UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS:

DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO PROGRESIVO DE LA FASE 8, DRENAJE, TAJO SUR - COMPAÑIA MINERA ANTAPACCAY-ESPINAR

PRESENTADO POR:

Br. RUBEN PACCO PUMA

PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

ASESOR:

Dr. MIGUEL VERA MIRANDA

CUSCO – PERÚ

2026

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** MIGUEL VERA MIRANDA ..... quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de investigación/tesis titulada: DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO PROGRESIVO DE LA FASE 8, DRENAJE, TAJO SUR – COMPAÑIA MINERA ANTAPACCAY-ESPINAR

Presentado por: RUBEN PACCO PUMA ..... DNI N° 44644209 ;

presentado por: ..... DNI N°: .....

Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO DE MINAS

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 8 **%.**

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 30 de Septiembre de 20 26

.....

Firma

Post firma MIGUEL VERA MIRANDA

Nro. de DNI 23876027

ORCID del Asesor 0000-0002-9349-8463

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:631578793

RUBEN PACCO PUMA

DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO PROGRESIVO DE LA FASE 8, DRENAJE, TAJO SUR - COMPAÑIA MINERA ANTAPACCAY-E...

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:631578793

Fecha de entrega
29 sep 2026, 8:06 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
29 sep 2026, 8:12 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
TESIS_RUBEN_PACCO_REP_01.pdf

Tamaño del archivo
7.9 MB

162 páginas

28.586 palabras

166.341 caracteres

8% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

7%	Fuentes de Internet
2%	Publicaciones
6%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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 mis padres Valentina Puma y Zenobio Pacco quienes siempre me encaminaron y motivaron el logro de mis objetivos, a mis hermanos por haberme inculcado los valores y el trabajo, como reconocimiento a su confianza y apoyo incondicional y a mi hija Marihan por darme esa fuerza y motivo.

Ruben Pacco Puma

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más profundo agradecimiento a:

A Dios, nuestro Señor, por ser mi guía y compañía en cada momento a lo largo de mi vida, por ser mi fortaleza en mis momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizaje.

A la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Alma Mater que me ha acogido durante todos los años de mi formación académica profesional, enseñándome aspectos de la vida que ninguna clase formal pudiera enseñar.

A los catedráticos de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quienes compartieron sus conocimientos y experiencias, y estuvieron siempre dispuestos a guiarme en los valores adecuados. A todos mis compañeros, con quienes he formado una gran amistad y fraternidad durante toda mi carrera; gracias por ser tan buenos amigos.

A mis padres, hermanos e hija, quienes siempre han estado ahí para apoyarme y brindarme ánimo cuando las fuerzas desfallecen. Asimismo, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, directa e indirectamente, han contribuido con su apoyo, comentarios, sugerencias y ayuda en el desarrollo de esta tesis.

Ruben Pacco Puma

INTRODUCCIÓN

La minería a tajo abierto enfrenta diversos desafíos técnicos conforme avanza la profundización de los yacimientos, siendo uno de los principales el manejo de las aguas subterráneas y superficiales que se acumulan en el fondo del tajo. Esta condición puede afectar la continuidad de las operaciones, generar retrasos en las actividades de producción, incrementar los costos operativos y comprometer la seguridad de las labores mineras. En este contexto, el diseño de sistemas de drenaje constituye una alternativa técnica para controlar eficientemente la evacuación de las aguas acumuladas y garantizar el desarrollo continuo de las operaciones.

La presente investigación se desarrolla en la Compañía Minera Antapaccay, específicamente en la Fase 8 del Tajo Sur, donde la acumulación de agua en el fondo del tajo representa una limitación para el normal desarrollo de las operaciones mineras. Frente a esta problemática, se propone el diseño de un sistema de bombeo progresivo que permita mejorar la efectividad de la evacuación de las aguas acumuladas, mediante criterios hidráulicos, geotécnicos y operacionales que contribuyan a optimizar el sistema de drenaje y asegurar la continuidad de las actividades de explotación.

El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, comprendiendo la descripción y formulación del problema, los objetivos de la investigación, la justificación e importancia del estudio, así como las delimitaciones que establecen el alcance de la investigación.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico de la investigación, incluyendo los antecedentes nacionales e internacionales, las bases teóricas relacionadas con los sistemas de bombeo para drenaje en minería a tajo abierto, la definición de términos, las hipótesis y las variables con sus respectivos indicadores.

El Capítulo III describe la metodología de la investigación y el desarrollo técnico de la propuesta. En este capítulo se presentan el tipo, nivel y diseño de investigación, la población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de datos y el procesamiento de la información. Asimismo, se desarrolla la evaluación y diagnóstico del sistema de bombeo

existente, el diseño de la ruta óptima de la línea de bombeo y la ubicación de pozas, el dimensionamiento hidráulico del sistema, la selección de los equipos de bombeo y la evaluación económica del sistema de drenaje propuesto.

El Capítulo IV presenta los resultados y la discusión de la investigación, analizando el desempeño del sistema de bombeo propuesto, la optimización alcanzada respecto al sistema existente y los beneficios técnicos, operativos y económicos obtenidos a partir de la propuesta, contrastando los resultados con los fundamentos teóricos y los objetivos planteados.

RESUMEN

La acumulación de aguas en el fondo del Tajo Sur, Fase 8 de la C.M. Antapaccay, afecta la continuidad de las operaciones mineras de perforación, voladura, carguío y acarreo, debido a la presencia de aguas subterráneas, precipitaciones pluviales y al incremento progresivo de la profundidad del tajo. La investigación tuvo como objetivo proponer el diseño de un sistema de bombeo progresivo que permita mejorar la evacuación de las aguas acumuladas. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de nivel descriptivo y evaluativo–propositivo, basado en el análisis documental, recopilación de información de campo y el desarrollo de cálculos hidráulicos de caudales, pérdidas de carga, alturas de bombeo, volúmenes de pozas y longitud de tuberías. Como resultado se determinó un caudal promedio de drenaje de 0.107 m^3/s y un caudal máximo de 0.250 m^3/s, adoptado para el diseño del sistema, compuesto por cinco tramos de impulsión y pozas intermedias, con una altura geométrica total de 439 m y pérdidas por fricción de 139.06 m, obteniéndose alturas dinámicas totales entre 75.87 m y 170.44 m, lo que permite alcanzar una capacidad de evacuación de hasta 0.376 m^3/s, superior al caudal máximo registrado. La evaluación económica del sistema determinó una inversión estimada de 2,906,994.90 USD, correspondiente a tuberías de Polietileno de Alta Densidad (HDPE), equipos de bombeo y costos de instalación. El sistema propuesto constituye una alternativa técnica viable que permite mejorar la eficiencia del drenaje, reducir riesgos de paralización operativa y optimizar la gestión del agua en el Tajo Sur.

Palabras clave: Bombeo Progresivo, Drenaje, Caudal, Altura Dinámica, Tajo Abierto.

ABSTRACT

Water accumulation at the bottom of the South Pit, Phase 8 of Compañía Minera Antapaccay, affects the continuity of drilling, blasting, loading, and hauling operations due to groundwater, rainfall, and the progressive increase in pit depth. The research aimed to propose the design of a progressive pumping system to improve the removal of accumulated water. The study adopted a quantitative approach, at a descriptive and evaluative–propositional level, based on documentary analysis, field data collection, and hydraulic calculations of flow rates, head losses, pumping heads, pond volumes, and pipeline lengths. The results established an average drainage flow rate of 0.107 m^3/s and a maximum flow rate of 0.250 m^3/s, adopted for the system design, comprising five pumping sections and intermediate ponds, with a total static head of 439 m and friction losses of 139.06 m, yielding total dynamic heads between 75.87 m and 170.44 m. This allows a water removal capacity of up to 0.376 m^3/s, exceeding the maximum recorded flow rate. The economic evaluation determined an estimated investment of USD 2,906,994.90, covering High-Density Polyethylene (HDPE) pipes, pumping equipment, and installation costs. The proposed system constitutes a technically viable alternative to improve drainage efficiency, reduce the risk of operational shutdowns, and optimize water management in the South Pit.

Keywords: Progressive Pumping, Drainage, Hydraulic Flow, Dynamic Head, Open Pit.

ÍNDICE

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

INTRODUCCIÓN iv

RESUMEN vi

ABSTRACT vii

ÍNDICE DE ABREVIATURAS xvii

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 1

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 2

1.2.1. Problema General 2

1.2.2. Problemas Específicos 2

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.3.1. Objetivo General 3

1.3.2. Objetivos Específicos 3

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN 3

1.4.1. Justificación Técnica 3

1.4.2. Justificación Económica 4

1.4.3. Justificación Operativa 4

1.4.4. Justificación Metodológica 5

1.4.5. Justificación Académica y Profesional 5

1.4.6. Importancia de la Investigación 5

1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 6
1.5.1. Delimitación Espacial 6
1.5.2. Delimitación Temporal 7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN 8
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA 8
2.1.1. Antecedentes Internacionales 8
2.1.2. Antecedentes Nacionales 10
2.2. BASES TEÓRICAS 13
2.2.1. La Gestión del Agua en Minería a Tajo Abierto 13
2.2.2. Bomba 14
2.2.3. Tipo de Abastecimiento 16
2.2.4. Tipos de Bombas 16
2.2.5. Sistema de Bombeo Progresivo 20
2.2.6. Consideraciones en el Diseño y Cálculo de Tuberías de Impulsión 21
2.2.7. Diseño de la Línea de Impulsión 25
2.2.8. Tubería de Impulsión 25
2.2.9. Tubería HDPE (polietileno de alta densidad) 26
2.2.10. Pozas Impermeabilizadas 29
2.2.11. Fundamentos Teóricos del Dimensionamiento de Área y Volumen en Pozas 30
2.2.12. Impermeabilizador (geomembrana) 32
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS 33

2.3.1. Bomba 33
2.3.2. Sistema de Bombeo 33
2.3.3. Sistema de Bombeo Progresivo 33
2.3.4. Línea de Impulsión 33
2.3.5. Caudal de Bombeo 33
2.3.6. Altura Dinámica Total 34
2.3.7. Potencia de la bomba 34
2.3.8. Tubería 34
2.3.9. Tubería HDPE 34
2.3.10. Relación Dimensional Estándar (SDR) 34
2.3.11. Pozas de Captación 34
2.3.12. Pozas de Bombeo 35
2.3.13. Geomembrana 35
2.3.14. Aguas subterráneas 35
2.3.15. Drenaje minero 35
2.3.16. Talud 35
2.3.17. Impermeabilización 35
2.3.18. Efectividad de evacuación 36
2.3.19. Eficiencia del sistema de bombeo 36
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN 36
2.4.1. Hipótesis General 36

2.4.2. Hipótesis Específicos....36
2.5. VARIABLES E INDICADORES....37
2.5.1. Variables Independiente....37
2.5.2. Variables Dependiente....37
2.5.3. Operacionalización de Variables....38
CAPÍTULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN....39
3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN....39
3.1.1. Tipo de Investigación....39
3.1.2. Nivel de Investigación....39
3.1.3. Diseño de Investigación....40
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA....40
3.2.1. Población....40
3.2.2. Muestra....40
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS....41
3.3.1. Técnicas....41
3.3.2. Instrumentos....42
3.3.3. Procesamiento y Análisis de Datos....42
3.4. DESARROLLO DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO PROGRESIVO43
3.4.1. Evaluación y Diagnóstico del Sistema de Bombeo Existente....43
3.4.2. Diseño de la Ruta Óptima de la Línea de Bombeo y Ubicación de Pozas.59
3.4.3. Evaluación Económica del Sistema de Drenaje....109

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 116
4.1. RESULTADOS 116
4.1.1. Análisis de la Configuración del Sistema de Bombeo Propuesto 116
4.1.2. Análisis de la Longitud del Sistema de Impulsión 117
4.1.3. Análisis del Volumen de Almacenamiento de las Pozas Intermedias 117
4.1.4. Análisis de la Optimización del Sistema Respecto al Sistema Existente . 118
4.1.5. Análisis Económico del Sistema de Drenaje 119
4.1.6. Análisis de la Mejora Operativa del Sistema 119
4.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS 120
4.2.1. Verificación de la hipótesis general 120
4.2.2. Verificación de la hipótesis específica 1 120
4.2.3. Verificación de la hipótesis específica 2 120
4.2.4. Verificación de la hipótesis específica 3 121
4.3. DISCUSIÓN 121
4.3.1. Factores operacionales que condicionan el diseño del sistema de bombeo 121
4.3.2. Diseño de la ruta de bombeo y ubicación de pozas intermedias 122
4.3.3. Diseño de pozas, selección de equipos y línea de bombeo 122
CONCLUSIONES 124
RECOMENDACIONES 125
BIBLIOGRAFÍA 126
ANEXOS 129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades de PE (polietileno) 27

Tabla 2 Presión Nominal 29

Tabla 3 Cuadro de Operacionalización de Variables 38

Tabla 4 Configuración actual del sistema de bombeo por niveles 44

Tabla 5 Caudales registrados en el sistema existente 49

Tabla 6 Especificaciones técnicas de la tubería instalada 50

Tabla 7 Velocidades estimadas del flujo 50

Tabla 8 Análisis cualitativo por tramo 51

Tabla 9 Rango estimado de presiones 51

Tabla 10 Resumen de condiciones hidrogeológicas – Fase 8 53

Tabla 11 Comportamiento geotécnico – Fase 8 Tajo Sur (Reporte Diario) 55

Tabla 12 Parámetros base para el dimensionamiento hidráulico 61

Tabla 13 Análisis de sensibilidad del caudal de diseño 62

Tabla 14 Configuración preliminar del trazado de impulsión 67

Tabla 15 Alturas geométricas por tramo 69

Tabla 16 Pérdidas por fricción por tramo (Hazen–Williams) 70

Tabla 17 Altura dinámica total por tramo 71

Tabla 18 Presión estimada por tramo (a partir de HDT) 74

Tabla 19 Resultados del dimensionamiento hidráulico de la poza intermedia NV 3630 78

Tabla 20 Resultados del dimensionamiento hidráulico de la poza intermedia NV 3750 82

Tabla 21 Resultados de diseño Poza Intermedia NV 4005 91

Tabla 22 Tabulación de la curva característica de la bomba Silver H-V3 de 300 HP 95

Tabla 23 Tabulación de la curva característica de la bomba Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP 97

Tabla 24 Caudal estimado por bomba según la altura dinámica total 100
Tabla 25 Configuración de bombas por tramo 101
Tabla 26 Verificación del volumen útil de las pozas intermedias 102
Tabla 27 Metrado y costo de tubería HDPE 110
Tabla 28 Costo de accesorios hidráulicos 110
Tabla 29 Distribución de bombas por tramo 111
Tabla 30 Costo de bombas 111
Tabla 31 Sistema flotante de bombeo 111
Tabla 32 Costo total del sistema de bombeo 111
Tabla 33 Presupuesto consolidado del sistema de drenaje 112
Tabla 34 Estimación del costo energético anual del sistema de bombeo 115
Tabla 35 Caudal operativo del sistema por tramo 116
Tabla 36 Longitud del sistema de impulsión 117
Tabla 37 Volumen útil de las pozas intermedias 118
Tabla 38 Comparación de parámetros operativos 118
Tabla 39 Presupuesto del sistema de drenaje 119
Tabla 40 Coordenadas de las principales áreas de la Unidad Minera Antapaccay 130
Tabla 41 Accesibilidad al Tajo Sur de la Unidad Minera Antapaccay 133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Drenaje típico de un tajo en Minería Superficial 14

