, a mi madre María Teresa por darme la vida y estar pendiente de mis estudios, a mi padre Juan Andrés quien siempre estuvo conmigo orgulloso de mis proyectos y que desde el cielo me da su bendición, a mis hijas Isabel y Valeria quienes creyeron en mi desde el primer minuto que empecé este lindo camino de superación, a ellas por su bendita frase “Lo que se empieza se termina”, hoy se cumplió mi sueño.

César A. Bardales Díaz

A mi padre Hipólito Jacobo Villanueva y a mi madre María Barreto Rodríguez, por ser mi soporte y motor potente para seguir luchando por lograr mi meta, al mismo tiempo con su ejemplo de perseverancia y valentía incansable de lograr lo que se proponen, sin perder el enfoque. Por otro lado, a mis hermanos Teodomiro, Maribel, Marleny, Norma y Elizabeth quienes siempre están apoyándome en las buenas y en las malas. Por supuesto, a mi querido hijo Giovanni quién es mi compañía y mi razón de seguir adelante forjando un mejor futuro para los dos.

Wilson Javier Jacobo Barreto

Agradecimiento

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos mis profesores quienes a lo largo de estos 5 años en la universidad Privada del Norte, cada clase, cada orientación y cada palabra de aliento han sido fundamentales en mi formación profesional y personal.

Llevaré siempre en mi memoria no solo las lecciones académicas, sino también los consejos que me dieron y la fortaleza para seguir batallando día a día en cada aula de clase que compartimos con mucho respeto y cariño.

César A, Bardales Díaz

Con profunda gratitud y admiración a todos los catedráticos de la carrera de ingeniería de Minas, quienes a lo largo de 2 años y medio de tanto sacrificio y dedicación me ayudaron a seguir adelante con mis estudios, sobre todo por mi trabajo y temas familiares, a veces cuando estás analizando la posibilidad de estudiar y trabajar, sin descuidar a tu familia, parece algo imposible, pero en realidad con la calidad de maestros y amigos de la UPN me permitieron demostrarme a mí mismo que lo imposible es posible siempre y cuando uno mismo esté convencido. Así mismo, un agradecimiento especial a nuestros asesores desde el proyecto de tesis hasta la tesis final, realmente fue un arduo camino recorrido, pero con su soporte lo hicimos posible.

Mi agradecimiento especial a mi alma mater UPN que por intermedio de sus catedráticos lograron que cada día de clases sean una experiencia enriquecedora y de aprendizaje con sus modalidades virtual, remoto y presencial se ajustaron a mi situación limitada en tiempo para los estudios, pero lo logramos juntos mi segunda profesión.

Wilson Javier Jacobo Barreto

Tabla de contenidos

Índice de Tablas	7
Índice de figuras.....	8
Índice de ecuaciones	9
Resumen.....	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Realidad problemática.....	11
1.2. Antecedentes de la investigación	13
1.3. Bases teóricas	17
1.4. Justificación.....	29
1.5. Formulación del problema de investigación	29
1.6. Objetivos	30
1.7. Hipótesis General	30
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	32
CAPÍTULO III: RESULTADOS.....	40
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	57
REFERENCIAS.....	63
ANEXOS	68

Índice de Tablas

Tabla 1	Flujo de agua en las bombas durante el mes de febrero	43
Tabla 2	Flujo de agua en las bombas durante el mes de marzo	43
Tabla 3	Flujo de agua en las bombas durante el mes de abril.....	44
Tabla 4	Flujo de agua en las bombas durante el mes de mayo	44
Tabla 5	Flujo de agua en las bombas durante el mes de junio	46
Tabla 6	Flujo de agua en las bombas durante el mes de julio.....	46
Tabla 7	Flujo de agua en las bombas durante el mes de agosto.....	47
Tabla 8	Flujo de agua en las bombas durante el mes de setiembre	47
Tabla 9	Nivel de significancia del flujo de agua mediante la prueba t de Student	49
Tabla 10	Velocidad de bombeo de agua	50
Tabla 11	Nivel de significancia mediante la prueba t de Student	51
Tabla 12	Diámetro de tuberías antes de la optimización	52
Tabla 13	Diámetro de tuberías posterior a la optimización	52
Tabla 14	Nivel de significancia mediante la prueba t de Student	53
Tabla 15	Altura de bombas	56
Tabla 16	Nivel de significancia de la altura de bombas en el flujo de bombeo.....	57

Índice de figuras

Figura 1	Aguas superficiales de la unidad minera	18
Figura 2	Sistema de bombeo de la unidad minera	20
Figura 3	Determinación de NPSH	26
Figura 4	Flujómetro	35
Figura 5	Flujómetro o caudalímetro digital calibrado en la UM	41
Figura 6	Nuevo sistema de bombeo.....	42
Figura 7	Promedio mensual del flujo de agua antes de la optimización.....	45
Figura 8	Promedio mensual del flujo de agua posterior a la optimización.....	48
Figura 9	Altura actual de bombas del yacimiento minero en estudio.....	57

Índice de ecuaciones

Ecuación 1	Potencia de motor.....	21
Ecuación 2	Volumen de caudal.....	22
Ecuación 3	Masa de agua.....	23
Ecuación 4	Carga de succión positiva neta.....	25
Ecuación 5	Velocidad del flujo.....	50
Ecuación 6	Área de la tubería.....	50
Ecuación 7	Potencia hidráulica.....	54
Ecuación 8	Potencia hidráulica requerida (Ph).....	55

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo optimizar el flujo de agua superficial mediante un nuevo sistema de bombeo en una unidad minera de Cajamarca. El estudio fue de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo y diseño experimental. Se trabajó con tres bombas instaladas en una poza de captación, utilizando como instrumentos una ficha de observación y una ficha de análisis documental. Los resultados evidenciaron que la optimización del sistema de bombeo tuvo un efecto significativo en el flujo de agua superficial ($p = 0.031$). Se comprobó que el número de bombas influye directamente en el caudal, con un incremento promedio de 17 l/s ($p = 0.003$). El aumento del diámetro de tuberías de 18" a 24" permitió mejorar la capacidad de conducción ($p = 0.003$). La reducción de la altura dinámica de bombeo de 195 a 175 metros optimizó el rendimiento energético ($p = 0.004$). Finalmente, la mejora en la velocidad permitió alcanzar los 100 l/s requeridos ($p = 0.048$). Se concluye que la integración técnica de estos cuatro factores, mejora significativamente la eficiencia del flujo de agua.

Palabras Claves

Sistema de bombeo; aguas superficiales en minería, altura de bombas, diámetro de tuberías, velocidad de flujo de agua.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La gestión eficiente de los flujos de aguas superficiales es crucial para el funcionamiento de cualquier unidad minera. De acuerdo a Herrera (2021), en una unidad minera se presentan diversos desafíos relacionados con el manejo y control de estas aguas, debido a que estas requieren una adecuada gestión; ya que, a medida que se profundiza, se descubren grandes volúmenes de agua, lo que hace imprescindible la creación de un sistema de bombeo para elevarla a un nivel superior (Luna et al., 2020).

Estos sistemas se utilizan ampliamente en diversos yacimientos a nivel mundial, siendo México uno de los países donde su aplicación es más frecuente. Sin embargo, en muchas localidades se registran fallos recurrentes en los procesos de instalación, operación y mantenimiento, lo que compromete su eficiencia y eleva significativamente los costos operativos. Esta situación limita la sostenibilidad de los sistemas de bombeo a largo plazo (Rivas, 2021).

En tanto, Parisi (2023) refiere que, en una mina de Chile, el sistema de bombeo experimentaba fallos frecuentes en el funcionamiento de sus bombas y presentaba riesgos de derrumbes, además de causar impactos negativos en el medio ambiente, esto afectaba los costos operativos, generando un perjuicio del 32%, por lo que se determinó la necesidad de optimizar el sistema de bombeo para prolongar su vida útil y reducir los costos operativos.

En el contexto peruano, Carrillo (2022) evaluó la mina Huacracocha, en esta identificó la necesidad de mejorar el sistema de bombeo debido a los reboses de agua

provenientes de tres pozas, que afectaban las actividades mineras al dañar las vías de acceso a las labores. Esto interrumpía el tránsito de los trabajadores y equipos, lo que resultaba en una pérdida de dinero significativa para la compañía minera. Por su parte, Huallpa (2022) al evaluar una mina de Cerro de Pasco, se advirtió que la expansión y el sistema de bombeo actual para el drenaje de agua subterránea ya no tenían la capacidad suficiente debido al aumento del caudal causado por filtraciones de agua a través de las fallas del macizo rocoso y el incremento de las operaciones mineras. Esto estaba generando inundaciones, por lo que se identificó la necesidad de implementar un nuevo sistema de bombeo para abordar esta problemática

Además, Pino (2023) halló diversas deficiencias en el sistema de bombeo de la minera El Brocal, tales como reboses de agua en las pozas que afectaban las vías, causando paradas en la extracción de mineral y desmonte. Además, la limpieza deficiente de las pozas provocaba fallas prematuras en las bombas. También se producían inundaciones en la profundización de rampas, lo que paralizaba los frentes de avance y generaba elevados costos. Y, Jaco (2020) encontró en la minera Ticlio problemas en su sistema de bombeo, observándose inundaciones frecuentes en las rampas. Esto puede convertirse en un problema significativo para el diseño de la explotación minera, por lo que es crucial diseñar un buen sistema de bombeo

En ámbito de Cajamarca, gran parte de los proyectos mineros enfrenta dificultades operativas relacionadas con sus sistemas de bombeo. Entre los problemas más frecuentes se encuentran fallas en los equipos, rupturas de sellos, tazones y cables, así como el mal funcionamiento del motor y la bomba. Estas deficiencias impiden alcanzar la capacidad de bombeo requerida, generando pérdidas operativas significativas y afectando la eficiencia del proceso extractivo (Tasilla y Cueva, 2020).

En este contexto, la Unidad Minera en estudio también presenta algunas falencias en su sistema de bombeo, debido a las lluvias se prohíbe acercarse al sistema de bombeo para evitar accidentes, por lo que el sistema de bombeo queda apagado y a la vez se detiene el proceso de tratamiento de agua ácidas y ello conlleva al incumplimiento de emisión de flujos de aguas tratadas al exterior y ello genera que la comunidad quede desabastecida de agua para riego y otras actividades domésticas. Por lo mencionado se propone esta investigación con el fin de optimizar los flujos de aguas superficiales proponiendo un nuevo sistema de bombeo en la mencionada unidad minera. Las fortalezas serían, trabajemos con el mismo número de bombas, pero con mayor velocidad, descargarán a mayor altura y con mayor flujo, debido a los cambios de tuberías, utilización de Variadores de velocidad en lugar de Tableros eléctricos y punto de eficiencia de descarga de las bombas.

1.2. Antecedentes de la investigación

Singgih (2021) en una mina de Indonesia, evaluó el sistema de drenaje existente y proponer mejoras. Se aplicó una metodología basada en observación directa, mediciones hidráulicas y ensayos de prueba y error para analizar el caudal de filtración, el volumen de los sumideros y la eficiencia del bombeo. Los resultados indicaron una afluencia promedio de por punto de filtración, insuficientemente gestionada por el sistema actual. Se concluyó que es necesario instalar bombas de refuerzo, ampliar los sumideros, incorporar válvulas de control de aire y reemplazar los impulsores por modelos MT 231, con el fin de optimizar el drenaje y reducir los tiempos de inactividad operativa.

Pino (2023) se planteó mejorar el sistema de bombeo para la evacuación de aguas subterráneas desde el nivel 3912 al nivel 4032 en la minera El Brocal. Para resolver este

problema, se propuso retirar 09 bombas de 58 HP (5 bombas de la rampa 1462 y 4 de la rampa 8942) y reemplazarlas con una sola bomba de 300 HP, integrando así una única línea de bombeo desde las rampas 1462 y 8942 con descarga en la poza del nivel 4032. Como resultado, se logró un sistema de bombeo mucho más eficiente, con menos componentes, lo que generó ahorros en energía, costos operativos, mantenimiento de vías, mantenimiento de equipos (bombas) y redujo las horas de parada en la extracción por inundaciones.

Holguino (2023) se propuso mejorar la eficiencia del sistema de bombeo mediante la instalación de una estación de rebombeo. Según el análisis realizado en el sistema de bombeo inicial, se detectó que las bombas estaban operando cerca del caudal mínimo, lo que resultaba en un rendimiento muy bajo. Los resultados mostraron que, tras recalcular los parámetros, las bombas ATR-33, ATR-34 y ATR-39 no mejoraron su funcionamiento con el nuevo sistema de rebombeo instalado, ya que operaban por encima del caudal máximo. Sin embargo, con el sistema de rebombeo, se logró mejorar significativamente el rendimiento en un 44.4%, según el cuadro comparativo.

Custodio (2023) diseñó un sistema de bombeo para la descarga de los espesadores de relave. Para las bombas volumétricas, se revisaron los datos reológicos y se midieron los flujos en operación. Además, mediante el uso de las curvas características del sistema de bombeo, se seleccionaron las bombas hidráulicas. Los resultados mostraron que, utilizando líneas independientes desde las bombas, se logra un mejor control operativo del sistema de bombeo. Además, la línea de impulsión se construyó con tubería de material HDPE SDR 11 Ø22, con una potencia de 250 kW, una capacidad de flujo de 910.2 m³/h y un NPSHr de 6.4 m.

Triveño (2022) determinar la optimización del sistema de bombeo para el drenaje del tajo de la Minera Antapaccay; el estudio es descriptivo experimental. Los resultados obtenidos son los siguientes: la bomba Sulzer (potencia de 250 kW y la potencia óptima para bombear de un nivel a otro nivel es de 211.775 kW), la bomba Sulzer (potencia de 250 kW y la potencia adecuada para bombear de un nivel a otro es de 203.137 kW) y la potencia óptima para bombear de un nivel a otro es de 288.144 kW y la potencia adecuada para bombear de un nivel a otro es de 54.346 kW).

Caro y Paredes (2022) diseñaron un sistema de bombeo para la evacuación de agua subterránea en la minera San Blas. El tipo de investigación es aplicada, con diseño no experimental-descriptiva; se realizaron diferentes estudios, como topográficos, hidrológicos, cálculo de parámetros del agua, selección, diseño y estimación de costos del sistema de bombeo. A partir del estudio, se propuso el diseño de un sistema de bombeo neumático capaz de evacuar 0.001419 m³ /s manejando 13 estaciones de bombeo según el avance del pique para la extracción del mineral.

Huallpa (2022) describió la aplicación de la técnica de un sistema de bombeo en la minera Marsa, destacando su importancia en el diagnóstico, control, modelado y optimización del proceso de bombeo. Se analizó su potencial en términos de caudales de agua para mantener los niveles inferiores en buenas condiciones y evitar inundaciones, lo que permite aumentar los rendimientos de producción y minimizar los costos operacionales. Con el nuevo sistema de bombeo, se incrementó el nivel de 2370 a 2620.

En Cerro de Pasco, Alarcón, (2021) se planteó como objetivo rediseñar la red de bombas sumergibles entre los niveles 190 y 583 de la mina Islay. Para ello, se realizó un análisis técnico de las condiciones operativas de las 21 bombas existentes (de 58 HP y

150 HP), evaluando su eficiencia, puntos de operación y zonas críticas. A partir de estos datos, se propuso un nuevo diseño con seis bombas KSB WKL 150/4 distribuidas en dos cámaras de bombeo estacionario, que permiten evacuar un caudal de 164.16 l/s con cuatro bombas activas y dos en reserva. Se incluyó la instalación de 3,240 metros de tuberías HDPE de 14 pulgadas. El rediseño reduce el costo mensual de operación de US\$ 53,300 a US\$ 30,000 y disminuye el consumo energético en 630 kWh diarios, generando un ahorro de US\$ 50 por día. Se concluye que el nuevo sistema mejora la eficiencia hidráulica y económica del proceso de bombeo.

Jaco (2020) evaluó la influencia del sistema de bombeo en el ciclo de minado en la unidad minera. Para el estudio del sistema de bombeo se discurre las condiciones del tipo de terreno en la zona de profundización, tales como investigación geomecánica, redes de tuberías tanto en pozas secundarias y principales, proyectándonos en el esquema general de ingeniería que se tendría que aplicar. Los resultados mostraron que un eficiente sistema de bombeo conlleva a una incidencia positiva generando un 24.3% mayor de rentabilidad en la valorización mensual, disminución de tiempo en el ciclo de minado, asimismo contribuye a tener una mayor estabilidad del macizo rocoso.

Con base en estudios realizados a nivel internacional, nacional y local, se confirma la relevancia de desarrollar un diseño adecuado para cada sistema de bombeo de agua. Esta consideración permite a los ingenieros tomar decisiones fundamentadas respecto a las soluciones que se implementarán en cada unidad minera. Desde una perspectiva estructural, el objetivo principal es minimizar el desgaste prematuro de los equipos de bombeo, garantizar una gestión eficiente del drenaje de aguas superficiales, evitar interrupciones en las operaciones mineras y, simultáneamente, cumplir con los compromisos sociales hacia las comunidades ubicadas en el área de influencia,

contribuyendo así al sostenimiento de la operación y a la protección del medio ambiente.

1.3. Bases teóricas

1.3.1. Aguas superficiales

Se refiere al movimiento del agua a través de un medio, que puede ser un río, arroyo, tubería o cualquier otro sistema (Guillén, 2020). En el contexto de la minería, de acuerdo a Nuwater (2023), las aguas superficiales son aquellas que se mantienen sobre la tierra, estas desempeñan un papel crucial y se utilizan para diversos fines, como el procesamiento de minerales, la supresión de polvo y la rehabilitación de sitios. Sin embargo, es fundamental tratar adecuadamente estas aguas para mitigar impactos ambientales y sociales, ya que las actividades mineras pueden afectar significativamente su calidad debido a la liberación de contaminantes y la alteración de los cursos de aguas naturales.

El agua juega un papel crucial en las operaciones mineras, pero frecuentemente representa un desafío durante la etapa de explotación. Por esta razón, es indispensable utilizar bombas para extraer el agua acumulada en el fondo de la mina. El propósito de un sistema de bombeo es eliminar el exceso de agua y mantener la mina desaguada (Delgado, 2022).

Cabe mencionar que, cada proyecto y operación minera presenta sus propias variables, elementos recurrentes e impactos. Una vez en funcionamiento, consume de 2 a 3 m³ de agua por tonelada. En la industria minera es crucial mantener la sostenibilidad y el equilibrio, evitando extraer o consumir agua sin reponerla; por tanto, es importante reintegrar al subsuelo el agua extraída para mantener la operación de la mina (Meraz, 2020); además, mediante un adecuado sistema de bombeo se pretende mejorar la

productividad considerando siempre un plan de gestión de agua subterránea durante la explotación minera.

Figura 1

Aguas superficiales de la unidad minera



1.3.2. Sistema de bombeo

Un sistema de bombeo, en palabras de Pino (2023), es un conjunto de componentes hidráulicos que facilitan el transporte de fluidos desde el interior de la mina hasta la superficie, con el propósito de cumplir las especificaciones requeridas de flujo y presión; las bombas pueden conectarse en serie, en paralelo o de manera mixta.

Estos sistemas son dispositivos diseñados para elevar y extraer agua desde un punto bajo a uno más elevado, ya sea de fuentes superficiales, subterráneas o de depósitos hacia sistemas de distribución (Rivas, 2021). Estas bombas pueden ser impulsadas por diversas fuentes de energía, como electricidad, energía solar, combustibles y energía eólica. No obstante, el problema radica en la incapacidad del sistema de bombeo actual para gestionar eficientemente los flujos de agua, lo que provoca diversos inconvenientes

como inundaciones y retenciones de agua, contaminación ambiental, altos costos operativos y mantenimiento frecuente y costoso (Hualpa, 2022).

La principal función de un sistema de bombeo, según Rodal et al. (2021), es extraer aguas subterráneas a través de tuberías, elevándolas desde niveles inferiores a superiores. Estas aguas se acumulan durante las operaciones de avance como resultado de las filtraciones. La función principal de un sistema de bombeo es extraer aguas subterráneas a través de tuberías, elevándolas desde niveles inferiores a superiores. Estas aguas se acumulan durante las operaciones de avance como resultado de filtraciones.

Además, Morales (2020) postula que al diseñar el sistema de bombeo es de gran importancia considerar tanto la altura como el punto de bombeo y la operación, ello debido a que la evacuación de agua en minería es muy importante para que las operaciones se ejecuten adecuadamente, y el agua que se logró extraer de manera óptima (Alarcón, 2021).

Según Muñoz (2022), la selección de un sistema de bombeo apropiado se consigue mediante el establecimiento del equilibrio hidráulico del sistema. Para lograrlo, se utilizan las ecuaciones de conservación de la masa, equilibrio de energía y cantidad de movimiento. Asimismo, es importante tener en cuenta la elección y optimización del sistema de bombeo se enfocan en una bomba centrífuga que debe ser capaz de suministrar un caudal determinado del fluido a lo largo del sistema (Condezo, 2019).

Figura 2

Sistema de bombeo de la unidad minera



Dentro de la variable sistema de bombeo se contempla como dimensiones:

Velocidad de bombeo, está influenciada por diversos factores, como el tipo de bomba empleada, la altura de elevación y el caudal necesario; si la velocidad del fluido es excesivamente alta, esto provoca una disminución en la presión, a su vez, la presión se ve afectada por el nivel de fricción presente en el sistema (Ayay y Chávez, 2021). Altura de bombeo, las bombas centrífugas varían su eficiencia en función del caudal y la altura de bombeo. Diámetro de tuberías, es la distancia entre dos puntos opuestos que atraviesan el centro de la tubería, el cálculo hidráulico correcto que establece el diámetro de la tubería debe tener en cuenta las características técnicas de la instalación, especialmente el caudal, la presión de trabajo y las pérdidas por fricción en la tubería (Cruz, 2019).

1.3.3. Bombas Turbinas Verticales

Las bombas turbinas verticales son equipos de bombeo diseñado para funcionar en pozos profundos, pozas de agua con sostenimiento en balsas flotantes, cisternas o dentro de un barril como sistema de refuerzo de presión (booster). Estas bombas están preparadas para resistir una alta carga axial (Respicio, 2020). Su diseño vertical permite

ahorrar espacio en la instalación y facilita el uso de una base sencilla. Este tipo de bomba se clasifica en dos variantes según su sistema de lubricación: una lubricada con aceite y otra con agua (también conocida como autolubricada). Las bombas son equipos mecánicos, los cuales se utilizan para transformar la energía mecánica ofrecida por un motor en energía hidráulica.

Las bombas tienen los siguientes parámetros importantes para determinar su uso:

- Caudal.
- Altura de aspiración
- Altura de impulsión
- Altura geométrica total: Viene a ser la suma de la altura de impulsión y la altura de aspiración.
- Potencia del motor.

Ecuación 1

Potencia de motor

$$P = \rho \times g \times Q \times H /$$

$$n \dots \dots \dots (1)$$

P = Potencia en W (Kg.m²/s²)

g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

ρ = peso específico del agua (1000 kg/m³)

Q = caudal.

H = altura total en m (geometría + pérdidas en la tubería).

η = rendimiento de la bomba (0,5 – 0,7).

En el sector minero se utilizan con bastante frecuencia por su alta capacidad de

bombeo y facilidad para la instalación en los sistemas de bombeo.

1.3.4. Caudal

Es la cantidad de agua que circula a través de una sección transversal de una tubería en un tiempo determinado. Representa una magnitud fundamental en la hidráulica y en los sistemas de transporte de agua, como los utilizados en redes de distribución, riego, drenaje y actividades mineras. Este caudal puede expresarse como volumétrico o másico, dependiendo de si se mide en volumen o en masa por unidad de tiempo (Herrera, 2022).

1.3.4.1. Caudal volumétrico (Q)

Viene a ser el volumen de agua que pasa por una sección de la tubería por unidad de tiempo. La unidad en el sistema internacional de unidades está dada por m^3/s , L/s o gal/min. Existen diversos tipos de dispositivos para calcular el caudal en una sección circular que es la más usada es el caudalímetro, su fórmula se puede expresar:

Ecuación 2

Volumen de caudal

$$Q = A \times V \dots\dots\dots(2)$$

$$Q = A \times V \times \rho$$

Donde:

- Q = caudal (m^3/s)
- A = área de la sección transversal de la tubería (m^2)

- V = velocidad del agua en (m/s).