Figura 2 Curva característica de altura–caudal (H–Q) de una bomba centrífuga 15

Figura 3 Diagrama de bomba centrífuga horizontal 17

Figura 4 Diagrama de Bomba Centrífuga Vertical 18

Figura 5 Diagrama de Bomba Eléctrica Sumergible 19

Figura 6 Esquema típico de un sistema de bombeo progresivo por niveles 20

Figura 7 Línea de gradiente hidráulico 23

Figura 8 Línea de gradiente hidráulico en una tubería de impulsión 24

Figura 9 Relación dimensional estándar (SDR) en tuberías HDPE 26

Figura 10 PE (polietileno) 28

Figura 11 Poza impermeabilizada para captación y almacenamiento temporal de agua 30

Figura 12 Instalación de geomembrana HDPE como sistema de impermeabilización en pozas 32

Figura 13 Bomba centrífuga GR 275 HP instalada en las pozas intermedias 45

Figura 14 Bomba SILVER 300 HP utilizada en el sistema de rebombeo 46

Figura 15 Bomba FLYGT MT 140 HP instalada en la Poza Intermedia 2 46

Figura 16 Bomba GR 95 HP utilizada en la Poza Intermedia 1 47

Figura 17 Tramo de succión del sistema de bombeo existente en el Tajo Sur 48

Figura 18 Plano semanal de riesgos geotécnicos –Tajo Sur y Tajo Norte (SEM 20, 09–15 de mayo de 2024), Unidad Minera Antapaccay 56

Figura 19 Matriz GUT y estado de controles críticos en la gestión de riesgos geotécnicos . 58

Figura 20 Diagrama de la línea de bombeo propuesto para la Fase 8 del Tajo Sur 64

Figura 21 Altura del espejo de agua medida mediante sistema de posicionamiento GPS ... 66

Figura 22 Plano de ingeniería de detalle – Poza Intermedia NV 3630 79

Figura 23 Excavación de la poza intermedia 4 (Poza de Bombeo) – NV 3630 80

Figura 24 Instalación de geomembrana en la poza intermedia 4 (Poza de Bombeo) – NV 3630 80

Figura 25 Plano de ingeniería de detalle – Poza Intermedia NV 3750 84

Figura 26 Poza intermedia NV 3750 construida e impermeabilizada 85

Figura 27 Plano de ingeniería de detalle – Poza Intermedia NV 3890 88

Figura 28 Poza intermedia NV 3890 construida e impermeabilizada 89

Figura 29 Plano de ingeniería de detalle – Poza Intermedia NV 4005 92

Figura 30 Curva característica de la bomba Silver H-V3 de 300 HP 94

Figura 31 Curva característica de la bomba Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP 96

Figura 32 Ubicación del Tramo 4 del sistema de bombeo entre la Poza NV 3890 y la Poza Intermedia 1 105

Figura 33 Disposición general de los tramos del sistema de bombeo escalonado en el Tajo Sur 106

Figura 34 Instalación del sistema de bombeo flotante en la Poza NV 3890 107

Figura 35 Planta general del sistema de drenaje del Tajo Sur 108

Figura 36 Ubicación de operaciones de CM Antapaccay 131

Figura 37 Ubicación de las operaciones Tajo Sur y Tajo Norte de la CM Antapaccay 132

Figura 38 Plano de Franja Eocena-Oligocena del cinturón Andahuaylas-Yauri 136

Figura 39 Plano geológico---estructural del distrito minero de Tintaya 138

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

HDPE: High Density Polyethylene (Polietileno de Alta Densidad)

SDR: Standard Dimension Ratio (Relación estándar de dimensiones de tubería)

HDT: Altura Dinámica Total

HP: Horse Power (Caballos de fuerza)

m^3/s: Metros cúbicos por segundo

m: Metro

mm: Milímetro

RMR: Rock Mass Rating (Clasificación geomecánica del macizo rocoso)

RQD: Rock Quality Designation (Índice de calidad de roca)

Q: Índice de calidad del macizo rocoso (Sistema Q)

GSI: Geological Strength Index (Índice de resistencia geológica)

EIA: Estudio de Impacto Ambiental

MEIA: Modificación del Estudio de Impacto Ambiental

SENACE: Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles

CAPÍTULO I:

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La explotación minera a tajo abierto requiere condiciones operativas que garanticen la continuidad de las actividades de minado, especialmente en fases de profundización y ampliación del tajo, donde el control del agua constituye un factor crítico para la estabilidad operativa y la seguridad de las labores.

En la Unidad Minera Antapaccay, específicamente en el Tajo Sur durante el desarrollo de la fase 8, la profundización progresiva del tajo ha incrementado la interacción con aguas subterráneas, sumada a la incidencia de precipitaciones pluviales propias de la zona. Esta situación ha generado una acumulación progresiva de agua en el fondo del tajo, elevando el nivel hídrico por encima de las condiciones operativas normales.

La presencia de aguas acumuladas en el fondo del Tajo Sur fase 8 afecta directamente el desarrollo de las operaciones mineras, ocasionando la paralización parcial y, en algunos casos, total de las actividades de extracción, acarreo y minado de material. Asimismo, limita el frente de avance para las labores de perforación y voladura, debido a la reducción de áreas operables y al incremento del riesgo para los equipos y el personal.

Adicionalmente, el aumento del nivel de agua dificulta el ingreso y salida de los equipos principales de producción, tales como camiones mineros y palas, así como de los equipos auxiliares, entre ellos cargadores frontales, excavadoras y motoniveladoras. Estas restricciones operativas generan retrasos en el avance programado de la ampliación de la fase 8 del Tajo Sur.

Como consecuencia de esta problemática, se registran pérdidas de tiempo productivo, incremento de los costos operativos y mayor demanda presupuestal asociada a las actividades de drenaje y control de aguas, comprometiendo la eficiencia del proceso extractivo y la continuidad de las operaciones mineras en dicha fase.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema General

- ¿Cómo debe diseñarse el sistema de bombeo progresivo para mejorar la efectividad de la evacuación de aguas acumuladas en el fondo del Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles son los factores operacionales, hidráulicos y geotécnicos que influyen en el diseño del sistema de bombeo progresivo para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar?
- ¿Cuál es la configuración más adecuada del sistema de bombeo progresivo, en términos de ubicación de pozas intermedias y trazado de la línea de impulsión, para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar?
- ¿Cuáles son los criterios técnicos requeridos para el dimensionamiento de las pozas y la selección de los equipos de impulsión necesarios para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo General

- Proponer el diseño del sistema de bombeo progresivo para mejorar la efectividad de la evacuación de aguas acumuladas en el fondo del Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar los factores operacionales, hidráulicos y geotécnicos que influyen en el diseño del sistema de bombeo progresivo para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar.
- Diseñar la configuración del sistema de bombeo progresivo, considerando la ubicación de las pozas intermedias y el trazado de la línea de impulsión para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar.
- Establecer los criterios técnicos para el dimensionamiento de las pozas y la selección de los equipos de impulsión necesarios para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Justificación Técnica

El incremento progresivo de los caudales de agua acumulados en el fondo del Tajo Sur, asociado a la presencia de aguas subterráneas, al ascenso del nivel freático y a las precipitaciones pluviales, constituye una problemática latente durante los procesos de ampliación y profundización de la Unidad Minera Antapaccay, particularmente en la fase 8. Esta condición afecta directamente la estabilidad operativa del tajo y limita el desarrollo normal de las actividades extractivas.

Desde el punto de vista técnico, el control inadecuado de las aguas acumuladas genera dificultades en la ejecución de las operaciones de minado, perforación, voladura y acarreo,

además de incrementar el riesgo operativo y la exposición de los equipos y del personal. En ese sentido, resulta necesario analizar y evaluar el sistema de evacuación de aguas existente, considerando las condiciones hidrogeológicas, topográficas y operacionales propias del tajo, a fin de garantizar la continuidad y seguridad de las labores mineras.

Asimismo, el estudio técnico del comportamiento del agua en el fondo del tajo y de los acuíferos presentes permite comprender su influencia en el diseño de una explotación a tajo abierto, siendo indispensable complementar los estudios geológicos con un análisis hidrogeológico detallado que considere la pluviometría y el régimen de lluvias de la zona.

1.4.2. Justificación Económica

La acumulación de agua en el fondo del tajo genera paralizaciones parciales o totales de las operaciones mineras, lo que se traduce en pérdidas de tiempo productivo, incremento de los costos operativos y mayores requerimientos presupuestales para actividades correctivas de drenaje. Estas paralizaciones afectan la productividad global de la mina y reducen la eficiencia en el aprovechamiento del recurso mineral.

Desde una perspectiva económica, la investigación se justifica debido a la necesidad de minimizar los sobrecostos asociados a la detención de equipos, reprocesos operativos y consumo adicional de recursos, permitiendo una mejor planificación del manejo del agua y una optimización de los costos relacionados con las operaciones de bombeo y drenaje.

1.4.3. Justificación Operativa

La continuidad de las operaciones mineras en la fase 8 del Tajo Sur depende directamente de la capacidad operativa del sistema de evacuación de aguas. La presencia de agua en zonas críticas del tajo restringe el acceso de los equipos de producción y auxiliares, limita el frente de avance y condiciona el desarrollo del minado conforme a la planificación establecida.

Por ello, la investigación se justifica operativamente al analizar un problema que impacta de manera directa en el rendimiento diario de las operaciones, en la seguridad del personal y en

la correcta ejecución del plan de minado, contribuyendo a una gestión más eficiente del drenaje en el fondo de mina.

1.4.4. Justificación Metodológica

Desde el punto de vista metodológico, la investigación aporta un análisis sistemático y estructurado del manejo de aguas en una explotación minera a tajo abierto, aplicando criterios técnicos, operacionales e hidrogeológicos sustentados en información de campo y documentación técnica existente.

El estudio constituye una referencia metodológica para la evaluación de sistemas de bombeo progresivo en fases de profundización de tajos, pudiendo ser replicado o adaptado en futuras investigaciones o proyectos similares dentro de la industria minera.

1.4.5. Justificación Académica y Profesional

La presente investigación representa un aporte técnico-académico para la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, al abordar una problemática real de operación minera y desarrollar un análisis aplicado que integra conocimientos de drenaje, hidrogeología y planificación minera.

Asimismo, el estudio contribuye al fortalecimiento de la formación profesional del investigador y sirve como base técnica para futuros proyectos de drenaje de mina, ampliaciones de tajo y estudios relacionados con el control de aguas en explotaciones mineras a cielo abierto.

1.4.6. Importancia de la Investigación

La importancia de la presente investigación radica en que aborda una problemática crítica para la continuidad de las operaciones en la fase 8 del Tajo Sur de la Unidad Minera Antapaccay, relacionada con la acumulación de agua en el fondo del tajo y sus efectos sobre la estabilidad operacional. El análisis del sistema de evacuación de aguas permite identificar alternativas para mejorar la eficiencia del drenaje, reducir las interrupciones operativas y contribuir al desarrollo seguro de las actividades de explotación minera.

Asimismo, la investigación proporciona información técnica que fortalece la toma de decisiones en la planificación del manejo de aguas en minería a tajo abierto, integrando criterios hidrogeológicos, operacionales y económicos. Los resultados obtenidos constituyen un referente para futuras evaluaciones de sistemas de drenaje en condiciones similares, aportando conocimiento aplicado tanto para la industria minera como para el ámbito académico.

1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Delimitación Espacial

La presente investigación se desarrolla en la Unidad Minera Antapaccay, operada por la Compañía Minera Antapaccay, ubicada a una altitud aproximada de 4100 m s.n.m., en el distrito de Yauri, provincia de Espinar, región Cusco – Perú. Geográficamente, la unidad minera se localiza aproximadamente a 256 km al sureste de la ciudad del Cusco y a 265 km al noreste de la ciudad de Arequipa.

El área de estudio se circunscribe específicamente al Tajo Sur, durante el desarrollo de la fase 8 de explotación, donde se ejecutan actividades de profundización y ampliación del tajo. La investigación se enfoca en las zonas operativas del fondo del tajo, rampas de acceso y niveles intermedios, donde se presenta la acumulación de aguas subterráneas y pluviales que afectan las operaciones mineras.

Desde el punto de vista hidrográfico, la Unidad Minera Antapaccay se ubica en la parte media de la subcuenca Cañipia, donde las quebradas Coropuquio, Tacu Tacu, Aguada, Minas Mayu y Ccatu Mayu drenan hacia el río Cañipia, influyendo en la acumulación de agua en el fondo del tajo.

Geológicamente, el área de estudio se localiza en el extremo sureste del cinturón Andahuaylas–Yauri, caracterizado por yacimientos tipo skarn, como Tintaya, cuya estructura geológica condiciona el comportamiento del macizo rocoso y de las aguas subterráneas.

1.5.2. Delimitación Temporal

La investigación se desarrolló durante el período comprendido entre enero de 2024 y julio de 2024, abarcando un tiempo total de siete (7) meses, durante los cuales se realizó la recopilación de información técnica, operativa y de campo relacionada con el sistema de evacuación de aguas en el Tajo Sur fase 8.

Durante este período se efectuaron observaciones directas en campo, revisión de registros operacionales, recopilación de datos hidráulicos y análisis de las condiciones hidrogeológicas y operativas existentes, correspondientes a las distintas etapas del avance de la fase 8 del tajo. La delimitación temporal considera tanto la época de estiaje como la temporada de lluvias, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema de drenaje bajo diferentes condiciones hidrológicas.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

2.1.1. Antecedentes Internacionales

- Ortíz Ramírez (2014) **"Diseño e implementación del sistema de bombeo principal del sector A – Mina Calenturitas, propiedad de C.I. Prodeco S.A."** Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero en Minas, presentada en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – Sogamoso / Colombia.

El estudio abordó como problema principal la deficiente gestión y control de las aguas superficiales y subterráneas en el sector A de la mina Calenturitas, situación que ocasionaba pérdidas operativas significativas, registrándose hasta 558 horas de inactividad anual por lluvias y acumulación de agua en el tajo. La metodología empleada fue de tipo aplicada, con un diseño descriptivo–analítico, sustentada en el análisis hidrológico, hidrogeológico y climatológico de la zona, cálculo de áreas aferentes mediante el método de la curva numérica, determinación de caudales de diseño, pérdidas de carga en tuberías y cálculo de potencias hidráulicas y al freno.

La muestra estuvo constituida por las líneas de bombeo existentes y los registros operativos de la mina durante el periodo de análisis. Los resultados permitieron dimensionar e implementar un sistema de bombeo principal capaz de evacuar los volúmenes de agua generados, reduciendo los tiempos de inactividad operativa, optimizando el manejo de aguas persistentes y garantizando condiciones de trabajo seguras, evidenciándose una mejora sustancial en la continuidad operativa y en el control del drenaje del tajo.

- Ünsal (2013) **"Assessment of Open Pit Dewatering Requirements and Pit Lake Formation for Kışladağ Gold Mine, Uşak-Turkey"** Tesis doctoral para optar el grado de Doctor of Philosophy in Geological Engineering, presentada en Middle East Technical University – Ankara, Turquía.

La investigación abordó la necesidad de determinar los requerimientos de desaguado del tajo abierto de la mina de oro Kışladağ durante su etapa operativa y evaluar la formación del lago final de mina después del cierre. La metodología consistió en la elaboración de un modelo conceptual hidrogeológico, seguido de la construcción y calibración de un modelo numérico de flujo subterráneo en régimen permanente y transitorio, complementado con análisis de sensibilidad y balance hídrico. Los resultados demostraron que los caudales de ingreso al tajo obtenidos mediante simulación transitoria alcanzaron valores máximos aproximadamente dos veces mayores que los calculados en estado estacionario, aunque los valores promedio resultaron similares, validando la confiabilidad del modelo. Asimismo, se determinó que, tras el cese de las actividades de bombeo, el lago de mina alcanzaría una condición de equilibrio a una elevación de 816 m luego de aproximadamente 585 años, identificándose una cota crítica de 829 m, por encima de la cual el sistema podría afectar la calidad de las aguas subterráneas aguas abajo. Estos resultados permitieron establecer criterios de diseño para el control hidrogeológico y la planificación del cierre de mina.

- Cahyono, Sari, Sikopa y Warayaan (2025) **"Technical Study of the Drainage System (Mine Dewatering) at the Open Mine at PT. Bukit Makmur Istindo Nikeltama"** Artículo científico publicado en Journal Teknik Sipil dan Lingkungan – Indonesia.

El estudio tuvo como finalidad evaluar el sistema de drenaje existente en una mina a cielo abierto de níquel afectada por precipitaciones intensas que ocasionaban inundaciones y reboses en las estructuras de control de agua. La metodología empleó un enfoque cuantitativo y cualitativo basado en el análisis de registros pluviométricos correspondientes al periodo 2014–2023, cálculos hidrológicos mediante la distribución Log Pearson III y evaluación hidráulica de zanjas, sumideros y pozas de sedimentación. Los resultados determinaron una precipitación de diseño de 142.25 mm/día y una intensidad de lluvia de 23.31 mm/h. Se calculó un caudal de ingreso al sump principal de 7,771 m^3/día y capacidades de conducción de 1.78 m^3/s, 1.85 m^3/s y 2.20 m^3/s para las tres zanjas principales. Asimismo, se comprobó que la poza de sedimentación existente, con capacidad de 7,025 m^3, era insuficiente para almacenar un ingreso total de 8,293 m^3/día. Como medida correctiva se recomendó incrementar en 5 m la altura de los compartimientos de sedimentación e instalar una bomba Ebara 200 × 150 FS4NA adicional para garantizar la evacuación del agua y la continuidad de las operaciones mineras.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

- Cansaya Vara (2017) **"Diseño e implementación del sistema de drenaje para mejorar el sistema de acarreo de mineral en la mina Antapaccay – 2016"** Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico Eléctrico, presentada en la Universidad Nacional del Altiplano – Puno / Perú.

La investigación tuvo como problema la acumulación de agua en el tajo de la mina Antapaccay producto de precipitaciones y la presencia de flujos subterráneos, lo cual afectaba directamente el sistema de acarreo de mineral y la continuidad de las operaciones mineras. La metodología utilizada fue de tipo aplicada, con un diseño descriptivo y enfoque cuantitativo,

basada en cálculos hidráulicos, análisis de pérdidas de carga, selección de bombas y dimensionamiento de tuberías HDPE. Se evaluaron caudales del orden de 400 l/s, empleando bombas de 95 HP, 140 HP y 275 HP, con tensiones de operación de 460 V, distribuidas en pozas ubicadas entre los niveles 3735 y 4000 msnm. Los resultados evidenciaron que el sistema de drenaje implementado permitió evacuar eficientemente el agua acumulada, reducir fallas operativas en el acarreo de mineral y garantizar la operación continua del tajo, respaldando técnicamente la selección de equipos mediante cálculos de potencia, NPSH y curvas características de las bombas.

- Barreto (2017) **"Optimización del sistema de bombeo – construcción y drenaje – Unidad Minera Antapaccay"** Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de Minas, presentada en la Universidad Nacional de San Agustín – Arequipa / Perú.

El estudio abordó como problema la baja eficiencia y rendimiento del sistema antiguo de bombeo de aguas de fondo en la mina Antapaccay, el cual no permitía evacuar adecuadamente los caudales generados, afectando la explotación minera. La metodología fue de tipo aplicada, con diseño experimental y comparativo, considerando el análisis del sistema de bombeo existente y el diseño de un nuevo sistema optimizado. Se realizaron cálculos de potencia, caudales y pérdidas de carga para la selección de bombas Flygt MT, Gorman Rupp, Goulds Pump y Sulzer, evaluando indicadores de eficiencia y rendimiento. Los resultados mostraron una mejora significativa, incrementándose la eficiencia del sistema de 65 % a valores de hasta 81,88 %, y el rendimiento de las bombas hasta un 98 %, evidenciando una optimización del drenaje del fondo de mina y una mejora sustancial en los indicadores operativos del sistema de bombeo.

- Cano Carlos (2022) **"Sistema de drenaje de agua para la unidad minera Pallancata"** Monografía técnica para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, presentada en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, Perú.

La investigación se desarrolló con el propósito de evaluar y describir el sistema de drenaje de agua implementado en la Unidad Minera Pallancata, ubicada en Ayacucho, considerando las condiciones operativas y los requerimientos hidráulicos necesarios para garantizar la continuidad de la explotación minera. La metodología empleada correspondió a una monografía técnica basada en el análisis de información operativa, evaluación de infraestructura de drenaje y revisión de parámetros hidráulicos relacionados con la captación, conducción y evacuación de aguas en mina. El estudio permitió identificar las características técnicas del sistema de drenaje utilizado en la operación, describiendo los mecanismos de control y evacuación de agua implementados para reducir riesgos operativos asociados a la acumulación de aguas subterráneas y superficiales. Se concluyó que el sistema de drenaje constituye un componente fundamental para mantener condiciones seguras de operación, minimizar interrupciones en la producción y garantizar la estabilidad de las labores mineras.

- Muñoz Mallqui (2022) **"Mejoramiento del sistema de bombeo para el control de inundaciones y desbordes Unidad Minera Ticlio – Volcan S.A.A., 2022"** Tesis para optar el título profesional de Ingeniero de Minas, presentada en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga – Ayacucho, Perú.

La investigación abordó la problemática de las inundaciones y desbordes generados por la presencia de aguas subterráneas y filtraciones en las labores mineras de la Unidad Minera Ticlio. La metodología correspondió a una investigación aplicada de enfoque cuantitativo, utilizando como población el sistema de bombeo interior mina y evaluando las condiciones geomecánicas, operativas y de gestión asociadas al drenaje. Los resultados evidenciaron que el sistema mejorado fue diseñado para operar con caudales de hasta 140 L/s, garantizando la continuidad de la operación minera sin riesgos significativos de inundación. Asimismo, se verificó la capacidad de funcionamiento de las bombas con concentraciones de sólidos suspendidos de hasta 300 ppm y se establecieron programas de mantenimiento, monitoreo y control para

optimizar la eficiencia del sistema. Las conclusiones demostraron que el mejoramiento implementado permitió incrementar la seguridad operativa, reducir el riesgo de desbordes y asegurar la continuidad de las actividades mineras mediante un control eficiente del agua.

2.2. BASES TEÓRICAS

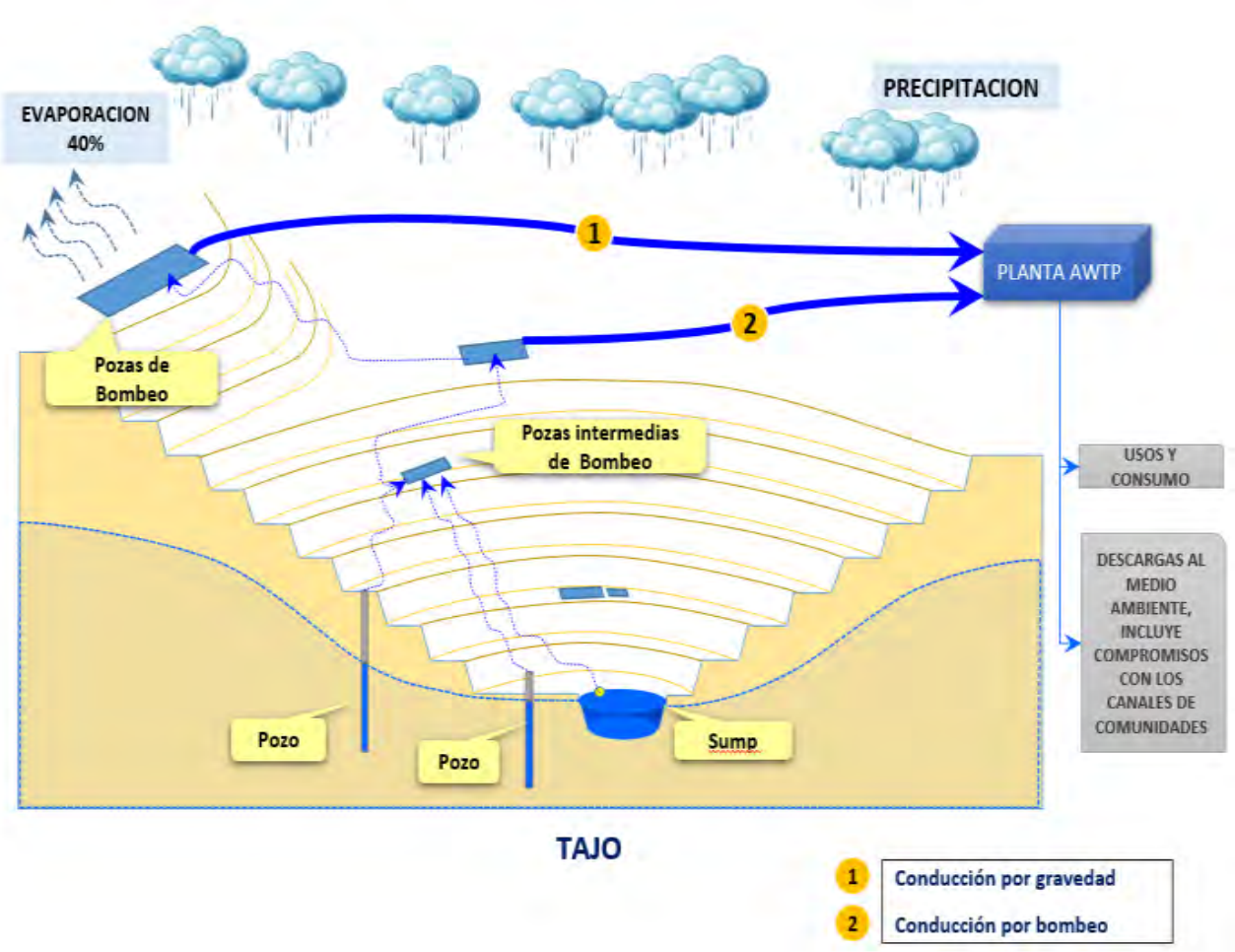
2.2.1. La Gestión del Agua en Minería a Tajo Abierto

La presencia de agua en las explotaciones mineras a tajo abierto constituye uno de los principales factores que condicionan la seguridad, la estabilidad geotécnica y la continuidad operativa. Según Younger, Banwart y Hedin (2002), el agua subterránea y superficial puede transformarse en un problema crítico cuando no se implementan sistemas de control adecuados, generando inundaciones, fallas en taludes y paralizaciones prolongadas de las operaciones extractivas.

En tajos profundos, la intersección del nivel freático con el avance de la explotación incrementa progresivamente los volúmenes de agua a evacuar, lo que exige la aplicación de sistemas de drenaje técnicamente diseñados. En este contexto, la gestión del agua no solo cumple una función operativa, sino también ambiental, al prevenir la migración de contaminantes y la infiltración no controlada hacia los acuíferos circundantes. (Véase en la Figura 1, en la siguiente página)

Figura 1

Drenaje típico de un tajo en Minería Superficial



Nota. Rios (2022)

2.2.2. Bomba

Desde el punto de vista hidráulico, una bomba es una máquina destinada a transferir energía mecánica a un fluido, incrementando su energía hidráulica y permitiendo su desplazamiento a través de un sistema de conducción. Karassik et al. (2016) señalan que este proceso se basa en la conversión de energía mecánica en energía hidráulica, manifestada en el aumento de la altura manométrica del fluido.

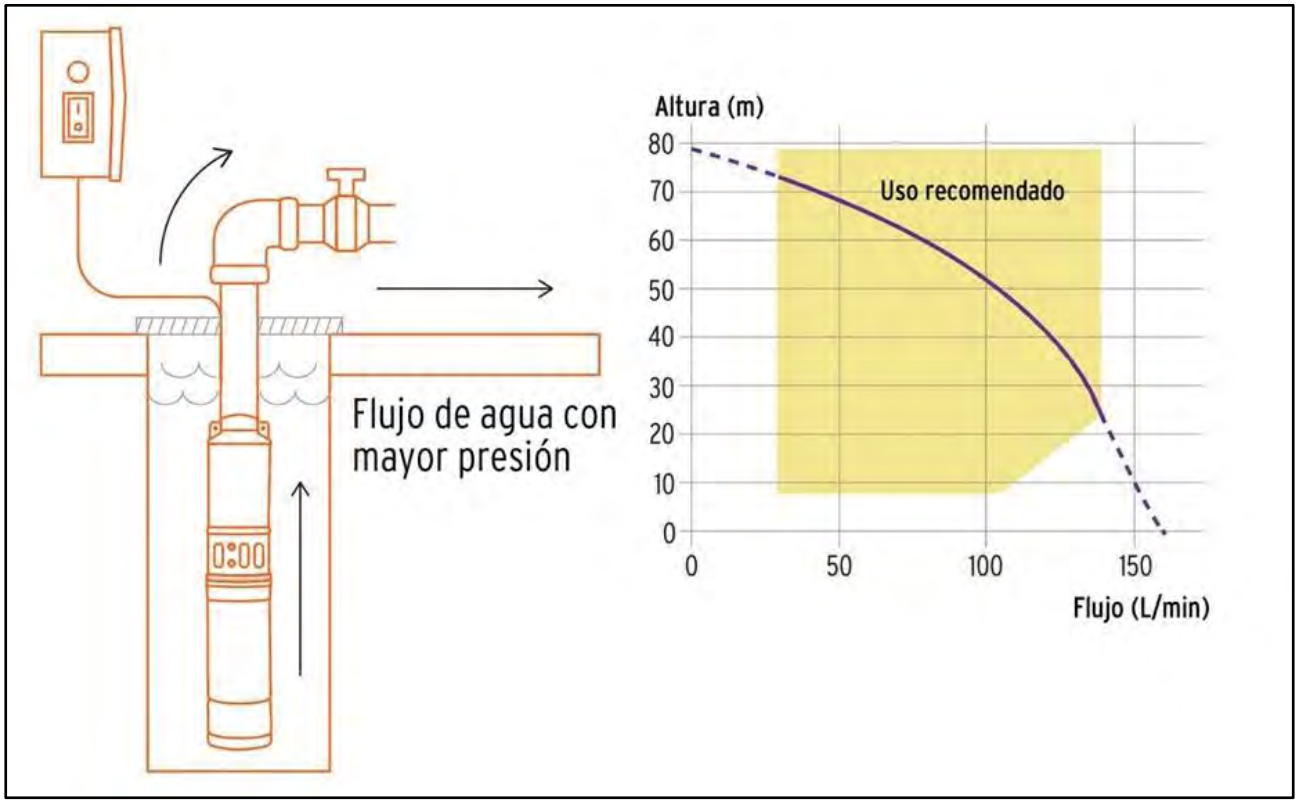
En sistemas de drenaje minero, las bombas deben seleccionarse considerando el caudal requerido, la altura dinámica total y las condiciones operativas del entorno, tales como la

presencia de sólidos, las características químicas del agua y la necesidad de operación continua. Una selección inadecuada puede generar pérdidas de eficiencia, desgaste prematuro y elevados costos de mantenimiento.