1.3.4.2. Caudal másico (m)

Es la masa de agua que fluye por unidad de tiempo, menos común en tuberías de agua, más usado en procesos industriales, su fórmula se puede expresar:

Ecuación 3

Masa de agua

$$Q = A \times V\rho \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

- Q = caudal (m^3/s)
- A = área de la sección transversal de la tubería (m^2)
- V = velocidad del agua en (m/s).
- ρ = densidad del fluido
- Se expresa en kg/s

1.3.5. Altura dinámica total (ADT)

La altura dinámica total (ADT) de una bomba representa la energía total requerida para trasladar un fluido desde un punto de origen hasta su destino, considerando todos los factores que afectan el desplazamiento. Esta incluye la altura estática (diferencia de elevación entre los puntos), la altura de presión (presión necesaria en el punto de descarga) y la altura de fricción (pérdidas de energía por resistencia en tuberías y

accesorios). En conjunto, la ADT define la carga total que la bomba debe vencer para garantizar un flujo eficiente, superando obstáculos físicos y hidráulicos presentes en el sistema (MacLanahan, 2024).

Componentes de la ADT

- **Altura Estática:** Es la diferencia de altura entre el punto de succión y el punto de descarga, también conocida como elevación vertical.
- **Altura de Presión:** Es la energía de presión necesaria para mover el fluido, tanto en la succión como en la descarga.
- **Altura de Fricción:** Es la energía perdida debido a la resistencia que ofrece el sistema de tuberías y accesorios al flujo del fluido

1.3.6. *NPSH*

NPSH corresponde a las siglas en inglés de *Net Positive Suction Head*, que en español se traduce como *Carga de Succión Positiva Neta CSPN* (Es la presión mínima que debe existir en la succión de una bomba hidráulica para evitar la cavitación). Este concepto se refiere a la diferencia entre la presión que tiene el líquido en el eje del impulsor y su presión de vapor a la temperatura de operación. En otras palabras, es la presión absoluta mínima necesaria en la entrada de la bomba para prevenir la cavitación. Esta medida es una de las características fundamentales a considerar en el funcionamiento de una bomba (Pump, 2020).

$NPSH_R$ (requerido), este dato lo da el fabricante de la bomba y se determina mediante ensayos y viene ser analíticamente la presión en la zona del punto de mínima presión, más la altura cinética en ese mismo punto.

$$NPSH_R < W^2X$$

Por lo que el $NPSH_D$ (disponible) debe ser mayor que el $NPSH_R$ (requerido - fabricante) y de esta manera la bomba no cavitará (Barreneche, 2017).

$NPSH$ Disponible en la entrada de una bomba lo tenemos que calcular utilizando la siguiente fórmula:

Ecuación 4

Carga de succión positiva neta

$$NPSH_D = [(P_a - P_v) / \rho * g] + [V_E^2 / 2 * g] + H_E - h_{aE} \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

P_a = La presión atmosférica en nuestro caso (msnm 1013.25 hPa.).

P_v = Presión de vapor

V_E = La velocidad del fluido en el punto 0

H_E = La altura manométrica del punto E.

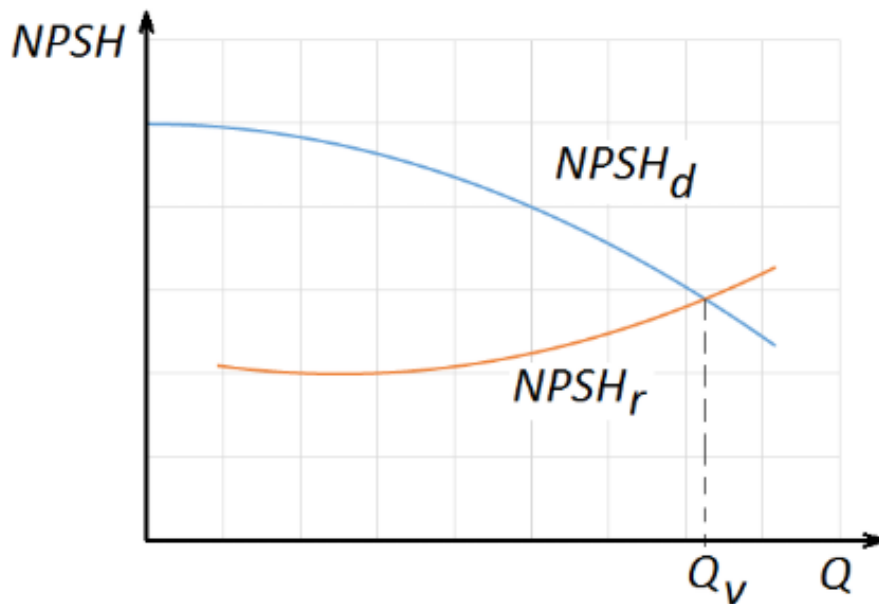
ρ = La densidad del agua (997 kg/m³).

g = La aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

h_{aE} = La pérdida de carga entre el punto aE

Si la bomba opera con una aspiración excesiva, la presión a la entrada puede disminuir hasta llegar a alcanzar la tensión de vapor del agua. Se desprenderían entonces burbujas de vapor que, cuando la presión se recupera, explotarían violentamente ocasionando graves daños en los mecanismos de la bomba.

Figura 3
Determinación de NPSH



Nota. Tomado de Fundamentos da Engenharia Hidráulica, por Baptista e Lara, 2002, UFMG.

1.3.7. Cavitación

La cavitación es un fenómeno frecuente en sistemas de bombeo, especialmente en bombas centrífugas, debido a su estrecha relación con el funcionamiento del impulsor. Estas bombas operan mediante un impulsor, un rotor diseñado para generar succión, incrementar la presión y establecer el flujo del líquido desde la entrada hacia la salida. A diferencia de una hélice, que actúa como un ventilador de palas generando empuje al desplazar el fluido, el impulsor está orientado a crear presión interna en el sistema. Aunque ambos dispositivos movilizan líquidos, lo hacen con propósitos distintos. Sin embargo, comparten una vulnerabilidad común: la cavitación. Este fenómeno, causado por la formación y colapso de burbujas de vapor en zonas de baja presión, puede generar daños severos en superficies metálicas, reducir la eficiencia hidráulica y comprometer la integridad del equipo, afectando tanto impulsores como hélices

en condiciones operativas desfavorables (Neufeld, 2021).

1.3.8. Impulsores de bombas de agua

El impulsor es el componente rotativo fundamental en una bomba centrífuga de agua, responsable de transformar la energía mecánica suministrada por el motor en energía hidráulica. Su función principal es aumentar la presión y velocidad del fluido, facilitando su desplazamiento a lo largo del sistema. Está conformado por paletas o álabes dispuestos radialmente, que al girar dentro del cuerpo de la bomba impulsan el agua desde el centro del impulsor (denominado “ojo”) hacia la periferia, mediante la acción de la fuerza centrífuga. Este proceso genera el flujo y determina la carga hidráulica que la bomba puede alcanzar. La velocidad impartida al líquido por el impulsor es directamente proporcional a la altura manométrica obtenida, lo que convierte a este elemento en el núcleo operativo del sistema de bombeo, especialmente en aplicaciones que requieren eficiencia y precisión en el manejo de caudales y presiones (Cindex, 2022).

Los impulsores se clasifican según:

- Tipo de Succión: Simple succión y doble succión
- Forma de las aspas: Aspas curvas radiales, Aspas tipo Francis, Aspas para flujo mixto y aspas tipo propela.
- Dirección del flujo: Radial, Mixto y Axial.
- Construcción Mecánica: Abierto, Semiabierto y cerrado
- Velocidad específica: Baja, Media y alta (Vallejo, 2020).

1.3.9. Tubería Flexible para bombeo de agua

En los sistemas de bombeo que se hacen para los drenajes de aguas superficiales en las zonas por lo general de operaciones, para la primera expulsión del flujo se requieren

tuberías flexibles de alta resistencia y fácil manipulación debido a las condiciones operativas, por eso se utilizan las Angus Wellmaster de 8" debido a su efectividad y rentabilidad frente a otras marcas del sistema comercial (Bombas de Pozos, 2021). En este proyecto se instaló las Well Master de 8" cuyos datos técnicos se mencionan a continuación:

- **Instalación y recuperación rápidas:** Al ser hasta un 75% más livianos y fáciles de manipular que las tuberías rígidas, los tramos largos y continuos se instalan y recuperan con mayor facilidad.

- **Reducción en los costos de instalación:** Su bajo peso y volumen disminuyen significativamente los gastos de transporte y almacenamiento. Además, requiere poca maquinaria y personal, lo que reduce los costos de montaje.

- **Menor costo operativo:** Gracias a su alto rendimiento hidráulico y mínimas pérdidas de carga, permite un bombeo más eficiente, lo que reduce los gastos de operación.

- **Durabilidad prolongada:** Diseñado para ofrecer un servicio a largo plazo con un mantenimiento mínimo. Su alta resistencia a la corrosión, incrustaciones y agentes microbiológicos garantiza una larga vida útil y eficiencia energética.

- **Rendimiento destacado:** Durante su uso, puede expandirse hasta un 15% en diámetro, permitiendo mayores caudales en comparación con las tuberías rígidas. Su flexibilidad reduce ruidos, absorbe variaciones de presión y minimiza daños por vibración.

- **Soporte técnico integral:** Se brinda acompañamiento técnico completo, desde

el análisis de viabilidad y diseño hidráulico hasta la instalación final y puesta en marcha.

1.4. Justificación

La investigación se justifica en el aspecto teórico, debido a que, mediante la aplicación de la teoría de los sistemas, que sostiene que cualquier sistema complejo, como el manejo de aguas superficiales, puede ser mejorado mediante la optimización de sus componentes individuales. Por tanto, al implementar un nuevo sistema de bombeo se puede mejorar el sistema hídrico, que a su vez permitirá la optimización de los flujos de agua en la unidad minera.

En el aspecto práctico, se justifica debido a que al optimizar los flujos de aguas superficiales mediante un nuevo sistema de bombeo en la Unidad Minera se podrá mejorar la eficiencia operativa, reducción de costos, gestión sostenible del agua y que a su vez aportan valor a largo plazo tanto para la empresa como para las comunidades locales y el entorno ambiental.

Desde una perspectiva social, la justificación de este estudio se basa en su impacto positivo, ya que optimizar la gestión de los flujos de aguas superficiales contribuye directamente a garantizar un suministro sostenible y adecuado de recursos hídricos para las comunidades en su área de influencia. Este enfoque favorece tanto el bienestar de la población como el desarrollo regional. Asimismo, al contar con un sistema de bombeo eficiente se podrá prevenir inundaciones y reducir el riesgo de accidentes relacionados con el agua en la zona de operaciones.

1.5. Formulación del problema de investigación

¿Cuál es el efecto del nuevo sistema de bombeo en la optimización de los flujos de aguas superficiales en una Unidad Minera de Cajamarca, Perú 2024?

1.5.1. Problemas específicos

- a) ¿Cuál es la influencia del número de bombas en el flujo de aguas superficiales?
- b) ¿Cuál es la influencia de la velocidad en el flujo de aguas superficiales?
- c) ¿Cuál es la influencia del diámetro de la tubería de descarga en el flujo de aguas superficiales?
- d) ¿Cuál es la influencia de la altura de bombeo en el flujo de aguas superficiales?

1.6. Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Optimizar el flujo de agua superficial mediante un nuevo sistema de bombeo de una Unidad Minera en Cajamarca-Perú, 2024.

1.6.2 Objetivos específicos

- a) Evaluar la influencia del número de bombas en el flujo de aguas superficiales.
- b) Evaluar el efecto de la velocidad en el flujo de aguas superficiales.
- c) Evaluar la influencia en el diámetro de la tubería de descarga en el flujo de aguas
- d) Describir la influencia de la altura de bombeo en el flujo de aguas superficiales.

1.7. Hipótesis General

El flujo de agua superficial supera los 900 m³/h a través de un nuevo sistema de bombeo en la Unidad Minera de Cajamarca, Perú 2024.

1.7.1. Hipótesis específicas

- a) El número de bombas influye de manera directa en el flujo de aguas superficiales.

b) La velocidad de las bombas tiene un efecto directo en el flujo de aguas superficiales.

c) El diámetro de la tubería influye de manera directa en la descarga de flujo de aguas superficiales.

d) La altura de bombeo influye en el flujo de aguas superficiales.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Esta investigación es de tipo aplicada, según Castro et al. (2023) estos estudios se centran en alcanzar un objetivo específico mediante la aplicación de métodos que permiten al investigador obtener información a través de la observación directa y el registro de eventos, sin influir en ellos de ninguna manera.

El estudio también corresponde a un enfoque cuantitativo, el cual se basa en la recopilación de datos para probar hipótesis mediante mediciones numéricas y análisis estadístico (Huamán et al., 2022).