La Figura 2 presenta una curva característica de altura–caudal (H–Q) de una bomba centrífuga. El eje horizontal representa el caudal, expresado en L/min, y el eje vertical, la altura de bombeo, expresada en metros. Se observa que la altura suministrada disminuye conforme aumenta el caudal, mientras que el área sombreada indica el rango de operación recomendado. Esta curva permite evaluar si la bomba puede proporcionar el caudal y la altura requeridos por el sistema de drenaje.

Figura 2

Curva característica de altura–caudal (H–Q) de una bomba centrífuga



. *Nota.* Karassik et al. (2016).

2.2.3. Tipo de Abastecimiento

El tipo de abastecimiento en un sistema de bombeo se define por la presencia o ausencia de estructuras de almacenamiento posteriores a la estación de bombeo. Cuando el sistema incorpora reservorios o pozas, el diseño hidráulico se basa en el caudal máximo diario y el número efectivo de horas de operación, permitiendo una regulación del flujo evacuado.

Por el contrario, en sistemas sin almacenamiento, el bombeo debe dimensionarse considerando el caudal máximo horario y las pérdidas de carga en la red de impulsión. Este tipo de configuración es común en sistemas de bombeo progresivo, donde el agua es evacuada por etapas mediante pozas intermedias, optimizando el rendimiento hidráulico y reduciendo la carga por estación (Younger et al., 2002).

2.2.4. Tipos de Bombas

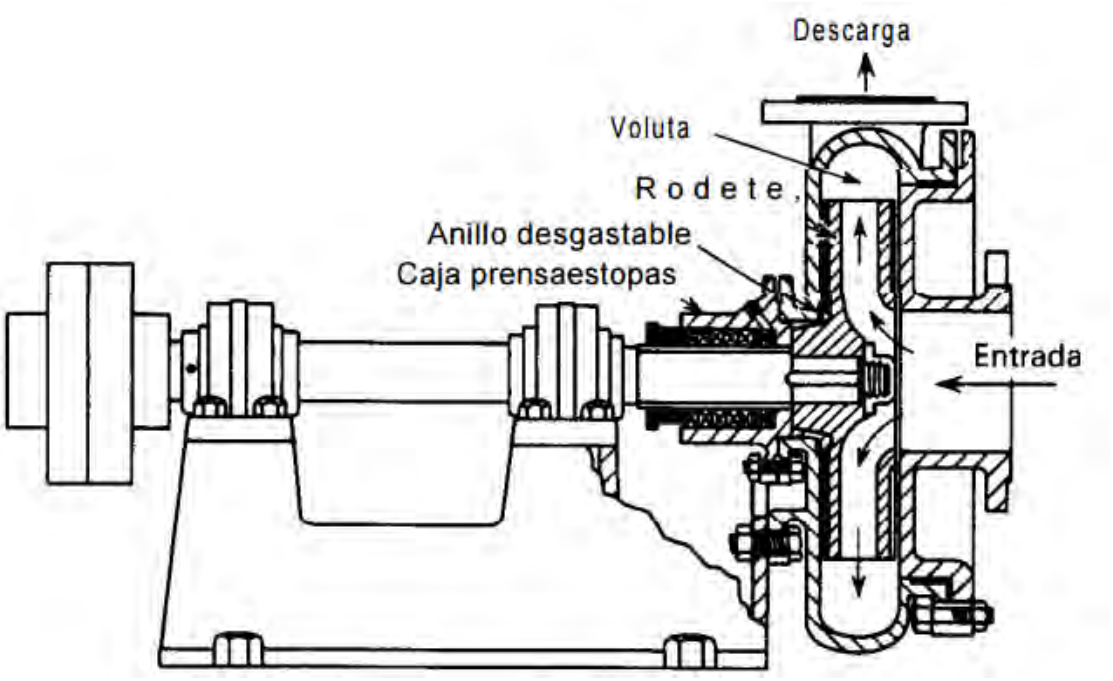
2.2.4.1. Bombas Centrífugas Horizontales

Las bombas centrífugas horizontales presentan el eje de transmisión en posición horizontal y se caracterizan por su facilidad de instalación y mantenimiento. Su aplicación es frecuente en sistemas de superficie o estaciones auxiliares donde la altura de succión es reducida (Karassik et al., 2016).

En las bombas centrífugas horizontales, el funcionamiento se basa en la rotación del rodete, el cual genera la fuerza centrífuga necesaria para impulsar el fluido. El agua ingresa por la entrada hacia el centro del rodete, es acelerada radialmente y posteriormente es conducida por la voluta hasta la descarga, aumentando su presión y velocidad; este proceso y sus componentes principales pueden observarse en la Figura 3.

Figura 3

Diagrama de bomba centrífuga horizontal



Nota. Fajardo (2017)

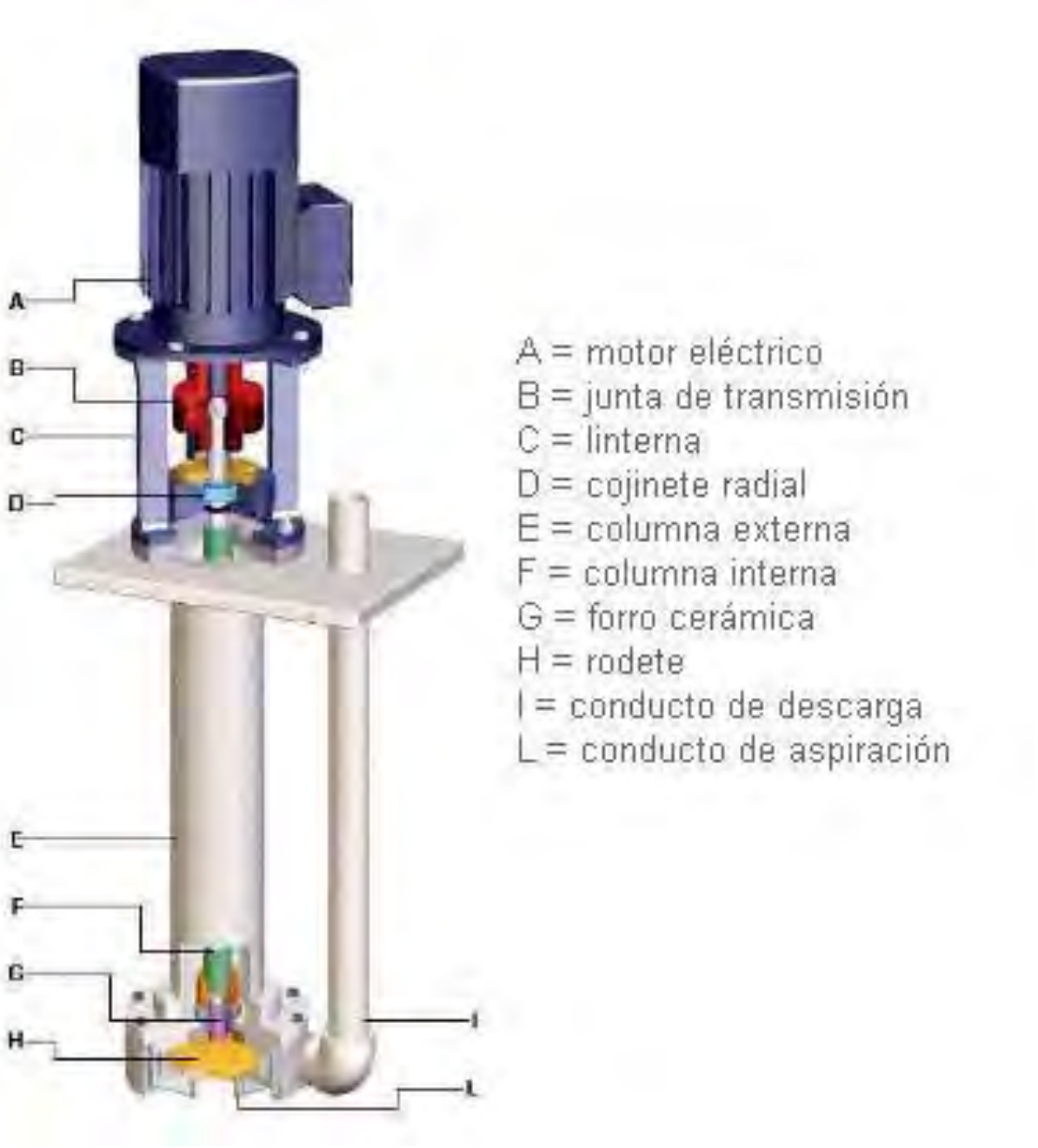
2.2.4.2. Bombas Centrífugas Verticales

Las bombas centrífugas verticales operan mediante impulsores dispuestos en serie, permitiendo vencer grandes alturas manométricas. Su uso se limita principalmente a pozos profundos y captaciones verticales, donde se requiere elevar el agua por etapas.

En las bombas centrífugas verticales, el funcionamiento se basa en la rotación del rodete, el cual transmite energía al fluido mediante la fuerza centrífuga. El agua ingresa por el conducto de aspiración, es impulsada por el rodete y asciende a través de la columna interna hasta el conducto de descarga, incrementando su presión para su transporte; este proceso y los principales componentes del sistema pueden observarse en la Figura 4, que se puede apreciar en la siguiente página (Karassik et al., 2016).

Figura 4

Diagrama de Bomba Centrífuga Vertical



Nota. Diagrama obtenido de Aguamarket (2025)

2.2.4.3. Bombas Sumergibles

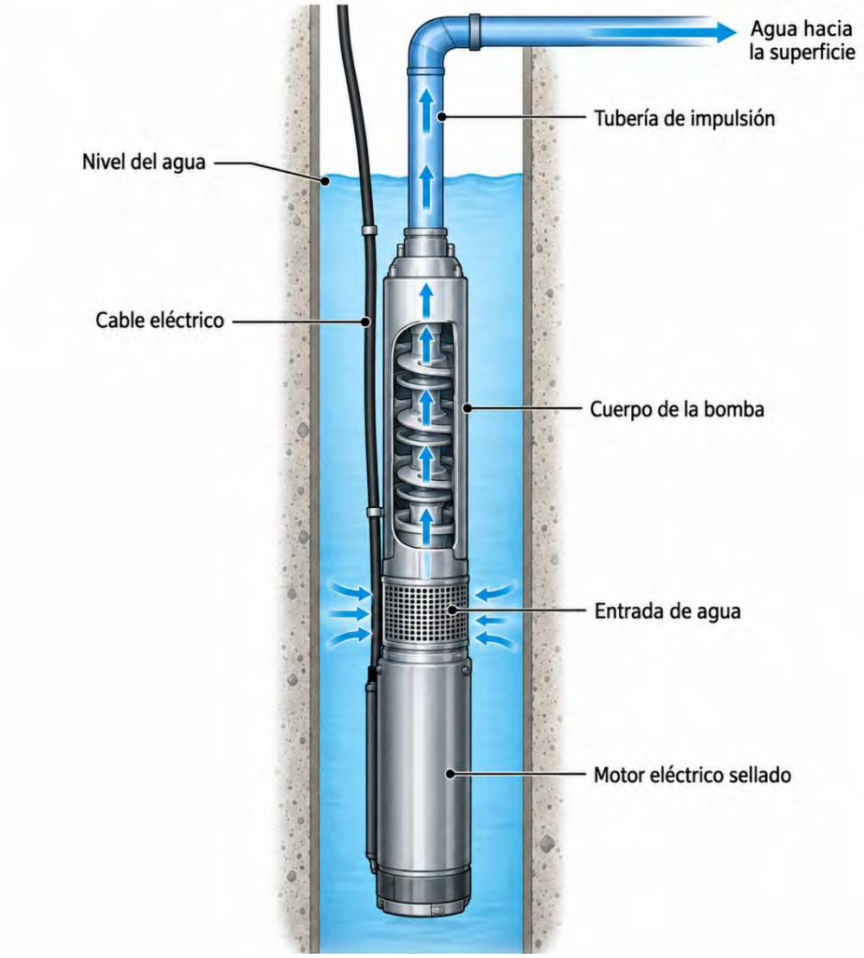
Las bombas sumergibles integran motor y bomba en un conjunto herméticamente sellado, diseñado para operar completamente sumergido. Según Karassik et al. (2016), este tipo de

bombas ofrece ventajas significativas en drenaje minero, debido a su alta eficiencia, menor riesgo de cavitación y mejor disipación térmica, siendo ampliamente utilizadas en sistemas de bombeo progresivo en tajos profundos.

En las bombas sumergibles, el funcionamiento se basa en la integración del motor eléctrico y la bomba en un conjunto herméticamente sellado que opera completamente sumergido en el fluido. El agua ingresa por la entrada inferior, es impulsada por el rodete y conducida hacia la superficie a través del conducto de descarga, mientras el motor es refrigerado por el propio fluido bombeado; este proceso y sus componentes principales se ilustran en la Figura 5.

Figura 5

Diagrama de Bomba Eléctrica Sumergible



Nota. Diagrama obtenido de Aguamarket (2025)

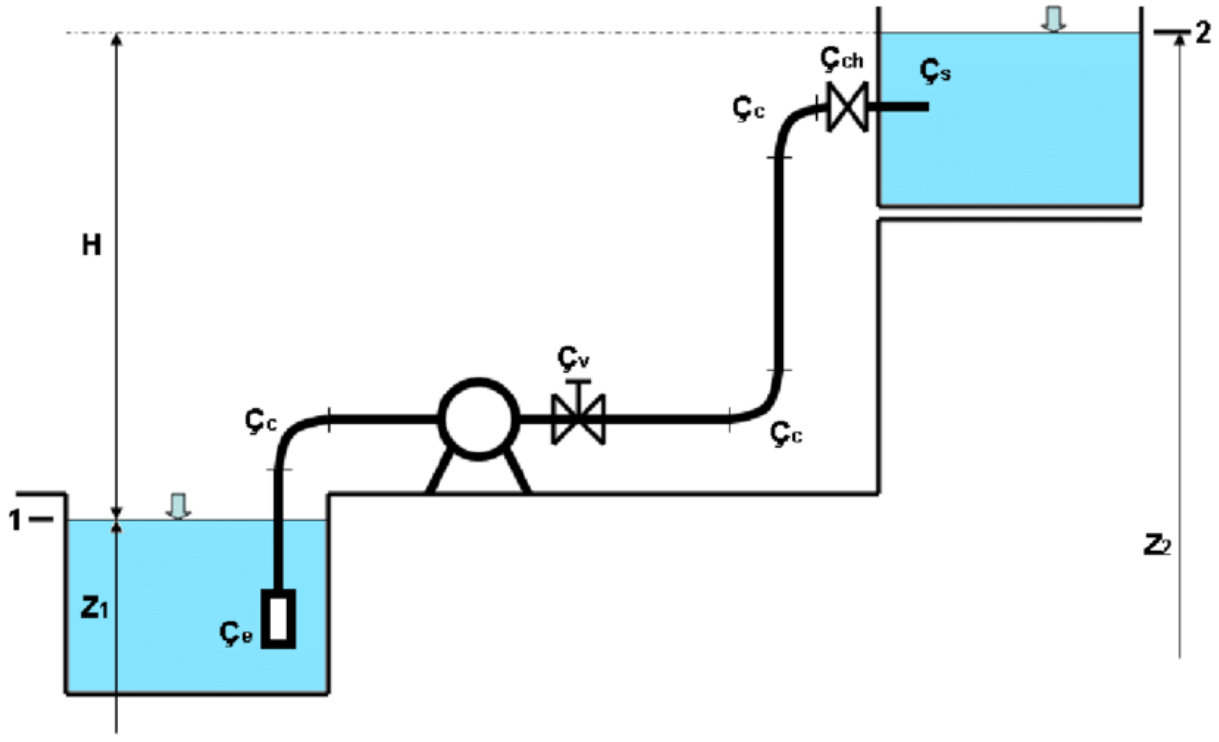
2.2.5. Sistema de Bombeo Progresivo

El sistema de bombeo progresivo consiste en la evacuación del agua mediante estaciones sucesivas de rebombeo, utilizando pozas intermedias ubicadas a diferentes cotas. Younger et al. (2002) indican que este sistema resulta especialmente eficiente en explotaciones mineras profundas, donde la altura total de bombeo excede la capacidad técnica y económica de una sola estación.

Este tipo de sistema permite reducir la carga hidráulica por etapa, mejorar la eficiencia de las bombas y facilitar el control de sedimentos, contribuyendo a la estabilidad operativa y a la continuidad del avance del tajo. (Véase en la Figura 6)

Figura 6

Esquema típico de un sistema de bombeo progresivo por niveles



Nota. Sandoval (2020)

2.2.6. Consideraciones en el Diseño y Cálculo de Tuberías de Impulsión

El diseño de las tuberías de impulsión debe considerar velocidades admisibles, pérdidas de carga y fenómenos transitorios como el golpe de ariete. De acuerdo con Karassik et al. (2016), velocidades excesivas incrementan las pérdidas energéticas y el desgaste del sistema, mientras que velocidades muy bajas favorecen la sedimentación.

Asimismo, es indispensable la instalación de válvulas de retención, válvulas de control y anclajes estructurales en cambios de dirección, garantizando la seguridad hidráulica y estructural del sistema.

2.2.6.1. Caudal de diseño

El caudal de diseño de una línea de impulsión corresponde al volumen máximo de agua que debe evacuarse durante el periodo de mayor demanda hidráulica, el cual, en minería a tajo abierto, está asociado al caudal máximo diario generado por la combinación de aguas subterráneas, escorrentía superficial y precipitaciones pluviales. Según Younger, Banwart y Hedin (2002), la correcta estimación de este caudal es fundamental para evitar sobrecargas del sistema de drenaje y paralizaciones operativas.

Dado que los sistemas de bombeo no operan de manera continua durante las 24 horas del día, resulta necesario ajustar el caudal de bombeo en función del número real de horas de operación. En este sentido, el caudal de bombeo se expresa mediante la relación:

$$Q_b = \frac{Q_{md} * 24}{N}$$

Donde:

Qb = caudal de bombeo (L/s)

Qmd = caudal máximo diario (L/s)

N = número de horas efectivas de bombeo (hrs)

2.2.6.2. Selección del diámetro de la tubería de impulsión

La selección del diámetro de la tubería de impulsión influye directamente en la velocidad del flujo, las pérdidas de carga y la potencia requerida por el sistema de bombeo. Un diámetro inadecuado puede generar velocidades excesivas, desgaste prematuro de la tubería o sedimentación de sólidos, afectando la eficiencia del sistema (Karassik et al., 2016).

Para la estimación preliminar del diámetro se emplea la fórmula de Bresse, ampliamente utilizada en el diseño hidráulico por su enfoque económico, la cual se expresa como:

$$\mathrm{D} = \mathrm{K}\sqrt{Q}$$

Donde:

D = diámetro económico de la tubería (m)

K = coeficiente empírico (0.9 – 1.0)

Q = caudal de bombeo (m^3/s)

Cuando el sistema de bombeo opera un número limitado de horas al día, el diámetro puede ajustarse considerando el factor de operación diaria, según la expresión:

$$\mathrm{D} = 1.3 * \lambda^{\frac{1}{4}}\sqrt{Q}$$

$$\mathrm{con:}\ \lambda = \frac{\mathrm{N}}{24}$$

Una vez determinado el diámetro teórico, se seleccionan diámetros comerciales cercanos y se verifica que las velocidades del flujo se mantengan dentro de rangos admisibles, generalmente entre 0.6 y 2.0 m/s. Posteriormente, se evalúan las pérdidas de carga y la potencia requerida, seleccionándose el diámetro que represente el menor costo global del sistema.

2.2.6.3. Altura Dinámica Total (Ht)

La altura dinámica total representa la energía total que el conjunto motor–bomba debe suministrar al fluido para vencer las condiciones geométricas e hidráulicas del sistema. De acuerdo con Karassik et al. (2016), esta altura se compone de la suma de la altura geométrica,

las pérdidas de carga por fricción y las pérdidas locales, además de la presión requerida en el punto de descarga.

Matemáticamente, la altura dinámica total se expresa como:

$$\mathrm{H_t} = \mathrm{H_g} + \mathrm{H_{f_{total}}}$$

Donde:

Ht = altura dinámica total del sistema, expresada en metro

Hs = altura de succión

Hd = altura de descarga

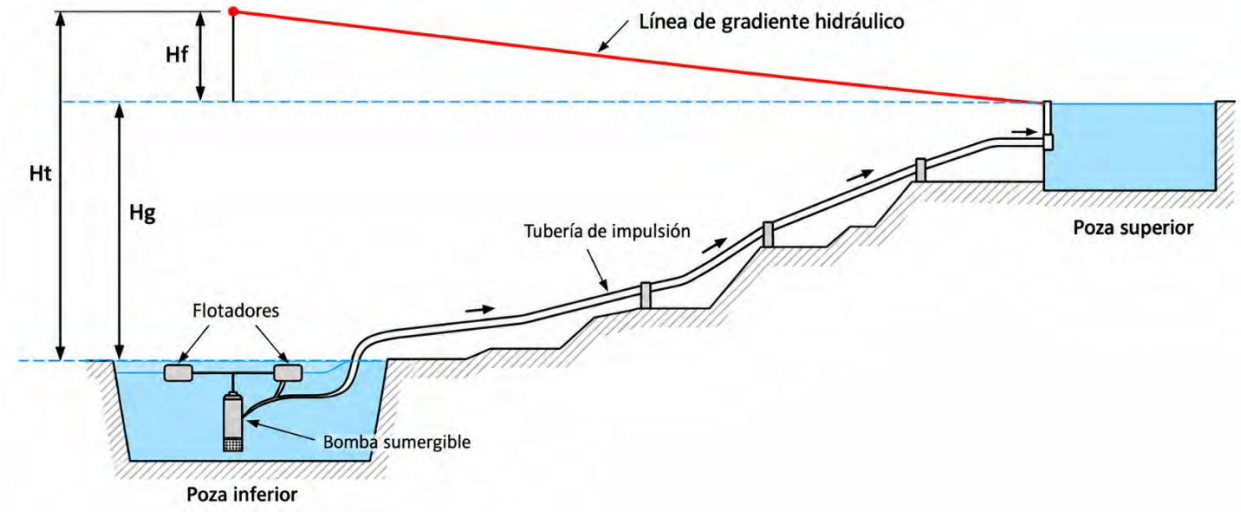
$Hg = Hs + Hd$ = altura geométrica total

$Hftotal$ = pérdidas de carga totales

Ps = presión de llegada al reservorio

Figura 7

Línea de gradiente hidráulico



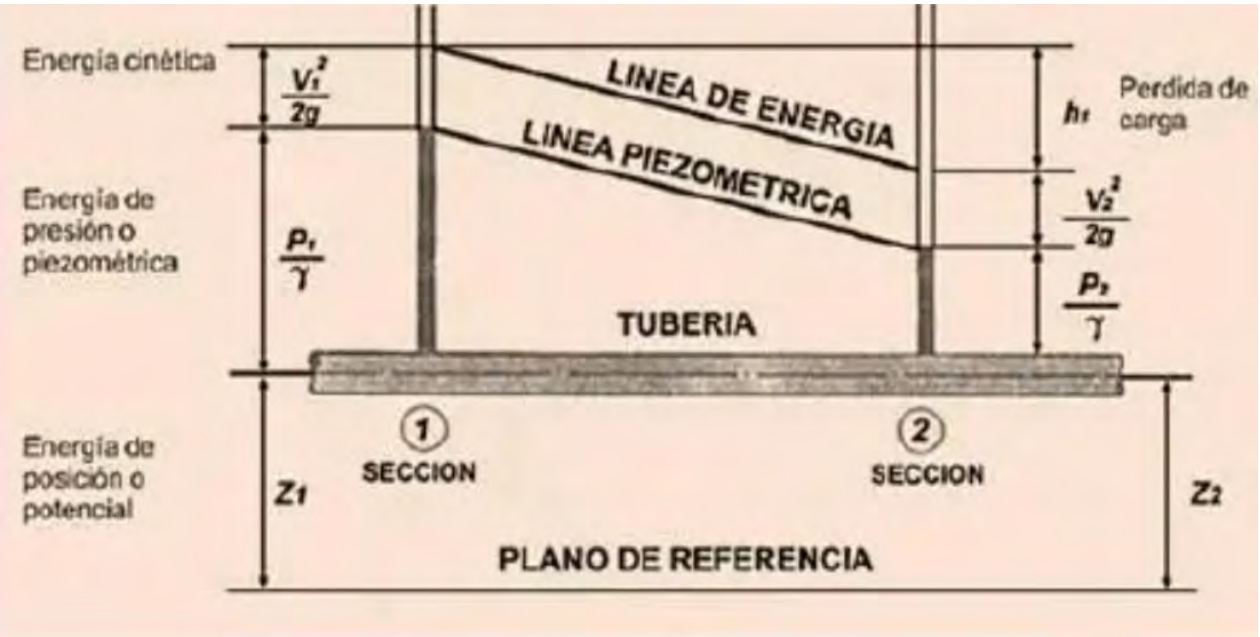
Nota. Elaboración Propia

La Línea de Gradiente Hidráulico (LGH) representa la variación de la energía piezométrica del fluido a lo largo de una tubería de impulsión, mostrando la disminución progresiva de la presión conforme el agua se desplaza entre dos secciones, debido principalmente a las pérdidas de carga por fricción y efectos internos del flujo; asimismo, la Línea

de Energía (LE) se sitúa por encima de la LGH al incluir la energía cinética asociada a la velocidad del fluido, siendo la separación entre ambas líneas indicativa de dicho término, tal como se aprecia en la Figura 8.

Figura 8

Línea de gradiente hidráulico en una tubería de impulsión



Nota. Lopez (s.f.)

2.2.6.4. Potencia requerida de la bomba

La potencia de la bomba corresponde al trabajo necesario para elevar el caudal de diseño hasta la altura dinámica total, considerando la eficiencia del equipo. Desde el enfoque hidráulico, la potencia se calcula mediante la expresión:

$$\text{Potencia (HP)} = \frac{\gamma * \text{Q} * \text{H}_\text{t}}{746 * \eta}$$

Donde:

γ = peso específico del agua (N/m³)

Q = caudal de impulsión (m³/s)

Ht = altura dinámica total (m)

η = eficiencia de la bomba

Este cálculo permite seleccionar equipos de bombeo que operen dentro de rangos óptimos de eficiencia, reduciendo el consumo energético y aumentando la confiabilidad del sistema de drenaje (Karassik et al., 2016).

2.2.7. Diseño de la Línea de Impulsión

El caudal de diseño corresponde al volumen máximo de agua que debe evacuarse durante el periodo de diseño. Este valor se ajusta según el número real de horas de bombeo, evitando la sobredimensión del sistema. La selección del diámetro económico puede realizarse mediante métodos empíricos, como la fórmula de Bresse, evaluando posteriormente alternativas comerciales.

La altura dinámica total integra la altura geométrica, las pérdidas de carga y la presión requerida en el punto de descarga, constituyendo el parámetro fundamental para la selección de la potencia de la bomba (Karassik et al., 2016).

2.2.8. Tubería de Impulsión

La tubería de impulsión transporta el agua desde la estación de bombeo hasta el punto de descarga. En minería, su diseño debe considerar condiciones geotécnicas, accesibilidad del terreno y exposición a agentes químicos, garantizando una operación segura y duradera (Younger et al., 2002).

Diámetro de tubería de impulsión formula de Bresse:

$$D_i = k_3 * \left(\frac{N}{24}\right)^{0.25} * \sqrt{Q_b}$$

$$Q_b = \frac{24}{N} * Q_m$$

Donde:

D_i = diametro de tuberia de impulcion

N = numero de horas de bombeo

Qb = caudal de bombeo

K_3 = 1.1 a 1.5 generalmente K_3 = 1.3

2.2.9. Tubería HDPE (polietileno de alta densidad)

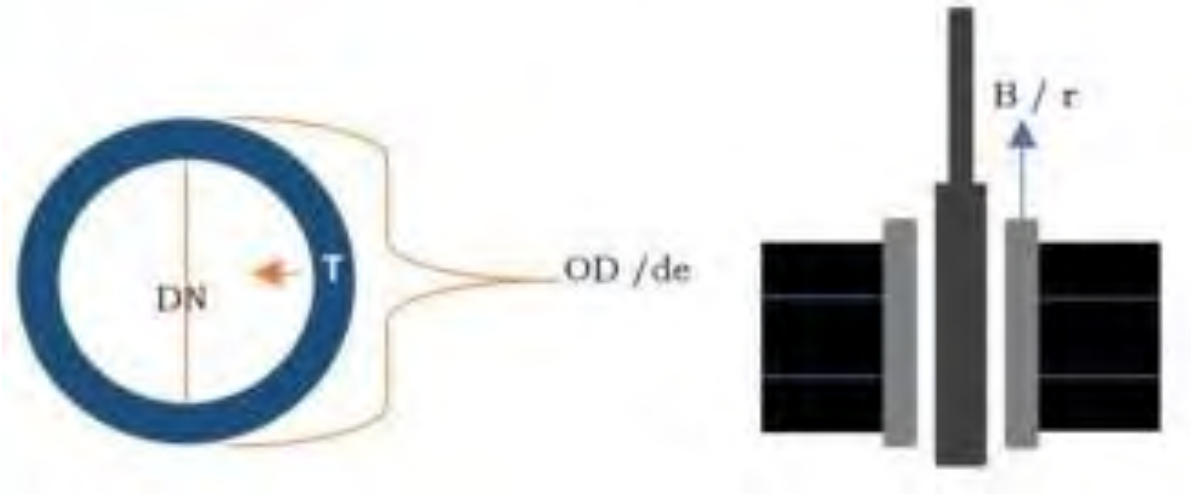
El HDPE es un material termoplástico ampliamente utilizado en sistemas de drenaje minero debido a su resistencia química, flexibilidad y durabilidad. Younger et al. (2002) destacan que estas propiedades reducen significativamente los riesgos de corrosión y fugas, prolongando la vida útil del sistema.

La relación dimensional estándar (SDR) define la capacidad de la tubería para resistir presiones internas, siendo un parámetro clave en el diseño hidráulico.

La Relación Dimensional Estándar (RDE o SDR) en tuberías de polietileno expresa la relación entre el diámetro nominal del tubo (DN) y el espesor de la pared (T), constituyendo un criterio fundamental para definir su capacidad de resistencia a la presión interna. Un valor de RDE menor indica una pared más gruesa y, por tanto, una mayor presión de trabajo admisible, mientras que valores mayores corresponden a tuberías con menor espesor relativo; esta relación geométrica entre diámetro y espesor se ilustra en la Figura 9, que se parecía en la siguiente página.