Además, es de nivel descriptivo, el cual se enfoca en “describir algunas características fundamentales de fenómenos, utilizando criterios sistemáticos que permiten establecer la estructura o el comportamiento de estos, proporcionando información sistemática y comparable” (Guevara y Verdesoto, 2020, p.163). En consecuencia, se observó el proceso del sistema de bombeo y los cambios que ocurrieron a partir de la optimización del flujo de agua.

Asimismo, se empleó un diseño experimental, el cual “se caracteriza por la manipulación intencionada de la variable independiente y el análisis de su impacto sobre una variable dependiente” (Galarza, 2021, p.1). Por tanto, se buscó optimizar los flujos de aguas superficiales mediante la instalación de un nuevo sistema de bombeo, siguiendo el siguiente esquema.

$$\boxed{O1 \times O2}$$

Donde:

O= Observación

O1= medición antes de la aplicación

O₂= medición después de la aplicación

Por otro lado, la población de la presente investigación está referida a todos los sistemas de bombeo que componen los afluentes del sistema de bombeo de la unidad minera en estudio de Cajamarca-Perú. De acuerdo a Arias y Covinos (2021) la población se define como el conjunto total del fenómeno bajo investigación, donde las unidades de población comparten una característica común que se analiza y que constituye la base de los datos de la investigación.

Además, la muestra en una investigación viene a ser un subconjunto representativo de la población total o del fenómeno que se está estudiando (Guevara y Verdesoto, 2020). En este sentido, la muestra del estudio constó de 3 bombas instaladas en una poza de captación de agua en el fondo del tajo de donde se bombea dicho fluido hasta la planta de tratamiento de aguas ácidas, siendo el detalle siguiente:

Bomba 1 envía 100 litros/segundo

Bomba 2 envía 100 litros/segundo

Bomba 3 envía 100 litros/segundo.

En esta parte se detallan las técnicas de campo, de gabinete, instrumentos de medición y control, así mismo los insumos y materiales para validar el nuevo sistema de bombeo orientado a optimizar los flujos de aguas superficiales en una operación minera de Cajamarca, Perú (2024).

En las técnicas de campo que se utilizan son las de observación, se toman los datos día a día en cada flujómetro o caudalímetro es decir los l/s de las respectivas bombas, estos datos son vaciados a un Excel y vamos corroborando el comportamiento del sistema de bombeo.

Dentro de las técnicas de gabinete, se seleccionaron las electrobombas turbinas con motor marca WEG de 350 hp y las bombas Hidrostral B14C, debido a la experiencia y confiabilidad que estas brindan en sistemas de bombeo utilizados en esta unidad minera, se hicieron los cálculos respectivos teniendo en consideración las curvas y punto de eficiencia de las bombas, siempre basados en las hojas del fabricante, lo que nos dio más confianza respecto al punto de operación que necesitamos en este nuevo sistema de bombeo.

Se eligieron las bombas Hidrostral B14C con siete etapas, cada etapa bombea a 25 metros de altura, lo que hace un total de 175 metros suficiente para llegar a los 100 l/s que se requieren por cada bomba a esa altura solicitada por la operación del área de Drenaje.

Además, se emplearon como instrumentos de medición:

- **Flujómetro:** Se empleó flujómetros electromagnéticos de la marca SITRANS FM MAG 5000 de Siemens, por lo general estos los utilizamos en todas las líneas de bombeo para observar la cantidad de litros por segundo, metros cúbicos por hora o según las unidades de medida requeridas, en este caso está en litros por segundo.

Figura 4
Flujómetro



- **Manómetro:** Mediante estos instrumentos fundamentales es posible observar la presión del fluido (PSI) y en Bar en tiempo real y así determinar si la presión es muy baja, en la succión nos estaría indicando que puede existir cavitación, problemas en el cebado o alguna fuga; pero si la presión excede referencialmente a la normal de acuerdo a la requerida por la línea de bombeo puede haber obstrucciones o válvulas cerradas ya sea las tipo check o de mariposa, es decir los manómetros cumplen una función indispensable para la seguridad del sistema de bombeo.
- **Sensores de Nivel:** Estos sensores son ubicados en zonas estratégicas para controlar los niveles de agua y al mismo tiempo regulan el apagado o encendido de las bombas según el ceteo requerido por el área de telemetría y/o automatización.
- **Variadores de Frecuencia:** Los (VFD) y los arrancadores suaves se utilizan para regular la velocidad de los motores de corriente alterna, ajustando la frecuencia (Hz) y la corriente (A) que reciben. Esta regulación permite optimizar el consumo energético, mejorar la eficiencia operativa, reducir el desgaste del motor y, en consecuencia, prolongar la vida útil de los equipos.
- **Controlador Lógico Programable (PLC):** Son instrumentos especializados que se utilizan para automatizar el nuevo sistema de bombeo ayudando al aumento de la productividad, son bastante confiables y seguros.

Además, se emplearon como materiales:

- Bombas Turbinas verticales B14C con motor de 350 hp con peso 3,500 kg.
- Balsas flotantes con un peso de 2130.8 kg
- Variadores de Frecuencia.
- Tuberías de HDPE con SDR de acuerdo al Sistema requerido.

- Válvulas Check y válvulas tipo mariposa de Inox.
- Bridas de Inox de 6", 8", 10", 12", 14" o según lo necesario para el sistema
- Cables eléctricos trifásicos de aluminio (250 mcm).
- Puesta a tierra de acuerdo al reglamento interno y nacional.
- Canastillo o Strainers de Inox para la succión de cada bomba.
- EPP adecuado para ciertas actividades, ya sea abrir o cerrar válvulas, despresurizar, cambiar empaques, u otra actividad.

Se tomó en cuenta, los siguientes criterios de selección y referencias técnicas:

- Punto de operación requerido, está en función de la cantidad de l/s que necesitamos bombear para bajar el nivel de la Napa Freática, aguas recolectadas de lluvia y también aguas de escorrentía de los taludes de la zona de operaciones. Por ello es necesario un caudal de 100 l/s, a una altura dinámica total de 175 m.
- El NPSH disponible es > que el NPSH requerido más el margen de seguridad para poder evitar que las bombas puedan cavitación.
- Por lo general el agua que se bombea es ácida con un Ph que oscila entre 3.5 a 5.5, este dato nos ofrece el área de muestreos de pozos y pozas.
- La temperatura del agua que se bombea está entre los 15° a 25° C.
- Protecciones de las bombas, los golpes de ariete muchas veces son repentinos porque aumenta la presión dentro de la línea de bombeo, al suceder este evento se apaga la bomba automáticamente, y queda registrado en el servicio de Telemetría.

Plan de muestreo y KPIs de desempeño

- Caudal (Q), la succión y la descarga debe ser continua para lograr $\geq 95\%$ - 98% del punto de eficiencia de la bomba.

- La presión (PSI), se monitorea en puntos estratégicos, muchas veces se colocan en el manifold los manómetros y en algunos puntos críticos, de esta manera podemos determinar que se encuentre entre +/- 5% de lo requerido.
- Disponibilidad del sistema de bombeo, el plan es diario y por ende tendremos los reportes mensuales de bombeo, donde se logre más o igual al 95%.

Recursos Humanos y roles

- En esta investigación se coordina con el supervisor general del proyecto por parte de la Unidad Minera y el jefe de la empresa que presta el servicio de operaciones de aguas, luego vienen los supervisores responsables y técnicos.

Observaciones finales

- Siempre se tiene que hacer revisiones físicas de las bombas y las balsas flotantes que se encuentran dentro de la poza de agua, también de tiene que hacer recorrido de líneas de bombeo y colocar señalización de ellas para tener conocimiento universal de la dirección de los flujos enviados.

Para la recolección de datos se utilizó como instrumento una ficha de observación (ver anexo 3), a través de la cual se recopiló información detallada sobre el funcionamiento del sistema de bombeo en cada una de las unidades evaluadas. Se realizó un registro inicial que permitió establecer las condiciones operativas previas, y posteriormente, tras la implementación del proceso de optimización, se efectuó un segundo registro con el objetivo de identificar y cuantificar las mejoras alcanzadas en el desempeño del sistema. Además, se llevó a cabo el siguiente procedimiento que constó de las siguientes etapas:

Etapas 1: Identificación de las variables de estudio.

Etapa 2: Recolección de datos, para ello se visitaron las instalaciones de la unidad minera, específicamente el punto inicial del bombeo y el punto de descarga ubicado en la planta de tratamiento de aguas ácidas, con el propósito de observar el sistema de bombeo que presentan las 3 bombas en estudio.

Etapa 3: Se calculó la velocidad de las bombas mediante la observación de la velocidad del caudal del agua a través de un flujómetro. También se realizaron medidas de altitud de operación desde el punto de bombeo hasta el punto de descarga. A partir de estos datos se obtuvo la velocidad de bombeo (Rpm), diámetro de tuberías (pulgadas), flujo de agua que se medirá mediante flujómetros, fluido, descarga, succión (niveles) y velocidad de expulsión (Rpm).

Para la aplicación de instrumentos se usó como técnica la observación, misma que permite construir una interpretación de los fenómenos analizados desde la perspectiva del investigador, ofreciendo una visión contextualizada de la realidad observada (Hinojosa, 2022).

Para el análisis de datos, se utilizó una hoja de cálculo en Excel para consolidar los datos en matrices ordenadas por variables operativas, unidades funcionales y períodos de evaluación. Esta sistematización permitió identificar patrones de comportamiento y preparar los datos para su procesamiento estadístico. Posteriormente, se empleó el software SPSS versión 26 para realizar el tratamiento estadístico, que a su vez permitió generar tablas de frecuencias y la determinación de la significancia respecto del flujo de agua antes y posterior al mejoramiento del sistema (pre y post), todo ello en respuesta a los objetivos planteados.

Por último, se consideraron los siguientes principios: Honestidad, la cual

garantizó la precisión y veracidad en todas las fases de la investigación, desde la recopilación de datos hasta la presentación de resultados, informando con exactitud sobre los métodos empleados y los hallazgos obtenidos. Además, la libertad, ya que se preservó la independencia académica y la libertad de expresión en la investigación, fomentando un entorno donde se puedan explorar y discutir libremente ideas y resultados. El respeto a la propiedad intelectual, debido a se respetaron los derechos de autor citando adecuadamente los conceptos u opiniones de otros autores. También la veracidad, puesto que la información presentada en la investigación se fundamentó en la precisión y veracidad de los datos recopilados. Y, por último, la justicia, ya que se aseguró que los participantes sean seleccionados de manera equitativa y que no exista discriminación en ningún aspecto del estudio.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

Este estudio se planteó optimizar el flujo de agua superficial mediante un nuevo sistema de bombeo en una unidad minera de Cajamarca, para ello se implementó un nuevo sistema de bombeo diseñado con criterios de eficiencia hidráulica, sostenibilidad ambiental y adaptabilidad geotécnica. Este sistema permitió redirigir de forma controlada los caudales superficiales, reduciendo significativamente los riesgos de erosión, acumulación y afectación a infraestructuras críticas.

La instalación del sistema incluyó bombas de alta capacidad con sensores automatizados de nivel, utilización de flujómetros manuales de alta precisión, válvulas de control de presión, tuberías reforzadas y estaciones de monitoreo remoto, lo que permitió una gestión dinámica del flujo hídrico en función de las condiciones climáticas y operativas.

Figura 5
Flujómetro o caudalímetro digital calibrado en la UM



Figura 6
Nuevo sistema de bombeo



3.1. Influencia del número de bombas en el flujo de aguas superficiales

En la tabla 1 se observa que las tres bombas evaluadas muestran un desempeño estable y eficiente. La bomba 03 presentó el mejor rendimiento promedio (81.34), seguida por la bomba 01 (80.55) y la bomba 02 (75.93), que evidenció inferior rendimiento.

Tabla 1
Flujo de agua en las bombas durante el mes de febrero

Bomba	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	Prom	
N° 01	79	80	80	82	81	80	84	80	79	77	78	82	81	79	83	80	80	82	82	83	80	82	80	79	80	80	82	81	80	80.55
N° 02	78	76	78	77	77	75	76	75	77	73	74	75	72	77	76	76	75	77	77	78	73	74	75	78	76	78	77	77	75	75.93
N° 03	80	83	83	84	82	80	80	84	80	80	83	82	80	81	80	84	84	82	80	84	80	80	79	78	82	80	82	82	80	81.34

En la tabla 2, se advierte que la bomba 03 presentó el mejor rendimiento promedio (81.34), y la bomba 02 evidenció un rendimiento ligeramente inferior (75.93).