Figura 9

Relación dimensional estándar (SDR) en tuberías HDPE



Nota. Diagrama obtenido de Colindustria.com (2025)

Tabla 1

Propiedades de PE (polietileno)

Propiedades	Método de prueba	Unidad	PE 63	PE 80	PE 100
			Val. Típico	Val. Típico	Val. Típico
Densidad	ISO 1183	gr/cm	0.42	0.945	0.942
Densidad pigmentada	ISO1133	gr/cm	0.953	0.955	0.953
Índice de fusión	ISO 1133	gr/10 min	0.83	0.85	0.83
Módulo de flexión o alargamiento	ISO 6259	Mpa	21	21	21
Alargamiento a la rotura	ISO 6259	%	>600	>600	>600
Módulo de flexión a la rotura	ISO 6259	Mpa	30	34	30
Módulo de elasticidad	ISO 527	Mpa	1000	800	1000
Punto de ablandamiento vicat(1kg)	ISO 306	°C	125	125	125
Punto de ablandamiento vicat(5kg)	ISO 306	°C	72	72	72
Estabilidad térmica (OILT210°C)	ISO 10837	min	>20	>20	>20
MRR a 50 años y 20°C		Mpa/PSI	6.3/913	8.0/1160	10.0/1450
Máximo esfuerzo permisible de diseño hidráulico (σ)		Mpa/PSI	5.0/913	6.3/913	8.0/1160

Nota. Manual de soldadura HDPE (WIDOS)

Figura 10

PE (polietileno)

PE	σ^2_e Mpa/PSI	e pared mm	Interior mm	Aumento Sección	Aumento Capacidad de Conducción	Ahorro de material
 PE63	5.0/725	28.6	257.8	…	…	Peso = 22.07kg/ml
 PE 80	6.3/913	23.2	268.6	9%>PE63	12%>PE63	peso= 22.26kg/ml 12% con respecto al PE63
 PE100	8.0116	18.7	277.6	17%>PE63 7%>PE80	22%>PE63 9%>PE80	Peso = 18.32kg/ml 26.9% con respecto al PE63 17% con respecto al PE80

Nota. Manual de soldadura HDPE (WIDOS)

2.2.9.1. Relación del Diseño Hidráulico con Tuberías HDPE

Las tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE) son utilizadas en sistemas de drenaje minero debido a su resistencia química, flexibilidad y capacidad para soportar presiones internas elevadas. Un parámetro fundamental en su diseño es la Relación Dimensional Estándar (SDR), definida como:

$$SDR = \frac{D}{e}$$

Donde:

D = diámetro exterior de la tubería

e = espesor mínimo de pared

Según Younger et al. (2002), la correcta selección del SDR permite asegurar que la tubería resista las presiones generadas por la altura dinámica total del sistema, evitando fallas estructurales durante la operación del bombeo progresivo.

Presión Nominal (PN) de trabajo para un mismo SDR, pero con diferentes tipos de resina (PE63, PE80, PE100) En el siguiente análisis, podemos verificar que conforme se mejore las características de la resina (un PE100 tiene mejores características que un PE63); la tubería soportará mayores presiones de trabajo o presiones nominales.

Tabla 2

Presión Nominal

PE	SDR26	SDR17	SDR13.6	SDR11	SDR9	SDR7.4
	PN (Bares)					
PE 63 (σe = 5.0 MPa / 725 PSI)	4	6	8	10	|12.5	16
PE 80 (σe = 6.3 MPa / 913 PSI)	5	8	10	12.5	16	20
PE 100 (σe = 8.0 MPa / 1160 PSI)	6	10	12.5	16	20	25

Nota. Manual de soldadura HDPE (WIDOS)

2.2.10. Pozas Impermeabilizadas

Las pozas impermeabilizadas permiten la captación, almacenamiento temporal y sedimentación del agua antes del rebombeo. Según Younger et al. (2002), estas estructuras son esenciales para controlar sólidos en suspensión y evitar la infiltración de aguas contaminadas al suelo.

La instalación de las pozas impermeabilizadas inicia con la excavación y conformación del área según el diseño, asegurando taludes estables y una base regular. Posteriormente, se realiza la limpieza y compactación del fondo, sobre el cual se coloca el material impermeabilizante, generalmente una geomembrana, la cual se extiende cuidadosamente y se fija en los bordes para evitar desplazamientos. Finalmente, se verifican las uniones y la

continuidad del revestimiento para garantizar la estanqueidad de la poza y prevenir filtraciones, tal como se aprecia en la Figura 11.

Figura 11

Poza impermeabilizada para captación y almacenamiento temporal de agua



Nota. Elaboración Propia

2.2.11. Fundamentos Teóricos del Dimensionamiento de Área y Volumen en Pozas

El dimensionamiento del área y volumen de las pozas de captación, sedimentación y bombeo constituye un elemento esencial en el diseño de sistemas de drenaje en minería a tajo abierto, debido a que estas variables controlan la capacidad de almacenamiento temporal del agua, el tiempo de retención hidráulica y la eficiencia global del sistema de bombeo progresivo. De acuerdo con Younger, Banwart y Hedin (2002), un diseño inadecuado de estos parámetros

puede generar sobrecargas hidráulicas, rebalses, sedimentación acelerada y fallas operativas que afectan directamente la continuidad de la explotación minera.

Desde una perspectiva hidrogeológica y operativa, el área superficial de la poza influye en la reducción de la velocidad del flujo, favoreciendo la sedimentación de sólidos en suspensión y disminuyendo la carga de material particulado que ingresa a las bombas. Paralelamente, el volumen de almacenamiento permite regular las variaciones de caudal asociadas a precipitaciones, afloramientos del nivel freático y descargas intermitentes, actuando como un elemento amortiguador dentro del sistema de bombeo progresivo (Younger et al., 2002).

En operaciones mineras, es común el empleo de pozas con geometría de pirámide truncada invertida, debido a que esta configuración proporciona una adecuada estabilidad estructural de los taludes y facilita las labores constructivas y de mantenimiento. El volumen útil de este tipo de pozas se determina en función del área de la base inferior, el área de la base superior y la altura efectiva de almacenamiento, permitiendo estimar con precisión la capacidad requerida para garantizar un funcionamiento continuo del sistema de drenaje.

Asimismo, el análisis del área lateral y del área total de la poza resulta fundamental para el diseño del sistema de impermeabilización, ya que permite calcular la cantidad de geomembrana necesaria y evaluar las condiciones de anclaje y protección del revestimiento. Según Younger et al. (2002), un adecuado equilibrio entre área y volumen contribuye a minimizar la turbulencia interna del flujo, reduce la resuspensión de sedimentos y prolonga la vida útil de los equipos de bombeo y de las líneas de impulsión.

En el contexto del drenaje minero a tajo abierto, el dimensionamiento del área y volumen de las pozas debe realizarse considerando no solo el caudal de diseño, sino también factores como la tasa de sedimentación esperada, la frecuencia de limpieza de sólidos, la estabilidad geotécnica de los taludes y la progresividad del avance del tajo. De esta manera, las pozas cumplen eficientemente su función hidráulica, operativa y ambiental dentro del sistema de

bombeo progresivo, asegurando condiciones adecuadas para la continuidad de las operaciones mineras.

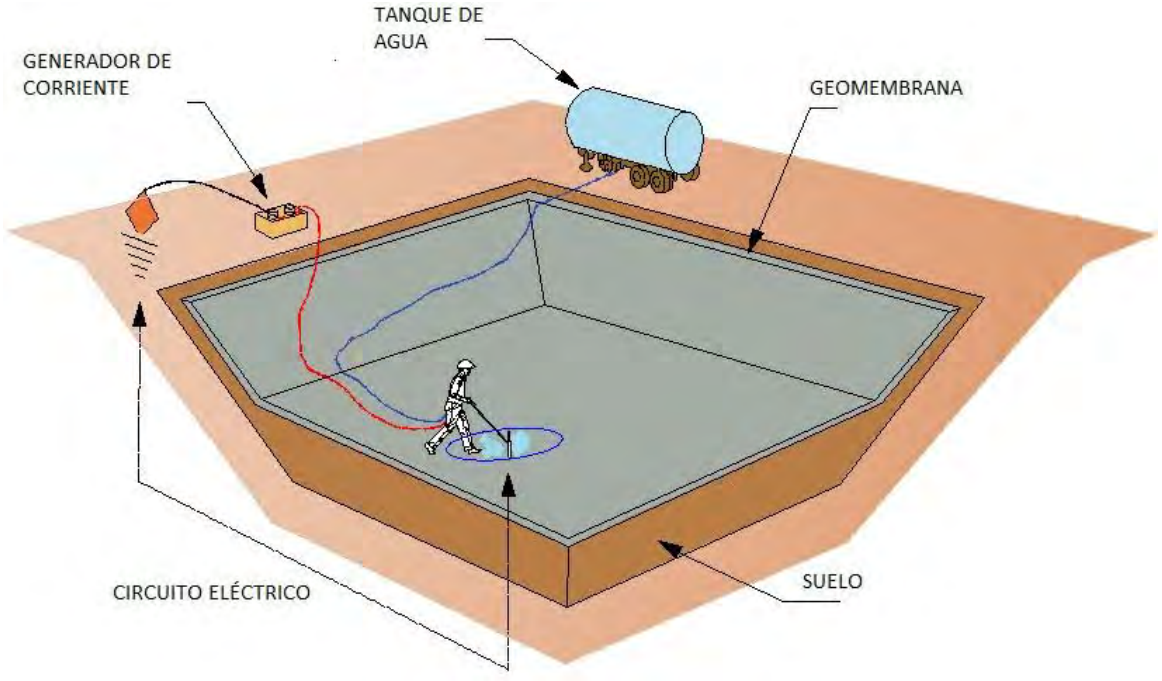
2.2.12. Impermeabilizador (geomembrana)

Las geomembranas de HDPE constituyen el principal sistema de impermeabilización en obras mineras, debido a su resistencia a la radiación ultravioleta, a los agentes químicos y a la intemperie. Su aplicación previene filtraciones, protege los acuíferos y contribuye al cumplimiento ambiental del proyecto (Younger et al., 2002).

La instalación del sistema impermeabilizador mediante geomembrana consiste en la preparación del terreno, asegurando una superficie uniforme y libre de elementos punzantes, seguida de la colocación y extendido de la geomembrana sobre el fondo y los taludes de la excavación. Posteriormente, las láminas son unidas mediante procesos de soldadura térmica para garantizar la continuidad del revestimiento y la estanqueidad del sistema, permitiendo prevenir filtraciones y proteger el suelo y los acuíferos, tal como se observa en la Figura 12.

Figura 12

Instalación de geomembrana HDPE como sistema de impermeabilización en pozas



Nota. Diagrama obtenido de geomatingenieria.com (2025)

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

2.3.1. Bomba

Una bomba es un equipo mecánico cuya función es transferir energía a un fluido, permitiendo su desplazamiento dentro de un sistema hidráulico mediante el incremento de presión y energía cinética (Karassik et al., 2016).

2.3.2. Sistema de Bombeo

El sistema de bombeo se define como el conjunto de equipos electromecánicos, tuberías y accesorios que operan de manera integrada para transportar agua desde un punto de captación hacia un punto de descarga, venciendo una diferencia de nivel y condiciones hidráulicas determinadas (Karassik et al., 2016).

2.3.3. Sistema de Bombeo Progresivo

El sistema de bombeo progresivo consiste en la evacuación del agua mediante estaciones de bombeo sucesivas apoyadas en pozas intermedias ubicadas a diferentes cotas, con el objetivo de reducir la carga hidráulica por etapa y mejorar el control del drenaje en operaciones mineras profundas (Younger et al., 2002).

2.3.4. Línea de Impulsión

La línea de impulsión es el tramo de tubería destinado a conducir el agua impulsada por una bomba desde la estación de bombeo hasta el punto de descarga o hacia una poza intermedia dentro del sistema hidráulico (Walski et al., 2003).

2.3.5. Caudal de Bombeo

El caudal de bombeo corresponde a la cantidad de agua que es transportada por el sistema de bombeo en una unidad de tiempo, constituyendo una variable fundamental para el diseño y control de los sistemas hidráulicos (Walski et al., 2003).

2.3.6. Altura Dinámica Total

La altura dinámica total es la energía total que el sistema de bombeo debe vencer para evacuar el agua, considerando la diferencia de nivel entre los puntos de captación y descarga, así como las pérdidas hidráulicas del sistema (Karassik et al., 2016).

2.3.7. Potencia de la bomba

La potencia de la bomba se define como la energía requerida por el equipo de bombeo para transportar el caudal de diseño hasta la altura dinámica total establecida, de acuerdo con las condiciones hidráulicas del sistema (Karassik et al., 2016).

2.3.8. Tubería

La tubería es un elemento tubular utilizado para la conducción de fluidos dentro de un sistema hidráulico, diseñado para operar bajo determinadas condiciones de caudal y presión (Walski et al., 2003).

2.3.9. Tubería HDPE

La tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) es un tipo de tubería plástica caracterizada por su resistencia química, flexibilidad y durabilidad, ampliamente utilizada en sistemas de drenaje y conducción de agua en minería (Walski et al., 2003).

2.3.10. Relación Dimensional Estándar (SDR)

La relación dimensional estándar (SDR) es el cociente entre el diámetro exterior de una tubería y el espesor de su pared, parámetro que permite clasificar la capacidad de resistencia de la tubería frente a presiones internas (Walski et al., 2003).

2.3.11. Pozas de Captación

Las pozas de captación son estructuras excavadas destinadas a recolectar y almacenar temporalmente el agua proveniente de fuentes subterráneas y superficiales dentro de una operación minera (Younger et al., 2002).

2.3.12. Pozas de Bombeo

Las pozas de bombeo son estructuras diseñadas para alojar equipos de bombeo, desde las cuales el agua captada es impulsada hacia niveles superiores o puntos de descarga dentro del sistema de drenaje (Younger et al., 2002).

2.3.13. Geomembrana

La geomembrana es un material geosintético impermeable utilizado para el revestimiento de pozas y estructuras hidráulicas, con la finalidad de evitar filtraciones y proteger el suelo y los acuíferos subyacentes (Younger et al., 2002).

2.3.14. Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas corresponden a las masas de agua almacenadas bajo la superficie del terreno en acuíferos y formaciones geológicas, las cuales pueden infiltrarse o aflorar en las labores mineras (Younger et al., 2002).

2.3.15. Drenaje minero

El drenaje minero se define como el conjunto de sistemas y acciones orientadas al control y evacuación de las aguas presentes en una operación minera, con el propósito de mantener condiciones operativas seguras y estables (Younger et al., 2002).

2.3.16. Talud

El talud es la superficie inclinada que conforma los flancos del tajo minero, cuya estabilidad puede verse afectada por la presencia y circulación del agua (Younger et al., 2002).

2.3.17. Impermeabilización

La impermeabilización es el proceso mediante el cual se aplican materiales impermeables en estructuras hidráulicas para impedir la filtración de agua hacia el terreno circundante (Younger et al., 2002).

2.3.18. Efectividad de evacuación

La efectividad de evacuación se refiere al grado en que el sistema de drenaje y bombeo logra evacuar oportunamente el agua acumulada en el tajo, evitando inundaciones y afectaciones a la continuidad operativa (Younger et al., 2002).

2.3.19. Eficiencia del sistema de bombeo

La eficiencia del sistema de bombeo es la relación entre el desempeño hidráulico del sistema y los recursos energéticos empleados para la evacuación del agua (Karassik et al., 2016).

2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1. Hipótesis General

- El diseño de un sistema de bombeo progresivo, sustentado en criterios operacionales, hidráulicos y geotécnicos, permitirá desarrollar una capacidad de evacuación de hasta 0.376 m^3/s, superior al caudal máximo de diseño de 0.250 m^3/s, para la evacuación de las aguas acumuladas en el fondo del Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar.