Tabla 2
Flujo de agua en las bombas durante el mes de marzo

Bomb	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Prom
N° 01	82	84	80	80	79	83	83	84	82	83	80	80	82	84	83	80	80	81	83	83	80	80	78	79	78	84	83	80	82	83	80	81.39
N° 02	78	75	76	73	73	73	78	79	74	79	80	82	79	78	79	79	81	83	80	85	80	84	79	78	79	83	80	84	80	80	78	79.00
N° 03	80	79	77	78	80	79	82	80	80	80	78	76	77	80	81	80	79	78	78	77	79	80	79	77	78	78	80	81	81	82	79	79.13

En la tabla 3 se muestra que el bombeo en la bomba 1 osciló entre 78 y 84 litros por segundo; en la bomba 2 varió entre 72 y 83 litros por segundo y en la bomba 3 osciló entre 80 y 84 litros por segundo.

Tabla 3

Flujo de agua en las bombas durante el mes de abril

Bomba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Promedio
N° 01	84	85	84	82	81	80	78	79	78	79	79	83	85	81	81	80	80	79	78	84	83	84	80	80	80	83	81	84	83	81	81.30
N° 02	78	75	76	73	73	73	78	79	74	78	79	79	80	80	82	74	75	72	77	76	80	80	79	83	80	82	80	81	77	76	77.63
N° 03	80	82	80	81	83	84	80	81	83	83	82	80	83	83	84	82	83	84	80	83	82	80	81	80	83	82	84	83	84	84	82.13

En la tabla 4 se muestra que el flujo de agua en la bomba 1 osciló entre 78 y 86 litros por segundo; en la bomba 2 osciló entre 73 y 82 litros por segundo y en la bomba 3 osciló entre 80 y 83 litros por segundo.

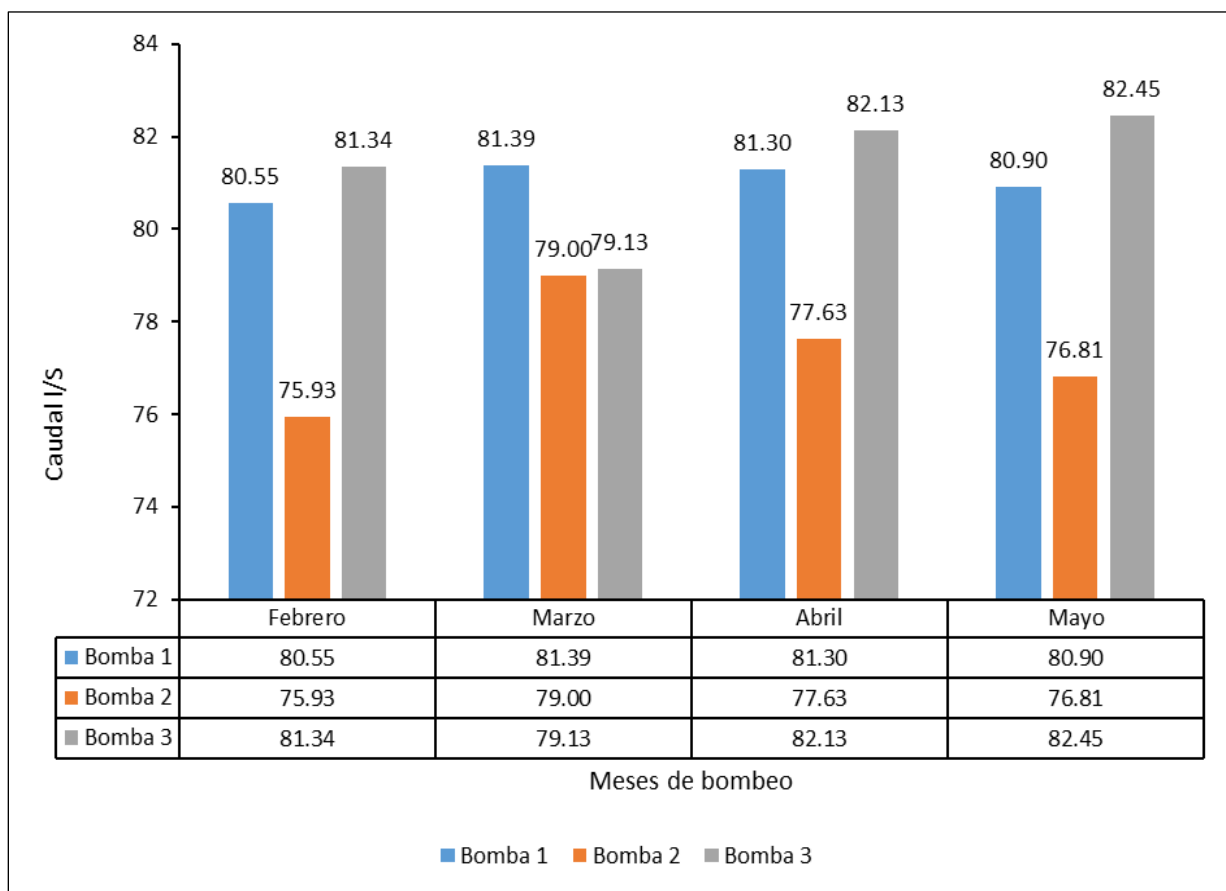
Tabla 4

Flujo de agua en las bombas durante el mes de mayo

Bomba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Prom
N° 01	80	80	79	86	85	86	86	86	85	86	86	79	78	84	83	80	78	79	78	79	79	78	79	78	79	79	78	79	78	79	79	80.90
N° 02	75	77	74	76	76	75	78	79	74	79	80	82	79	74	78	79	79	74	76	76	78	76	78	77	77	77	76	78	75	76	73	6.81
N° 03	81	82	86	83	83	82	82	82	83	82	83	83	82	83	81	86	81	82	83	80	81	82	84	83	83	81	82	83	83	82	82	2.45

En la figura 7 se presenta el promedio de flujo hídrico bombeado en el lapso de los cuatro meses de febrero antes de la optimización, observándose que el mayor flujo de bombeo alcanzado fue 82.45 litros por segundo en el mes de mayo; asimismo, se observan oscilaciones entre 75 y 82 l/s en el resto de meses.

Figura 7
Promedio mensual del flujo de agua antes de la optimización



A continuación, en la tabla 5 se muestra el registro del flujo de agua posterior a la optimización, en la bomba 1 osciló entre 98 y 100 l/s; en la bomba 2 osciló entre 97 y 99 litros por segundo y en la bomba 3 osciló entre 97 y 100 litros por segundo.

Tabla 5
Flujo de agua en las bombas durante el mes de junio

Bomb	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Prom.
N° 01	10	99	98	10	10	99	10	98	10	99	10	99	10	99	98	98	98	99	98	99	10	98	98	98	99	98	98	99	98	99	98.87
N° 02	99	98	98	99	98	98	99	97	99	97	98	97	98	97	98	99	98	97	98	99	99	98	98	98	99	98	98	97	98	98	98.07
N° 03	98	96	98	98	97	10	10	10	98	96	98	98	97	10	10	10	10	98	10	98	98	99	99	98	10	97	10	10	10	98	98.27

En la tabla 6 se muestra el bombeo en el mes de julio, en la bomba 1 osciló entre 95 y 100 litros por segundo; en la bomba 2 osciló entre 97 y 99 litros por segundo y en la bomba 3 osciló entre 97 y 100 litros por segundo.

Tabla 6
Flujo de agua en las bombas durante el mes de julio

Bomb	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Prom	
N° 01	95	98	99	98	10	10	99	10	98	10	10	10	97	98	98	98	99	98	10	10	99	10	98	98	98	98	98	97	98	10	10	99	98.71
N° 02	98	97	98	97	98	97	98	97	98	97	98	97	98	98	98	98	98	97	98	99	98	98	98	97	98	98	98	97	98	98	98	97.74	
N° 03	97	98	96	98	98	97	10	98	96	98	98	97	10	10	10	10	10	98	99	10	10	98	10	98		99	99	98	10	10	99	98.26	

En la tabla 7 se observa el bombeo posterior a la optimización, en la bomba 1 osciló entre 97 y 100 litros por segundo; en la bomba 2 osciló entre 97 y 99 litros por segundo y en la bomba 3 osciló entre 96 y 100 litros por segundo.

Tabla 7
Flujo de agua en las bombas durante el mes de agosto

Bomba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	3	
N° 01	98	99	98	100	100	99	10	98	98	100	100	100	97	98	98	10	98	100	100	100	97	98	97	98	98	98	98	98	98	98	99	98
N° 02	97	98	98	97	98	97	98	98	99	98	98	98	97	97	98	97	98	97	98	99	98	98	99	98	97	98	99	98	98	98	98	98
N° 03	99	99	98	100	97	10	10	100	98	98	98	97	100	100	100	98	96	98	98	97	100	96	98	98	97	87	99	99	98	100	97	

En la tabla 8 se muestra el bombeo durante el mes de setiembre, en la bomba 1 osciló entre 97 y 100 litros por segundo; en la bomba 2 osciló entre 97 y 99 l/s y en la bomba 3 osciló entre 98 y 100 l/s.

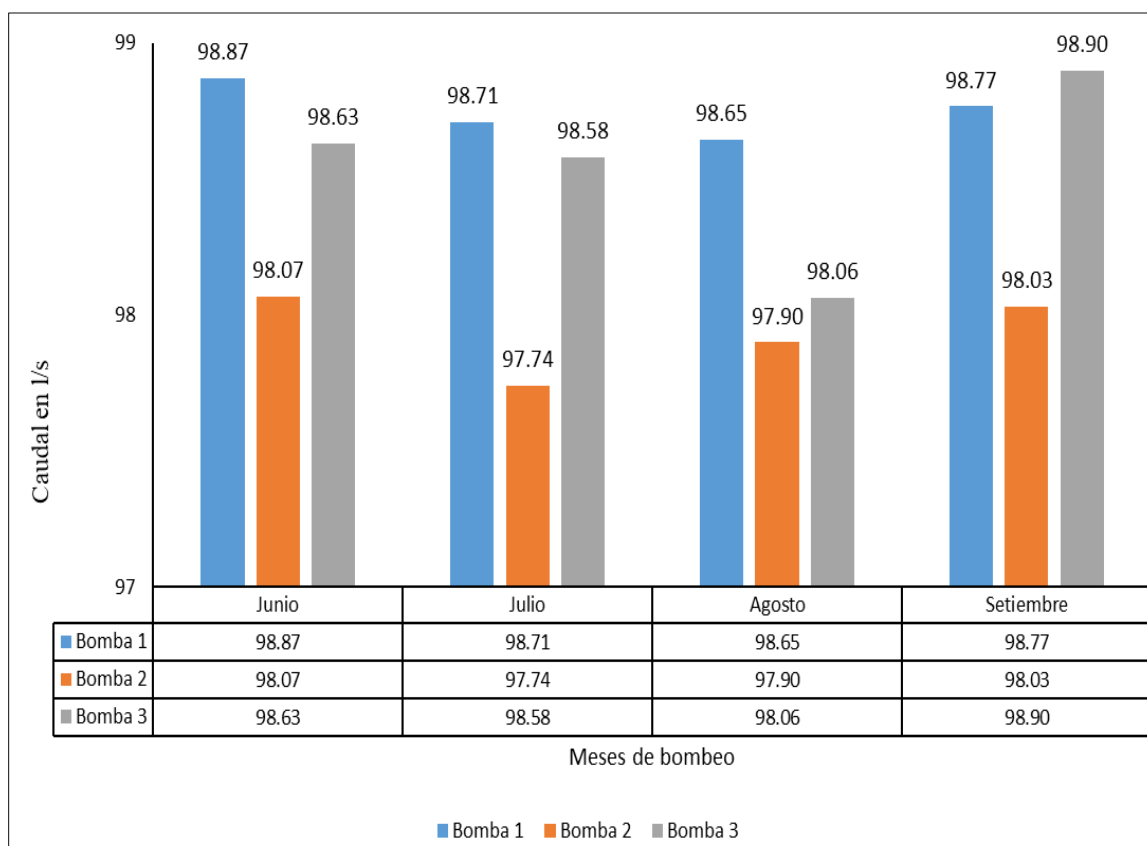
Tabla 8
Flujo de agua en las bombas durante el mes de setiembre

Bomba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Prom.	
N° 01	97	98	97	98	99	98	10	99	98	10	10	99	10	98	98	98	99	98	10	10	99	10	98	99	98	10	10	99	98	10	8.77	
N° 02	98	97	97	98	97	99	98	99	98	99	98	98	98	98	99	98	98	99	98	98	97	98	99	99	97	98	98	97	98	98	98	98.03
N° 03	98	10	10	99	10	98	10	10	10	10	10	10	98	99	10	10	98	10	98	98	99	98	97	10	10	10	10	10	98	10	98.90	

En la figura 8 se muestra el promedio mensual de flujo de aguas posterior a la optimización en el bombeo; se observa que en la bomba 3 el flujo de agua fue mayor en comparación a las otras dos bombas, presentándose mayor flujo en setiembre con 98.90 l/s.

Figura 8

Promedio mensual del flujo de agua posterior a la optimización



Para determinar la influencia del número de bombas en el flujo de aguas superficiales se utilizó la prueba t de Student. En la tabla 9, se observa que los valores hallados al comparar las medias de los valores del flujo antes de la optimización y posterior a la optimización, resultaron en una significancia de 0,000. Esto indica que hay una diferencia estadísticamente significativa entre el flujo inicial y el flujo optimizado, ya que el p-valor es menor a 0.05. Esto sugiere que la optimización ha tenido un efecto significativo.

Tabla 9*Nivel de significancia del flujo de agua mediante la prueba t de Student*

Diferencias emparejadas	Media	Desv. estándar	Error estándar	IC 95% Inferior	IC 95% Superior	t	gl	Sig. (bilateral)
Par 1: Bomba N° 01 (Antes vs Después)	-18.32	1.94	0.35	-19.04	-17.6	-52.34	30	0
Par 2: Bomba N° 02 (Antes vs Después)	-20.29	2.11	0.38	-21.07	-19.51	-53.39	30	0
Par 3: Bomba N° 03 (Antes vs Después)	-17.84	2.02	0.36	-18.57	-17.11	-49.56	30	0

3.2. Influencia de la velocidad en el flujo de aguas superficiales

La velocidad del flujo de agua ahora se ajusta eficientemente mediante el control de la frecuencia (Hz) en cada bomba, lo que permite un mayor rendimiento. Anteriormente, se utilizaban tableros eléctricos con arrancadores directos, los cuales no permitían optimizar la velocidad del sistema, por lo que la velocidad en el flujo de aguas promedio máxima alcanzada antes de la optimización fue de 81,27 l/s.

Actualmente, se ha implementado el uso de tableros eléctricos con variadores de frecuencia, lo que permite un manejo preciso de los Hertz (60 Hz), incrementando las revoluciones por minuto (RPM) de las bombas. Esto ha permitido optimizar el caudal en el nuevo sistema de bombeo, alcanzando los 100 litros por segundo requeridos.

Cabe resaltar que, inicialmente se empezó con Hertz (Hz) que oscilaban entre 55 a 56 por ello el flujo de descarga era menor (1650 - 1680 RPM); posterior a la optimización, se logró aumentar a 60 Hz, y se obtuvo más eficiencia y mejor trabajo de las bombas alcanzando así

1790 RPM, con ello que se logró alcanzar un flujo de 100 l/s por cada una de las bombas, es decir, un metro cúbico, 1,080 metros cúbicos por hora.

Para determinar la velocidad del flujo de agua se emplearon las siguientes ecuaciones:

Ecuación 5

Velocidad del flujo

$$v = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots(5)$$

Ecuación 6

Área de la tubería

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \dots\dots\dots(6)$$

V = velocidad

Q = caudal

A = área

A continuación, en la tabla 10 se observa la velocidad inicial y optimizada de las bombas. Inicialmente, osciló entre 1650 y 1680 Rpm; posterior a la optimización alcanzó 1790 Rpm por cada motor que impulsa a cada bomba vertical.

Tabla 10*Velocidad de bombeo de agua en l/s*

Bombas	Velocidad inicial (1650 Rpm)				Velocidad optimizada (1790 Rpm)			
	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre
Bomba 1	80	81	81	80	97	98	98	98
Bomba 2	75	79	77	75	95	95	95	95
Bomba 3	81	79	82	81	98	98	98	98

La tabla 11 exhibe que las medias observadas presentaban valores significativos, puesto que los valores de p son menores que 0,05; por tanto, se puede afirmar que la velocidad de las bombas influye significativamente en el flujo de aguas superficiales en unidades de l/s.

Tabla 11*Nivel de significancia mediante la prueba t de Student*

Diferencias emparejadas	Media	Desv. estándar	Error estándar	IC 95% Inferior	IC 95% Superior	t	gl	Sig. (bilateral)
Par 1: Velocidad inicial vs. Optimizada	17.67	1.94	0.35	16.8	18.54	44.65	11	0,00

3.3. Influencia del diámetro de tuberías en el flujo de aguas superficiales

En la tabla 12 se muestra que antes de la optimización, las bombas contaban con una tubería de descarga flexible de 6" de diámetro desde la poza de bombeo hasta el manifold o unión en una troncal de 18".

Tabla 12
Diámetro de tuberías antes de la optimización

Bombas	Marca de tubería	Diámetro	Manifold
01	Well Master	6"	18"
02	Well Master	6"	18"
03	Well Master	6"	18"

Para optimizar el flujo de aguas se realizaron cambios en el manifold por otro de mayor diámetro respecto de los anteriores; ya que, se utilizaban las tuberías HDPE de 18" con un SDR (Espesor o grosor de la tubería SDR 17) y en algunas ocasiones fallaban debido a la presión del agua, por ello se cambiaron a una tubería de 24" de diámetro con un SDR 11, de este modo, al ser mayor el diámetro menos serán las pérdidas, esto hace aumentar la velocidad del agua registrándose en el flujómetro una mejora del caudal en litros por segundo según nuestro trabajo de investigación, a su vez mejora las condiciones de seguridad en el bombeo.

En la tabla 13 se observa que, como parte de la optimización implementada en las tuberías, se hicieron cambios en las tuberías flexibles de descarga de 6" a 8" y el manifold se cambió a uno de mayor diámetro a 24", ello permitió una mayor capacidad de flujo de agua para ser enviada hacia la planta de tratamiento de aguas ácidas.

Tabla 13
Diámetro de tuberías posterior a la optimización

Bombas	Marca de tubería	Diámetro	Manifold
01	Well Master	8"	24"
02	Well Master	8"	24"
03	Well Master	8"	24"

A continuación, en la tabla 14 se observa que al comparar los cambios producidos a partir del cambio de diámetros en las tuberías se logró optimizar el flujo de aguas, toda vez que se observan diferencias significativas con respecto a su valor de referencia, como lo indican los valores de p menores que 0.05 y el diámetro optimizado tiene una diferencia mucho más grande y es más significativamente diferente que el diámetro inicial. Esto sugiere que las modificaciones realizadas han permitido mejorar el flujo de aguas superficiales de la unidad minera en estudio.

Tabla 14

Nivel de significancia mediante la prueba t de Student

Diferencias emparejadas	Media	Desv. estándar	Error estándar	IC 95% Inferior	IC 95% Superior	t	gl	Sig. (bilateral)
Par 1: Diámetro antes vs. Después	4	2.191	0.894	1.701	6.299	4.472	5	0.0066

3.4. Influencia de la altura de bombas en el flujo de aguas superficiales

Para determinar la altura de las bombas, se utilizaron los siguientes cálculos:

- Caudal requerido $Q = 100$ l/s
- Cabeza o Altura Estática = 175 m
- Aceleración de la gravedad $g = 9.81$ m/s²
- Densidad del agua $\rho = 1000$ kg/m³
- Eficiencia de la Bomba $\eta_{bomba} = 75\%$ (< o > según diseño)
- Eficiencia del motor $\eta_{motor} = 95\%$
- Pérdidas por fricción mínimas debido al diámetro de la línea de bombeo (24")
- Potencia eléctrica aproximada

- Potencia al eje eléctrico que se necesita:

Ecuación 7

Potencia hidráulica

$$P_{eléctrica} = \frac{P_{hidráulica}}{\eta_{bomba} * \eta_{motor}} \dots\dots\dots(7)$$

- $\eta_{total} = 0.75 \times 0.95 = 0.7125$
- $P_{eléctrica} = 171675 / \eta_{total}$

Procedemos a efectuar la división:

- $171675 / 0.7125 \approx 240900 \text{ W} = 240.9 \text{ Kw.}$
- Sabemos que $1 \text{ HP} = 745.7 \text{ W}$
- Entonces obtenemos que $240900 \text{ W} / 745.7 \approx 323.1 \text{ HP.}$

Entonces determinamos que necesitamos 323 HP eléctrico disponible por lo que un motor nominal de 300 hp no es conveniente, no se abastece; necesitamos por lo tanto un motor de 350 hp que pueda tener un margen operacional y pueda arrancar con normalidad.

Hp eléctrico disponible 323, por lo que el motor es de 350 hp.

Ecuación 8

Potencia hidráulica requerida (Ph)

$$P_{hidráulica} = \rho g Q H \dots\dots\dots(8)$$

Se utiliza la fórmula de la Potencia Hidráulica, dónde:

ρ = densidad

g = gravedad

Q = caudal

H = altura

Efectuamos los cálculos para determinar la Potencia Hidráulica.

$$Q = 100 \text{ L/S} = 0.100 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$gH: 9.81 \times 175 = 1716.75$$

Ahora vamos a encontrar la P_{hid} aplicando la fórmula:

- $1000 \times Q \times (gH)$
- $1000 \times 0,100 \times 1716.75 = 171,675 \text{ W}$

Por lo tanto; la potencia hidráulica encontrada para este sistema de bombeo por cada bomba es 171.675 Kw.

El número de etapas requeridas fue 7, cada etapa bombea 25 metros ($7 \times 25 = 175 \text{ m}$), este dato es clave en una bomba, ya que ello indica la altura que aporta cada una de estas etapas, cada una de ellas para este tipo de bombeo alcanzó los 25 metros, haciendo el total de siete etapas para cumplir con los 175 metros de altura.

En la tabla 15 se muestra que la altura inicial de instalación y funcionamiento de las bombas fue en la cota 3420 msnm, así como una altura inicial de bombeo en la planta de tratamiento de 3615 msnm, obteniendo así una altura dinámica de bombeo de 195 metros. Posterior a la optimización, se aumentó la altura inicial en la nueva poza de agua con una cota de 3440 msnm, y la altura de bombeo en la planta de tratamiento de aguas ácidas se mantuvo en la cota 3615 msnm, reportándose una diferencia de altura de 175 metros.

Tabla 15
Altura de bombas

Bombas	Altura antes de la optimización			Altura posterior a la optimización		
	H. inicial de bombeo desde la poza	H. inicial de bombeo en la planta de tratamiento	Diferencia de altura	H. inicial de bombeo desde la poza	H. inicial de bombeo en la planta de tratamiento	Diferencia de altura
01	3420 msnm	3615 msnm	195 m	3440 msnm	3615 msnm	175 m
02	3420 msnm	3615 msnm	195 m	3440 msnm	3615 msnm	175 m
03	3420 msnm	3615 msnm	195 m	3440 msnm	3615 msnm	175 m

En la siguiente figura, se observa la altura actual de bombas, el trazo de la línea de color azul muestra el recorrido de la tubería desde el nivel 3440 msnm hasta el nivel 3615 msnm que es donde se realiza la descarga.

Figura 9
Altura actual de bombas del yacimiento minero en estudio



La tabla 16 muestra que la prueba t indica diferencias significativas entre las medias observadas entre la altura inicial y mejorada, ya que los valores de p son menores que 0,05; por tanto, se puede afirmar que la altura de las bombas influye significativamente en el flujo de aguas superficiales.

Tabla 16

Nivel de significancia de la altura de bombas en el flujo de bombeo

Diferencias emparejadas	Media	Desv. estándar	Error estándar	IC 95% Inferior	IC 95% Superior	t	gl	Sig. (bilateral)
Par 1:								
Altura antes vs. después	20	0	0	—	—	∞	2	0,04

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio se planteó como objetivo general, optimizar el flujo de agua superficial mediante un nuevo sistema de bombeo en una unidad minera de Cajamarca-Perú, 2024, para ello, luego de la recolección y procesamiento de datos se halló que, el sistema de bombeo influye significativamente en el flujo de agua, toda vez que halló una significancia de 0,031, por tanto, se acepta la hipótesis alterna, ya que al implementar acciones de mejora en las bombas como cambio de tuberías, cambios en altura y mejoramiento en la velocidad del flujo de agua se puede lograr un bombeo más óptimo que resulta en una mayor cantidad de litros de agua por segundo. En relación a lo mencionado, Pino (2023), en su investigación sobre un sistema de bombeo la minera evaluó 09 bombas y halló como resultado que la optimización en el bombeo mejora el flujo de agua, reduce costos operativos y reduce las horas de extracción por inundaciones. De igual manera, Holguino (2023) mejoró el sistema de bombeo en una mina arequipeña, en la que evaluó tres bombas, de ello obtuvo como resultado un rendimiento aumentado en un 44.4%. Los hallazgos confirman lo señalado por Morales (2020), que, en el sistema de bombeo es de gran importancia considerar tanto la altura como el punto de bombeo y la operación a fin de que se logre extraer el agua óptimamente, debido a que los hallazgos reflejan que mejoras en tuberías, elevación de bombas y otros factores son importantes para aumentar el flujo de agua, por lo que se recomienda evaluar los sistemas de bombeo en mina para determinar acciones de mejora, de modo que se tenga un mejor aprovechamiento del agua.