2.4.2. Hipótesis Específicos

- Los factores operacionales, hidráulicos y geotécnicos influyen en el diseño del sistema de bombeo progresivo para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar.
- La definición de una configuración adecuada de la línea de impulsión y de la ubicación de las pozas intermedias permite establecer un sistema de bombeo progresivo técnicamente viable para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar.
- El establecimiento de criterios técnicos para el dimensionamiento de las pozas y la selección de los equipos de impulsión permite desarrollar una propuesta técnicamente

sustentada para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar.

2.5. VARIABLES E INDICADORES

2.5.1. Variables Independiente

X1: Diseño de Sistema de Bombeo

2.5.2. Variables Dependiente

Y1: Eficiencia y Rendimiento del Sistema de Bombeo

Y2: Ejecución de Poza

2.5.3. Operacionalización de Variables

Tabla 3

Cuadro de Operacionalización de Variables

VARIABLE	DIMENSIÓN	DEFINICIÓN	INDICADOR	UNIDAD	ESCALA DE MEDICIÓN	INSTRUMENTO
X1: Diseño del sistema de bombeo progresivo (Causa)	Configuración hidráulica	Diseño de la red de impulsión para la evacuación de aguas acumuladas mediante bombeo progresivo.	Longitud de línea de impulsión	m	Razón	Plano de ingeniería del sistema de bombeo
			Número de tramos de bombeo	N°	Razón	Plano de ingeniería del sistema de bombeo
			Número de pozas intermedias	N°	Razón	Plano de disposición de pozas intermedias
	Dimensionamiento hidráulico	Parámetros técnicos requeridos para el funcionamiento del sistema de bombeo progresivo.	Altura dinámica total (ADT)	m	Razón	Memoria de cálculo hidráulico
			Diámetro de tubería HDPE	pulg	Razón	Especificaciones técnicas de tubería y planos de ingeniería
			Potencia requerida de bombeo	HP	Razón	Memoria de cálculo hidráulico y ficha técnica de la bomba
	Selección de equipos	Selección de equipos de impulsión de acuerdo con los requerimientos hidráulicos del sistema.	Número de bombas seleccionadas	N°	Razón	Memoria de selección de equipos
			Capacidad de bombeo instalada	m^3/s	Razón	Ficha técnica del equipo de bombeo
Y1: Efectividad de evacuación de aguas acumuladas (Efecto)	Capacidad de evacuación	Capacidad del sistema para evacuar las aguas acumuladas en el fondo del tajo.	Caudal de diseño	m^3/s	Razón	Memoria de cálculo hidráulico
			Caudal de evacuación	m^3/s	Razón	Memoria de calculo hidráulico
	Almacenamiento temporal	Capacidad de retención de agua en las pozas intermedias del sistema.	Volumen de pozas	m^3	Razón	Memoria de dimensionamiento de pozas
			Tiempo de almacenamiento	h	Razón	Memoria de cálculo hidráulico
	Operatividad hidráulica	Condiciones hidráulicas necesarias para garantizar el funcionamiento del sistema.	Velocidad de flujo	m/s	Razón	Reporte de cálculo hidráulico
			Pérdida de carga	m	Razón	Reporte de cálculo hidráulico

Nota. Elaboración Propia

CAPÍTULO III:

METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que está orientada a la solución de un problema específico relacionado con la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar, mediante el diseño de un sistema de bombeo progresivo sustentado en criterios hidráulicos, operacionales y geotécnicos. Asimismo, presenta un enfoque cuantitativo, ya que emplea la recopilación y análisis de datos numéricos asociados a variables técnicas del sistema de drenaje. Según Hernández Sampieri et al. (2014), el enfoque cuantitativo se fundamenta en la medición y análisis de datos para describir y explicar fenómenos mediante procedimientos sistemáticos y objetivos.

3.1.2. Nivel de Investigación

La presente investigación es de nivel descriptivo–propositivo. Es descriptiva porque permite identificar, caracterizar y analizar las condiciones operacionales, hidráulicas y

geotécnicas asociadas a la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar. Asimismo, es propositiva porque, a partir del diagnóstico realizado, se desarrolla una propuesta técnica consistente en el diseño de un sistema de bombeo progresivo. De acuerdo con Hernández Sampieri et al. (2014), los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades y características de un fenómeno determinado, constituyendo la base para el planteamiento de propuestas de solución sustentadas técnicamente.

3.1.3. Diseño de Investigación

El diseño de la investigación es no experimental, de corte transversal y de carácter retrospectivo. Es no experimental porque las variables se analizaron sin manipulación deliberada por parte del investigador; transversal porque se realizó una evaluación del sistema de bombeo, sin efectuar un seguimiento de su evolución temporal; y retrospectivo porque el análisis se desarrolló con posterioridad a su implementación, utilizando información técnica correspondiente al periodo comprendido entre enero y julio de 2024. Según Hernández Sampieri et al. (2014), los diseños no experimentales observan los fenómenos tal como ocurren en su ambiente natural para posteriormente analizarlos.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Población

La población de la presente investigación está constituida por los sistemas de evacuación de aguas implementados en las operaciones mineras a tajo abierto de la Unidad Minera Antapaccay durante el período enero–julio de 2024. Estos sistemas comprenden las pozas de captación y sedimentación, los equipos de bombeo y las líneas de impulsión utilizadas para la evacuación de aguas acumuladas en los tajos operativos de la unidad minera.

3.2.2. Muestra

La muestra está conformada por el sistema de evacuación de aguas acumuladas del Tajo Sur – Fase 8 de la Unidad Minera Antapaccay, el cual comprende la captación de aguas en el fondo del tajo, las pozas intermedias y superiores de sedimentación y rebombeo, las líneas de

impulsión mediante tuberías HDPE y los equipos de bombeo asociados al sistema de bombeo progresivo; dicha muestra fue seleccionada mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia (intencional), debido a que este sector concentra el problema operativo de acumulación de aguas, presenta accesibilidad para la evaluación de campo y dispone de información técnica suficiente para el análisis y desarrollo de la propuesta de diseño del sistema de drenaje.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1. Técnicas

Para la recolección de datos se emplearon las siguientes técnicas, acordes con el enfoque cuantitativo descriptivo de la investigación:

- Análisis documental, mediante la revisión de reportes técnicos, planos, registros operativos, memorias de cálculo y documentación interna relacionada con el sistema de drenaje y bombeo.
- Observación directa, aplicada al sistema de evacuación de aguas, a través del registro de fotografías, planos y videos, que permitieron identificar las condiciones reales de operación.
- Trabajos de campo, orientados a la recopilación de datos referenciales y exploratorios, tales como caudales, niveles de agua, geometría de pozas, rutas de líneas de bombeo y condiciones del terreno.
- Participación en reuniones técnicas con las áreas involucradas (drenaje, planeamiento y operaciones), con la finalidad de validar información operativa y criterios técnicos utilizados en el diseño.
- Procesamiento preliminar de datos, para la organización y verificación de la información recolectada antes de su análisis técnico.

3.3.2. Instrumentos

Los instrumentos utilizados para la recolección de datos fueron los siguientes:

- Fichas documentales, para el registro y sistematización de información técnica proveniente de informes, planos, memorias de cálculo y documentación interna.
- Registro fotográfico, planos y videos, utilizados para documentar las condiciones operativas del sistema de evacuación de aguas.
- Libreta de campo, empleada para registrar observaciones y datos recopilados durante las visitas de campo.

Respecto a la confiabilidad de la información:

- Los datos utilizados en la investigación provienen de registros técnicos y reportes operativos oficiales de la Compañía Minera Antapaccay.
- La información corresponde al sistema de evacuación de aguas del Tajo Sur, Fase 8, durante el período de evaluación de la investigación.
- Los datos fueron contrastados con observaciones de campo y revisados por el personal responsable del sistema de drenaje.
- La información empleada fue validada por el asesor de tesis y los profesionales responsables del sistema de drenaje de la unidad minera.

3.3.3. Procesamiento y Análisis de Datos

El procesamiento y análisis de los datos recolectados se realizó mediante herramientas informáticas y software especializado, que permitieron interpretar y evaluar técnicamente la información obtenida. Para ello se emplearon los siguientes programas:

- Microsoft Excel, para la organización, cálculo y análisis de datos numéricos.
- Microsoft Word, para la elaboración y presentación del informe de investigación.
- PowerPoint, para el apoyo gráfico y edición básica de esquemas e imágenes.

- AutoCAD y AutoCAD Civil 3D, para el trazado de planos, perfiles longitudinales y modelamiento geométrico de pozas y líneas de bombeo.
- Herramientas estadísticas descriptivas, empleadas para la comparación de caudales, tiempos de ejecución y costos operativos.

Los resultados del análisis se presentan mediante tablas, cuadros comparativos y gráficos, que permiten describir los métodos aplicados, comparar alternativas técnicas y evaluar los costos de las operaciones unitarias e índices de productividad del sistema de bombeo progresivo.

3.4. DESARROLLO DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO PROGRESIVO

3.4.1. Evaluación y Diagnóstico del Sistema de Bombeo Existente

Con la finalidad de sustentar técnicamente el diseño del sistema de bombeo progresivo del Tajo Sur, se realiza una evaluación integral del sistema de drenaje actualmente implementado en la operación. Este análisis permite establecer una línea base operativa, identificando las condiciones hidráulicas, hidrogeológicas y geotécnicas que influyen directamente en el desempeño del sistema existente.

La evaluación considera la configuración actual de la línea de bombeo, la capacidad instalada de los equipos, las características de las tuberías, la ubicación y capacidad de las pozas, así como las condiciones del macizo rocoso y el comportamiento del nivel freático en el fondo del tajo. Asimismo, se analizan los parámetros operativos relacionados con caudales, presiones y velocidades de flujo, los cuales constituyen variables determinantes para el dimensionamiento de un sistema de bombeo eficiente.

El diagnóstico técnico del sistema existente permite identificar las limitaciones hidráulicas y operativas que se presentan frente a las exigencias actuales de la Fase 8, particularmente en un escenario de mayor profundización del tajo y aumento de interacción con aguas subterráneas. Este análisis constituye la base fundamental para la formulación del diseño propuesto,

asegurando que el sistema de bombeo progresivo responda a condiciones reales de operación y no a supuestos teóricos.

3.4.1.1. Diagnóstico del Estado Actual del Sistema de Drenaje

El sistema de drenaje actualmente implementado en la Fase 8 del Tajo Sur opera mediante un esquema de bombeo progresivo por etapas, empleando pozas intermedias distribuidas a diferentes niveles conforme a la profundización del tajo. Este sistema permite evacuar el agua acumulada en el fondo de la excavación hacia niveles superiores, reduciendo la altura geométrica directa que debe vencer cada equipo de bombeo.

Las pozas intermedias cumplen la función de almacenamiento temporal y redistribución del flujo, facilitando el rebombeo escalonado a través de equipos instalados en cada nivel operativo. La configuración actual del sistema ha sido implementada de manera progresiva conforme avanzó la explotación minera, incorporando estaciones de bombeo adicionales en los niveles donde se incrementó la acumulación de agua.

La Tabla 4 presenta la distribución de pozas intermedias y los equipos de bombeo actualmente instalados en cada nivel operativo.

Tabla 4

Configuración actual del sistema de bombeo por niveles

Poza Intermedia	Nivel (m)	Equipos Instalados
Espejo de Agua	3470	1 GR 275 HP – 1 SILVER 300 HP
Poza Intermedia 6	3540	1 GR 275 HP – 1 SILVER 300 HP
Poza Intermedia 5	3645	4 GR 275 HP – 2 SILVER 300 HP
Poza Intermedia 4	3735	6 GR 275 HP
Poza Intermedia 3	3855	3 GR 275 HP – 2 SILVER 300 HP
Poza Intermedia 2	3945	2 GR 275 HP – 4 FLYGT MT 140 HP
Poza Intermedia 1	4005	6 GR 95 HP

Nota. Elaboración Propia

Como se muestra en la Tabla 4, el sistema actual presenta una distribución escalonada de estaciones de bombeo que permite fraccionar la altura total de impulsión en tramos intermedios. La potencia instalada varía en función del nivel operativo, evidenciando una adaptación progresiva del sistema frente al incremento de la profundidad del tajo. Posterior a ello se muestran los modelos usados.

La bomba GR 275 HP se utiliza en las Pozas Intermedias 3, 4 y 5 del sistema de rebombeo progresivo; corresponde a una bomba centrífuga de eje horizontal con potencia nominal de 275 HP (≈205 kW), empleada para el manejo de caudales elevados y para vencer cargas dinámicas significativas en los tramos intermedios del sistema existente (véase en la Figura 13).

Figura 13

Bomba centrífuga GR 275 HP instalada en las pozas intermedias.



Nota. grpumps.com

La bomba SILVER 300 HP está instalada en las Pozas Intermedias 5 y 6; es una bomba centrífuga de alta capacidad con potencia nominal de 300 HP (≈224 kW), utilizada en niveles donde la altura dinámica total es mayor dentro del esquema de rebombeo escalonado (véase en la Figura 14).

Figura 14

Bomba SILVER 300 HP utilizada en el sistema de rebombeo



Nota. tomocorp.com

La bomba FLYGT MT 140 HP opera en la Poza Intermedia 2; se trata de una bomba sumergible centrífuga de 140 HP (≈104 kW), destinada al manejo de caudales intermedios en tramos donde la exigencia hidráulica es moderada (véase en la Figura 15).

Figura 15

Bomba FLYGT MT 140 HP instalada en la Poza Intermedia 2



Nota. Elaboración Propia

La bomba GR 95 HP se encuentra instalada en la Poza Intermedia 1; corresponde a una bomba centrífuga de 95 HP (≈71 kW), empleada en niveles superiores del sistema donde la carga dinámica requerida es menor (véase en la Figura 16).