En cuanto al primer objetivo específico, se determinó la influencia del número de bombas en el flujo de aguas superficiales, hallándose cambios entre el bombeo anterior y posterior a la optimización, presentándose un mayor flujo al optimizar el sistema de bombeo, con un aumento promedio de 17 litros por segundo; asimismo, mediante el análisis de la prueba t de Student se halló una significancia de 0,003, ello sugiere que la optimización permite mejorar las operaciones en el sistema, ello a su vez tiene un impacto positivo en la gestión del

recurso hídrico en la unidad minera en estudio; por lo tanto, se acepta la hipótesis del investigador, afirmando que, el número de bombas influye significativamente el flujo de aguas. Los resultados expuestos son comparables con los de Caro y Paredes (2022), quienes posterior al diseño de un sistema de bombeo lograron evacuar $0.001419 \text{ m}^3/\text{s}$ manejando 13 estaciones de bombeo. Así también, Custodio (2023) al diseñar un sistema de bombeo, alcanzó una capacidad de flujo de $910.2 \text{ m}^3/\text{h}$. Esto refuerza lo postulado por Pino (2023), que las bombas facilitan el transporte de fluidos hacia la superficie minera para cumplir el flujo y presión requeridas, ya que los resultados dan cuenta que el número y distribución adecuada de bombas permite obtener un mayor flujo de aguas, por ello es importante la optimización ya que coadyuva a la sostenibilidad operacional del sistema. Se insta ejecutar valoraciones periódicas de la capacidad instalada, el caudal real y la eficiencia energética, con el fin de garantizar que el sistema de bombeo responda apropiadamente.

En relación al segundo objetivo específico, se determinó la influencia del diámetro de tuberías en el flujo de aguas superficiales. A partir del cambio de tuberías de 18" a 24", se registró un aumento en el caudal, de 80.99 l/s a $98,38$ en la bomba 1, de 77.29 a $95,48$ en la bomba 2, y de 81.27 a $98,37$ en la bomba 3; dichos valores se analizaron mediante la prueba t de Student, hallándose una significancia de $0,003$, con lo que se puede confirmar que el aumento en el diámetro de las tuberías no solo optimiza el sistema de bombeo, sino que además permite el paso de un mayor flujo de agua que se refleja en el aumento del bombeo; por esto, se acepta la hipótesis alterna que indica que el diámetro de tuberías influye significativamente en el flujo de aguas. Los resultados se contrastan con los de Custodio (2023), quien logró una capacidad de flujo de $910.2 \text{ m}^3/\text{h}$ al implementar tuberías HDPE SDR 11 $\text{Ø}22$, optimizando el control operativo y reduciendo pérdidas por fricción. Asimismo, Rodal et al. (2021) destacan que la selección adecuada del diámetro de tuberías es esencial para garantizar la elevación eficiente del agua desde niveles inferiores, evitando colapsos por presión y restricciones de

caudal. En tal sentido, el diámetro y el material de las tuberías deben ser concordantes a las exigencias del sistema de bombeo, considerando factores como presión interna, caudal requerido y condiciones geotécnicas.

Respecto del tercer objetivo específico, se analizó la influencia de la altura de instalación de bombas. Inicialmente, se registró una diferencia de 195 metros entre la cota de la poza de bombeo (3420 msnm) y la planta de tratamiento (3615 msnm). Luego de la optimización, se procedió a elevar la cota de la poza a 3440 msnm, de modo que se redujo la altura dinámica de bombeo a 175 metros, ello permitió optimar sustancialmente la efectividad del sistema, lo cual fue validado mediante la prueba t de Student, obteniéndose una significancia estadística de 0,004, por lo que la altura de bombeo influye significativamente en el caudal de agua. Los hallazgos difieren de lo reportado por Huallpa (2022), quien incrementó la altura de bombeo de 2370 a 2620 metros en la minera Marsa, priorizando la cobertura vertical para mantener niveles inferiores operativos. Sin embargo, como señala Debem (2022), existe una relación inversa entre caudal y altura: a mayor caudal, menor debe ser la elevación para evitar pérdidas por fricción y sobrecarga energética. Por tanto, es importante mencionar que, el ajuste en la altura no solo coadyuva al rendimiento hidráulico, sino que también reduce el desgaste de los equipos, minimiza los costos operativos y fortalece la sostenibilidad del sistema de bombeo.

En cuanto al cuarto objetivo específico, al determinar la influencia de la velocidad en el flujo de aguas superficiales, se halló que la velocidad antes de la optimización lograba un bombeo de 81,27 litros por segundo, limitado por el uso de tableros eléctricos con arrancadores directos que operaban entre 1650 y 1680 RPM. Tras la implementación de tableros con variadores de frecuencia, se logró ajustar la velocidad a 60 Hz, alcanzando 1790 RPM, lo que permitió incrementar el caudal hasta los 100 litros por segundo por bomba, equivalente a 1,080 m³/h. Este cambio fue validado mediante la prueba t de Student, obteniéndose una significancia

de $p = 0.048$, lo que permite afirmar que la velocidad de operación influye significativamente en el flujo de agua; es decir, entre mayor sea la velocidad, mayor será el caudal bombeado. Estos resultados son coherentes con lo reportado por Triveño (2022), quien optimizó un sistema de bombeo alcanzando una potencia de 250 kW por bomba, con incrementos promedio de 54.346 kW. Estos resultados muestran que, la velocidad de las bombas en un sistema de bombeo influye directamente en el flujo de agua

Dentro del estudio se tuvo como limitaciones, el sesgo de tiempo debido a que para solo se consideraron 4 meses anteriores y posteriores a la optimización, probablemente si la medición hubiera sido de un año para otro (2023-2024), la mejora en el flujo de agua sería más significativa. Además, otra limitación es que los resultados probablemente no se puedan generalizar a otras unidades mineras toda vez que este estudio se efectuó puntualmente en una minera del contexto cajamarquino, con una topografía, clima y características del suelo peculiares.

Por otro lado, la investigación tuvo implicancias tales como: la mejora en la eficiencia operativa, ya que al optimizar el sistema de bombeo se puede lograr el uso más eficiente del agua, lo que ello a su vez influye en la reducción de costos operativos, aumento en la rentabilidad y sostenibilidad de los procesos mineros. Sostenibilidad ambiental, debido a que con la optimización se reduce la extracción y uso del agua, también se reduce el impacto ambiental como la erosión del suelo. Impacto en la comunidad, el uso apropiado del agua en minería puede beneficiar a las comunidades locales al asegurar un suministro adecuado de agua para usos domésticos y agrícolas, contribuyendo a mejorar la calidad de vida y fomentando relaciones positivas entre la mina y la comunidad.

Finalmente, respecto del objetivo general, se concluye que la optimización integral del sistema de bombeo tuvo un efecto estadísticamente significativo en el flujo de agua superficial, con un p-valor de 0,031. Las mejoras estructurales, incluyendo el rediseño de tuberías, ajustes

en la altura de bombeo, incorporación de variadores de frecuencia y selección técnica de bombas, permitieron incrementar el caudal y mejorar la sostenibilidad del sistema.

En cuanto al primer objetivo se concluye que, el número de bombas influye significativamente en el flujo de aguas superficiales, registrándose un incremento promedio de 17 litros por segundo tras la optimización, con una significancia de $p = 0.003$. Este resultado evidencia que una adecuada distribución y cantidad de bombas mejora el rendimiento hidráulico y reduce los tiempos de inactividad operativa.

Respecto del segundo objetivo se concluye que, el aumento del diámetro de las tuberías de 18" a 24" influye significativamente en el flujo de aguas superficiales, con incrementos notables en las tasas de bombeo de las bombas analizadas, los resultados, con una significancia de 0,003, confirman que un mayor diámetro no solo optimiza el sistema de bombeo, sino que también facilita el paso de un mayor volumen de agua.

Sobre el tercer objetivo se concluye que, la altura de bombeo influye significativamente en el rendimiento del sistema, ya que la reducción de la altura dinámica de 195 a 175 metros permitió alcanzar una potencia hidráulica más eficiente, con una significancia de $p = 0.004$. Este ajuste técnico contribuyó a mejorar la relación entre potencia instalada y caudal requerido.

En cuanto al cuarto objetivo se concluye que, la velocidad de operación de las bombas, regulada mediante variadores de frecuencia, tiene una influencia significativa en el flujo de agua, pasando de 81.27 l/s a 100 l/s al alcanzar 60 Hz, con una significancia de $p = 0.048$. Este resultado valida la importancia de implementar tableros de control que permitan ajustar la velocidad según las condiciones operativas.

REFERENCIAS

- Alarcón, C. (2021). *Rediseño de la red de bombas sumergibles del nivel 190 al nivel 583 de la Mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. - Unidad Chungar - año 2021*. [Tesis de titulación, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10342/1/IV_FIN_111_T_E_Alarcon_Vasquez_2021.pdf.
- Arias, F., & Covinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*.
- Ayay, N., & Chávez, G. (2021). *Evaluación y selección de un sistema de bombeo para relaves en empresas mineras de Cajamarca, 2021*. [Tesis de titulación, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/29503/Ayay%20Tingal%2C%20Nishi%20-%20Chavez%20Chilon%2C%20Gilmer%20Noe.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Cardona, C. (2021). *Caracterización y estandarización de los sistemas de bombeo en minería subterránea*. [Tesis de titulación, Universidad de Antioquia]. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/25177/6/CardonaCesar_2021_SistemasBombeoMineria.pdf.
- Caro, J., & Paredes, L. (2022). *Diseño de un sistema de bombeo para drenar el agua subterránea en la unidad minera San Blas, nivel el quinto, pique 62-Algamarca, Cajabamba 2021*. [Tesis de titulación, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/31787/Caro%20Edquen%20Jhimi%20Ivan-%20%20Paredes%20Valderrama%20Leslie%20Judith.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- Carrillo, L. (2022). *Mejoramiento del sistema de bombeo en la mina Huacracochea unidad minera ticlio - volcan S.A.A.* [Tesis de titulación, Universidad Nacional del Callao]. <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/7001>.
- Condezo, H. (2019). *Mejoramiento del sistema de bombeo y drenaje de Aguas subterráneas Unidad de Producción Uchucchacua- Cia de Minas Buenaventura S.A.A.* [Tesis de titulación, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1784/1/T026_44923901_T.pdf.

- Cruz, P. (2019). *Tuberías para operaciones mineras*.
<https://www.rumbominero.com/ED120/temas/Informe%20Tuberias%20120-132.pdf>.
- Custodio, S. (2023). *Diseño del sistema de bombeo y líneas de descarga de los espesadores de relave para una mina cuprífera en la región Junín*. [Tesis de titulación, Universidad Tecnológica del Perú].
https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/7752/S.Custodio_Titulo_Profesional_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Delgado, M. (2022). *Un sistema de bombeo tiene como objetivo desaguar la mina, suministrar agua a la planta y recuperar las aguas minimizando el impacto ambiental*. [Tesis de titulación, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac].
https://repositorio.unamba.edu.pe/bitstream/handle/UNAMBA/1068/T_0699.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Echavarría, C. (abril de 2018). El agua y la minería: ¿Qué implica el liderazgo?
<https://www.responsiblemines.org/2018/04/agua-y-mineria/>.
- Galarza, C. (2021). Experimental investigation designs. *CienciAmérica*, 10(1), 1-7. Disponible en <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>. Recuperado el 18 de abril de 2024
- Hernández, O. (2021). Aproximación a los distintos tipos de muestreo no probabilístico que existen. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 37(3), .
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21252021000300002.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, L. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGRAW HILL.
- Herrera, J. (2019). *Drenaje y gestión del agua en mina*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Holguino, K. (2023). *Modificación del sistema de bombeo de agua en operaciones minera tajo abierto*. [Tesis de titulación, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
<https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/76665dc7-8123-4fb6-8627-f98c10900c0e/content>.
- Huallpa, M. (2022). *Implementación del sistema de bombeo para optimizar el drenaje del nivel 2370 al nivel 2620 de la Minera Aurífera Retamas S.A.* [Tesis de titulación, Universidad Nacional Daniel Alcides

- Carrión].http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/2681/1/T026_40573871_T.pdf.
- Huamán, J., Medina, W., & Treviños, L. (2022). Epistemología das pesquisas quantitativas e qualitativas. *Horizonte d ela Ciencia*, 12(23), 27-47. <https://doi.org/https://doi.org/10.26490/uncp.horizonteciencia.2022.23.1462>
- Jaco, A. (2020). *Influencia del sistema de bombeo en el ciclo de minado en la unidad minera Ticlio - Volcan*. [Tesis de titulación, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8012/4/IV_FIN_110_TE_Jaco_Flores_2020.pdf.
- Luna, A., Llanos, C., Núñez, F., & Saraza, W. (2020). *Proyecto de construcción del sistema de bombeo en interior mina del nivel 630*. [Tesis de maestría, Universidad ESAN]. <https://hdl.handle.net/20.500.12640/1524>.
- Medrano, D. (2019). *Optimización en el sistema de bombeo y drenaje de las vetas Ánimas-Minera Batea*. [Tesis de titulación, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/5927>.
- Meraz, P. (15 de noviembre de 2019). Minería del agua o minería de minerales que sucede primero. <https://www.linkedin.com/pulse/mineria-del-agua-o-de-minerales-que-sucede-primero-meraz-vinaja/>.
- Morales, C. (30 de marzo de 2020). Bombas en minería: Apostando a una mayor resistencia. <https://www.nuevamineria.com/revista/bombas-en-mineria-apostando-a-una-mayor-resistencia/>.
- Mujica, C., G.A., M., & Bea, S. (2019). Impacto en los flujos hídricos por la presencia de horizontes petrocálcicos en parcelas forestadas en ambientes de llanura. *RIA*, 45(3), 426-436. <https://www.redalyc.org/journal/864/86461622011/html/>.
- Muñoz, A. (2017). *Optimización del sistema de bombeo y manejo de las aguas residuales producto de la explotación minera en la mina de carbon San Fernando, operada por carbones san fernando SAS, vereda paso nivel, Amaga-Antioquia*. [Tesis de titulación, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. <https://core.ac.uk/download/pdf/217561561.pdf>.
- Muñoz, K. (2022). *Mejoramiento del sistema de bombeo para el control de inundaciones y desbordes unidad minera ticlio- Volcan S.A.A., 2022*. [Tesis de titulación, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga].

<https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/3681e86b-23a7-4df1-b89c-ae2f28e9681/content>.

- Nuwater. (8 de agosto de 2023). La importancia del tratamiento del agua en la industria minera: una guía completa. <https://nuwater.com/es/tratamiento-de-agua-en-la-industria-minera/>.
- Parisi, M. (17 de marzo de 2023). Sistemas de bombeo: Larga vida a la operación. <https://www.nuevamineria.com/revista/sistemas-de-bombeo-larga-vida-a-la-operacion/>.
- Pino, M. (2023). *Mejoramiento del sistema de bombeo para la evacuación de aguas subterráneas en Sociedad Minera El Brocal - Unidad Colquijirca*. [Tesis de titulación, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13732/1/IV_FIN_108_T_E_Pino_Licla_2023.pdf.
- Rafael, J. (2019). *Implementación de un sistema de bombeo integral para la evacuación de aguas subterráneas en Minera Kolpa S.A.* [Tesis de titulación, Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/5149/T010_73891431_T.pdf?sequence=1.
- Rodal, E., Caffagi, A., & Sánchez, A. (2021). *Sistemas de bombeo*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rodríguez, S. (2018). Bombeo de agua motorizado. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/distribucion/bombeo-de-agua-motorizado>.
- Rojas. (2017). *Diseño del sistema de bombeo para el abastecimiento óptimo de agua potable del distrito de Huancán-Huancayo*. [Tesis de titulación, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3677/Rojas%20Perez.pdf?sequence=1>.
- Tasilla, V., & Cueva, J. (2017). *Influencia de una inadecuada instalación del sistema de bombeo en minería a cielo abierto, Cajamarca 2019*. [Tesis de titulación, Universidad Privada del Norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/23866/Tasilla%20Flores%20Vi>

lmer%20-

%20Cueva%20S%C3%A1nchez%20Jorge%20Luis.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Triveño, G. (2022). *Optimización del sistema de bombeo para el drenaje del tajo norte de la unidad Minera Antapaccay- 2019*. [Tesis de titulación, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac].
<https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1068?show=full>.

ANEXOS

ANEXO N° 1. Matriz de Consistencia Interna

Formulación del Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Método
<p>¿Cuál es el efecto del nuevo sistema de bombeo en la optimización de los flujos de aguas superficiales en una unidad minera de Cajamarca-Perú, 2024?</p> <p>Enunciado Interrogativo</p> <p>¿Cuál es la influencia del número de bombas en el flujo de aguas superficiales?</p> <p>¿Cuál es la influencia de la velocidad en el flujo de aguas superficiales?</p> <p>¿Cuál es la influencia del diámetro de la tubería de descarga en el flujo de aguas superficiales?</p> <p>¿Cuál es la influencia de la altura de bombeo en el flujo de aguas superficiales?</p>	<p>Objetivo Principal</p> <p>Optimizar el flujo de agua superficial mediante un nuevo sistema de bombeo en una unidad minera de Cajamarca-Perú, 2024</p> <p>Objetivos Secundarios</p> <p>Evaluar la influencia del número de bombas en el flujo de aguas superficiales.</p> <p>Evaluar el efecto de la velocidad en el flujo de aguas superficiales.</p> <p>Evaluar la influencia en el diámetro de la tubería de descarga en el flujo de aguas superficiales.</p> <p>Analizar la influencia de la altura de bombeo en el flujo de aguas superficiales.</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>El flujo de agua superficial supera 1,000 m³/h a través de un nuevo sistema de bombeo en una unidad minera de Cajamarca-Perú, 2024</p> <p>H1: El número de bombas influye de manera directa en el flujo de aguas superficiales.</p> <p>H2: La velocidad de las bombas tiene un efecto directo en el flujo de aguas superficiales.</p> <p>H3: El diámetro de la tubería influye de manera directa en la descarga de flujo de aguas superficiales.</p> <p>H4: La altura de bombeo influye en el flujo de aguas superficiales.</p>	<p>Variable independiente</p> <p>Sistema de bombeo</p> <p>Variable dependiente</p> <p>Flujo de aguas superficiales</p>	<p>Diseño: Experimental</p> <p>Enfoque: cuantitativo y tipo de investigación aplicada</p> <p>Población: Aguas de las pozas en una unidad minera de Cajamarca-Perú, 2024.</p> <p>Mediciones</p> <p>Se realizarán mediciones de caudal de las bombas</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Sensores ➤ Manómetros ➤ Flujómetro <p>Dato técnico de diseño de las bombas</p> <p>Procedimiento</p> <p>Fichas de observación</p> <p>Análisis de Datos</p> <p>Análisis estadístico, test de ANOVA</p>

ANEXO N° 2. Matriz de Operacionalización de las Variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicador	Valor final	Tipo de Variable
<p>Variable 1 Sistema de bombeo (variable independiente)</p>	<p>Es un conjunto de componentes hidráulicos que facilitan el transporte de fluidos desde el interior de la mina hasta la superficie, con el propósito de cumplir las especificaciones requeridas de flujo y presión; las bombas pueden conectarse en serie, en paralelo o de manera mixta (Pino, 2023).</p>	<p>Para medir la variable se considerará la velocidad de bombeo, el diámetro de tuberías y flujo de agua.</p>	<p>Velocidad de bombeo Diámetro de tuberías Flujo de agua</p>	<p>Rpm Pulgadas m3/hora</p>	<p>Independiente</p>
<p>Variable 2 Flujo de aguas superficiales (variable dependiente)</p>	<p>Estas aguas desempeñan un papel crucial y se utilizan para diversos fines, como el procesamiento de minerales, la supresión de polvo y la rehabilitación de sitios. Sin embargo, es fundamental tratar adecuadamente estas aguas para mitigar impactos ambientales y sociales, ya que las actividades mineras pueden afectar significativamente su calidad debido a la</p>	<p>El flujo se medirá con flujómetros</p>	<p>Fluido Descarga Succión</p>	<p>Niveles: bajo, medio, alto</p>	<p>Dependiente</p>

	liberación de contaminantes y la alteración de los cursos de agua naturales (Nuwater, 2023).				
Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicador	Valor final	Tipo de Variable
Dimensión 1 Número de bombas	Es la cantidad de bombas	Es el número de bombas	3 bombas	bombas	Independiente
Dimensión 2 Velocidad de bombas	Es la velocidad de una bomba medido en rpm	Velocidad de expulsión de agua	60 Hz / 1790 RPM	rpm	Independiente
Dimensión 3 Diámetro de tuberías de descarga	Es la medida en una tubería del lado descarga de una bomba	Diámetro lado descarga 12 a 16"	24 pulgadas tras optimización	Pulgadas	Independiente
Dimensión 4 Altura de bombeo y descarga de las aguas superficiales	Es la altura que existe de un punto de bombeo, donde hay una estación de bombas hacia una cota superior de descarga	Altura inicial, Altura final.	3440 msnm - 3615 msnm	m	Independiente

ANEXO N° 3. Instrumento de recolección de datos

Flujo de agua mensual (l/s)																															
Bomba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	Prom.
N° 01																															
N° 02																															
N° 03																															

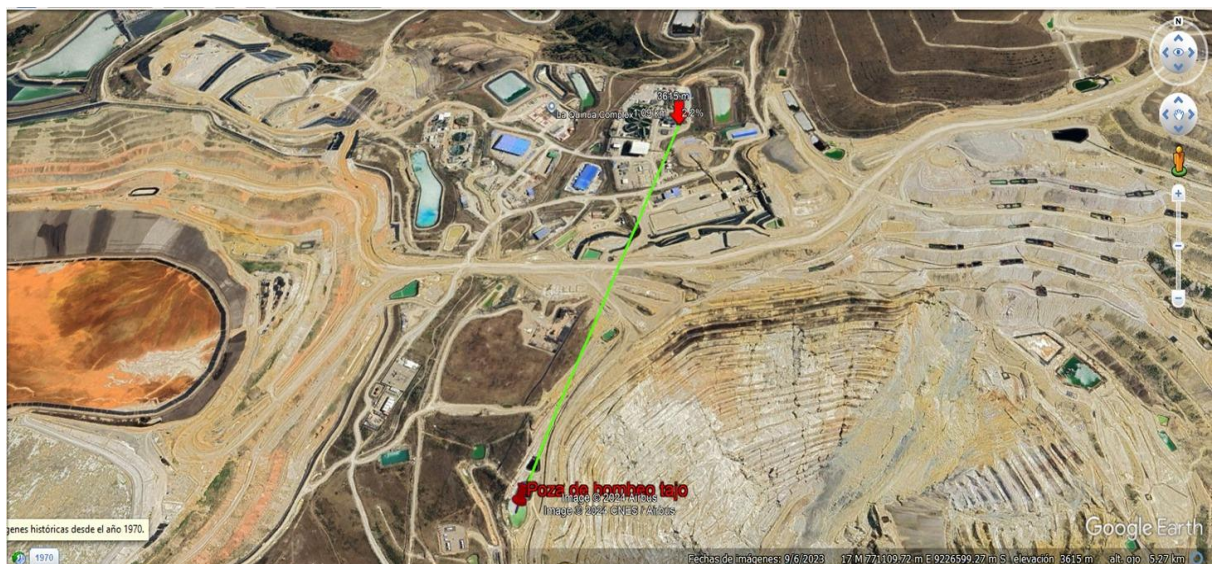
Diámetro de tuberías			
Bombas	HDPE -SDR	Diámetro	Manifold
01			
02			
03			

Altura de bombas del sistema de bombeo						
Bombas	Altura antes de la optimización			Altura posterior a la optimización		
	h in. en poza (msnm)	h in. en poza planta de tratamiento (msnm)	Diferencia de altura (m)	Altura inicial de bombeo desde la poza (msnm)	Altura inicial de bombeo en la planta de tratamiento (msnm)	Diferencia de altura (m)
01						
02						
03						

ANEXO N° 4. Fotografías de la optimización del sistema de bombeo



Nota, en la figura se muestra la tubería y manifold con el nuevo diámetro de 24”



Nota, En la figura se observa la altura final del nuevo sistema de bombeo en la planta de tratamiento de agua.



Nota. Tableros de control de bombas