Figura 16

Bomba GR 95 HP utilizada en la Poza Intermedia 1

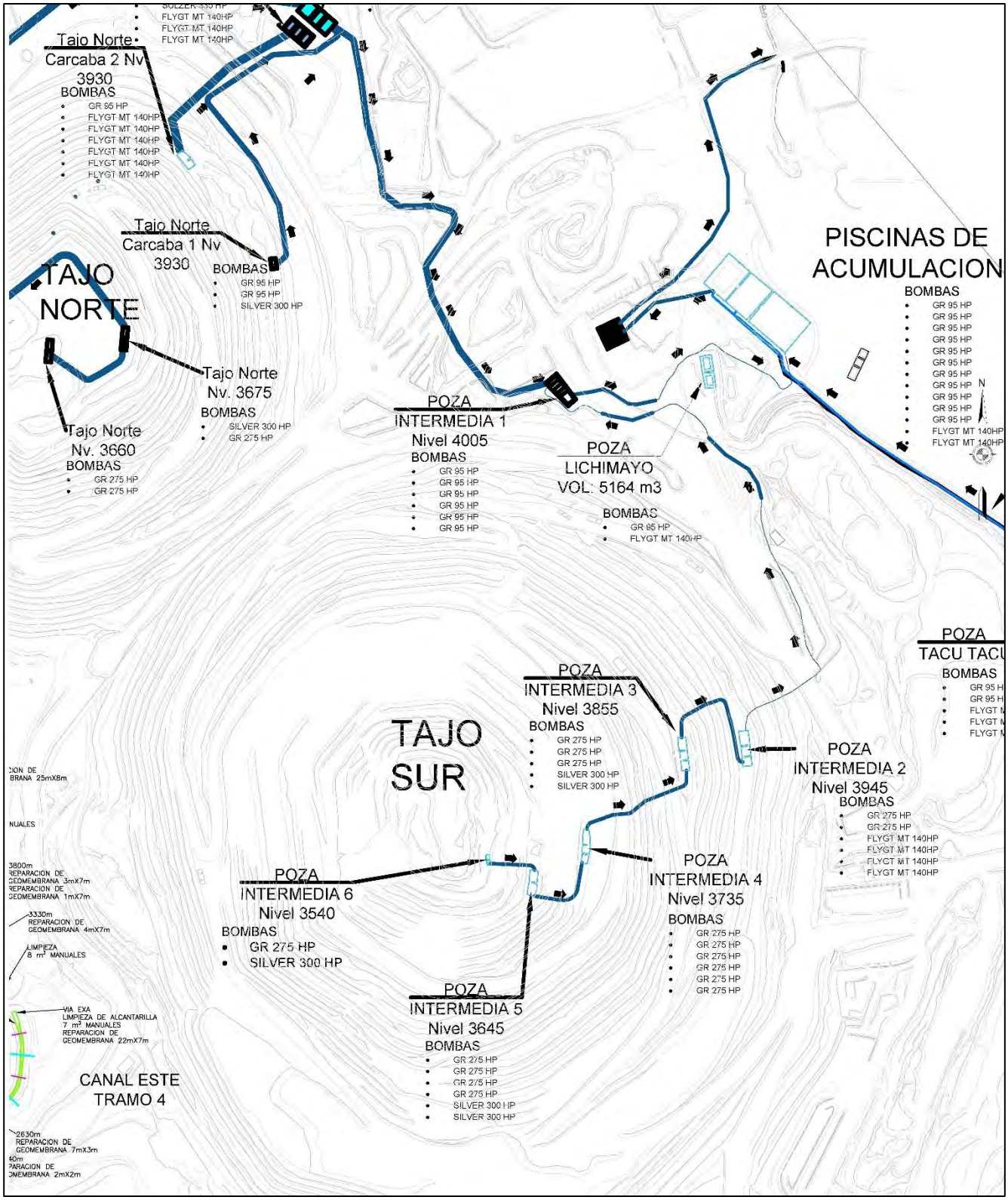


Nota. grpumps.com

La disposición espacial de las pozas intermedias y la trayectoria general de la línea de impulsión se detallan en el plano correspondiente (véase Figura 17), donde se observa el esquema de rebombeo implementado actualmente.

Figura 17

Tramo de succión del sistema de bombeo existente en el Tajo Sur



Nota. CM Antapaccay

Como se muestra en la Figura 17, el tramo correspondiente al sistema de bombeo existente presenta una longitud total de 2912,7 m.

3.4.1.2. Caracterización Hidráulica del Sistema Actual

La caracterización hidráulica del sistema de bombeo existente permite evaluar el comportamiento del flujo en la línea de impulsión actualmente instalada en la Fase 8 del Tajo Sur. Este análisis considera los caudales operativos registrados, la distribución de presiones por tramos y la velocidad del flujo en la tubería HDPE de 14” SDR 9, con una longitud total de 2912,7m.

3.4.1.2.1. Caudales operativos del sistema actual

El sistema de bombeo existente opera bajo condiciones variables dependiendo de la temporada (seca o lluviosa). Los registros operativos indican los siguientes valores representativos:

Tabla 5

Caudales registrados en el sistema existente

Parámetro	Valor
Caudal promedio operativo	0.107 m³/s
Caudal máximo registrado	0.250 m³/s
Temporada de mayor caudal	Época de lluvias
Régimen de operación	Continuo en temporada húmeda

Nota. Elaboración Propia

El caudal promedio de 0.107 m³/s representa la condición base de operación, mientras que el valor máximo de 0.250 m³/s corresponde a eventos de mayor acumulación de agua en el fondo del tajo.

3.4.1.2.2. Características de la línea de impulsión

La línea de conducción instalada corresponde a tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) con las siguientes características:

Tabla 6

Especificaciones técnicas de la tubería instalada

Parámetro	Valor
Material	HDPE
Diámetro nominal	14”
SDR	9
Espesor	39.7 mm
Longitud total	2 912.7 m

Nota. Elaboración Propia

El diámetro interno aproximado de la tubería es de 0.2762 m, lo que permite calcular el área hidráulica efectiva.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = 0.0599\, m^2$$

3.4.1.2.3. Velocidad del flujo en la tubería

La velocidad del flujo se calcula mediante la ecuación:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Para caudal promedio (0.107 m³/s):

$$V = \frac{0.107}{0.060} = 1.78\, m/s$$

Para caudal máximo (0.250 m³/s):

$$V = \frac{0.250}{0.060} = 4.16\, m/s$$

Tabla 7

Velocidades estimadas del flujo

Condición	Caudal (m³/s)	Velocidad (m/s)
Promedio	0.107	1.78
Máximo	0.25	4.16

Nota. Elaboración Propia

La velocidad máxima calculada para el sistema existente fue de 4.16 m/s, valor elevado para una conducción HDPE en operación normal. Esta condición incrementa las pérdidas de carga y evidencia limitaciones hidráulicas del sistema actual, justificando técnicamente la necesidad de implementar el sistema de bombeo progresivo propuesto.

3.4.1.2.4. Distribución hidráulica por tramos

Debido a la configuración escalonada del sistema, la carga hidráulica total se distribuye en cinco tramos principales entre las seis pozas intermedias.

Tabla 8

Análisis cualitativo por tramo

Tramo	**Bombas instaladas**	**Nivel de exigencia hidráulica**
Espejo de Agua – Poza 1	3 GR 275 HP – 3 SILVER 300 HP	Media
Poza 1 - Poza 2	6 GR 95 HP	Baja
Poza 2 - Poza 3	2 GR 275 HP + 4 FLYGT 140 HP	Media
Poza 3 - Poza 4	3 GR 275 HP + 2 SILVER 300 HP	Alta
Poza 4 - Poza 5	6 GR 275 HP	Media–Alta
Poza 5 - Poza 6	4 GR 275 HP + 2 SILVER 300 HP	Media

Nota. Elaboración Propia

Los tramos intermedios presentan mayor exigencia debido a la acumulación de carga dinámica y mayor potencia instalada.

3.4.1.2.5. Presión estimada en la línea

Considerando alturas parciales por tramo y pérdidas asociadas a fricción, se estima el siguiente rango de presión interna:

Tabla 9

Rango estimado de presiones

Tramo	Presión estimada (bar)
Inferior	3 – 6
Intermedio bajo	6 – 9
Intermedio alto	10 – 15
Superior	5 – 8

Nota. Elaboración Propia

La tubería HDPE SDR 9 es coherente con estas condiciones de presión, esta es empleada en todo el tramo de bombeo.

3.4.1.3. Análisis de las Condiciones Hidrogeológicas

Las condiciones hidrogeológicas de la Fase 8 del Tajo Sur están relacionadas con la recarga por precipitaciones y la modificación de los gradientes hidráulicos asociada a la excavación, el drenaje y el bombeo.

Los registros reportan profundidades del nivel freático entre 6 y 12 m, así como valores de 5 a 10 m en campañas anteriores en el sector del fondo del tajo. Durante la época húmeda se reportan ascensos de 2 a 3 m y, en estiaje, profundidades de 12 a 18 m. Estos rangos requieren identificar los puntos y referencias de medición para establecer su relación con el fondo operativo y comparar las variaciones estacionales.

También se reporta una respuesta del nivel freático hasta aproximadamente 15 días después de precipitaciones significativas, lo que sugiere una recarga diferida, sin descartar la influencia del bombeo.

La dirección predominante del flujo subterráneo reportada es suroeste–noreste. Localmente, el drenaje y bombeo pueden reducir los niveles y orientar el flujo hacia los sectores drenados. Se identifican, además, filtraciones activas que requieren captación y evacuación.

Tabla 10

Resumen de condiciones hidrogeológicas – Fase 8

Parámetro	Valor reportado	Implicancia técnica
Profundidad del nivel freático	6–12 m	Su posición respecto del tajo depende de la referencia de medición.
Profundidad en campañas anteriores	5–10 m	Requiere precisar su relación con el fondo operativo.
Ascenso estacional	2–3 m	Posible aumento del aporte subterráneo.
Profundidad en estiaje	12–18 m	Mayor profundidad reportada durante la temporada seca.
Respuesta posterior a precipitaciones	Hasta 15 días	Posible respuesta diferida a la recarga.
Dirección predominante del flujo	SO–NE	Puede modificarse localmente por el drenaje y bombeo.
Filtraciones	Activas en sectores específicos	Necesidad de captación y evacuación.

Nota. Fuente: Área de Geología de la Unidad Minera Antapaccay.

Estas condiciones influyen en la demanda del sistema de bombeo, junto con los aportes de precipitación y escorrentía superficial.

3.4.1.4. Caracterización Geotécnica del Terreno – Tajo Sur Fase 8

La estabilidad geotécnica está condicionada por la profundización progresiva de la excavación, la redistribución de esfuerzos en el macizo rocoso y la interacción con el agua subterránea. A medida que se incrementa la profundidad del tajo, los esfuerzos inducidos por la excavación generan ajustes estructurales en el macizo, favoreciendo la activación de discontinuidades y el desarrollo de deformaciones en sectores específicos.

Para el control y seguimiento de la estabilidad, la operación minera divide el tajo en Zonas Geotécnicas Sector (ZGS). Cada ZGS corresponde a un sector específico del tajo donde se realiza monitoreo instrumental y evaluación estructural permanente. Estas zonas permiten identificar comportamientos diferenciados del macizo rocoso en función de deformaciones registradas, presencia de agua y condiciones estructurales.

Las deformaciones son medidas en centímetros por hora (cm/h), lo que permite evaluar la tendencia de movimiento del macizo rocoso y clasificar el comportamiento como estable, moderadamente activo o progresivo.

3.4.1.4.1. Comportamiento geotécnico por zonas en la Fase 8

El análisis de las ZGS correspondientes a la Fase 8 muestra un comportamiento heterogéneo, donde se identifican sectores estables y otros con mayor sensibilidad estructural.

En las zonas ZGS-04 MR A (niveles 3970–3795) y ZGS-06 (nivel 3945) se registran deformaciones del orden de 0.02 a 0.03 cm/h, clasificadas como inactivas. Estos valores indican un macizo estructuralmente competente, sin evidencia de inestabilidad significativa ni influencia crítica de agua.

En la zona ZGS-01 (nivel 3915) se registran deformaciones de aproximadamente 0.12 cm/h con presencia de agrietamientos leves en cresta. Este comportamiento evidencia fracturamiento activo de baja magnitud, el cual puede favorecer infiltraciones superficiales y afectar gradualmente la estabilidad local.

En la zona ZGS-11 (nivel 3870) se registran deformaciones del orden de 0.78 cm/h, acompañadas de desprendimientos leves. Este valor refleja un sector con mayor actividad estructural, posiblemente asociado a planos de debilidad o zonas de alteración.

La condición más relevante se presenta en la zona ZGS-12 (nivel 4050 – sector Sol Naciente), donde se registran deformaciones de aproximadamente 1.39 cm/h y presencia de material saturado. La saturación del macizo implica incremento de presión intersticial y reducción del esfuerzo efectivo, lo que disminuye la resistencia al corte del terreno y aumenta la susceptibilidad a movimientos diferenciales o desprendimientos localizados.

Tabla 11

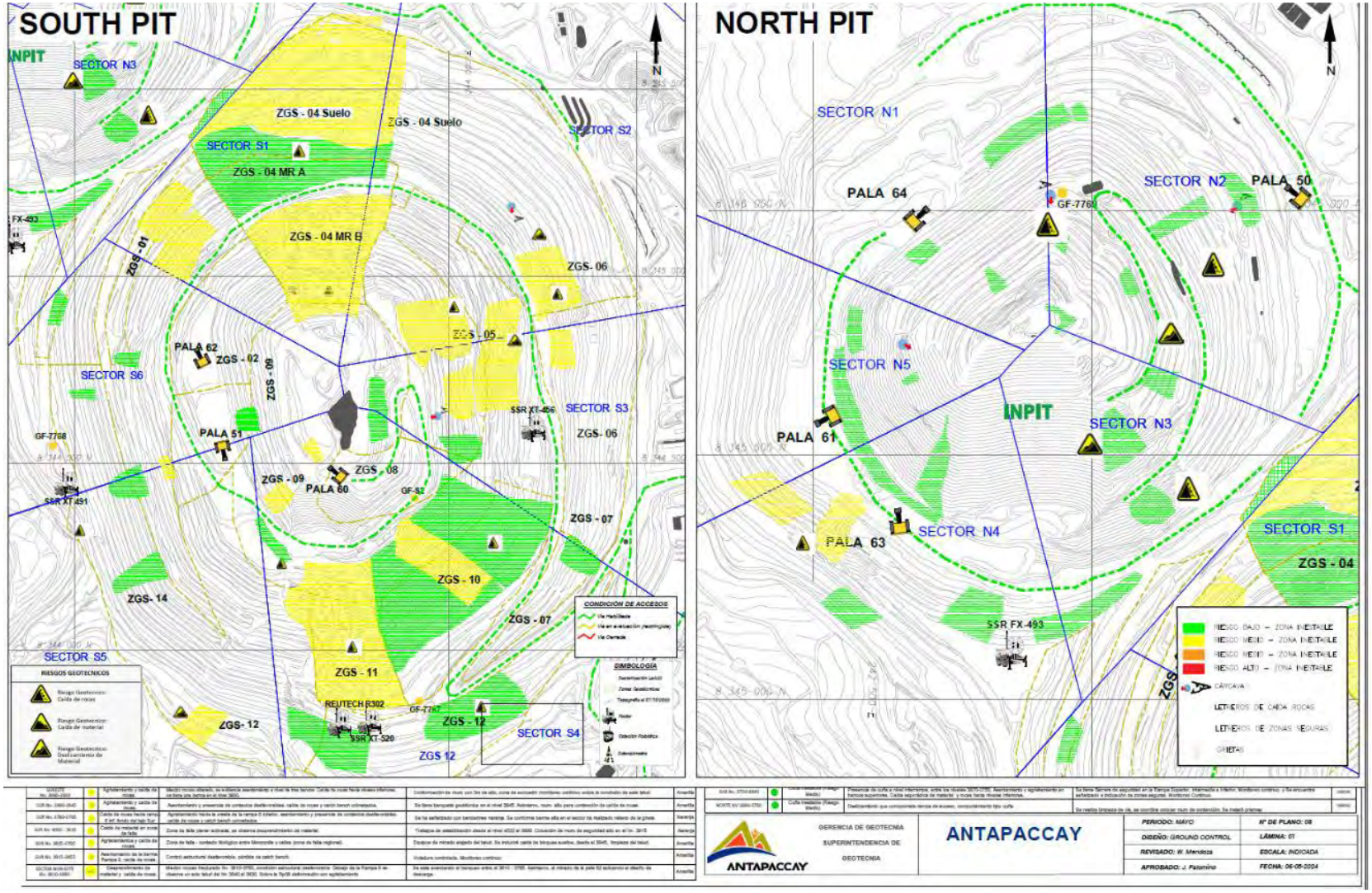
Comportamiento geotécnico – Fase 8 Tajo Sur (Reporte Diario)

Zona Geotécnica (ZGS)	Nivel aproximado	Deformación (cm/h)	Condición predominante	Evaluación de estabilidad
ZGS-04 MR A	3970–3795	0.03	Sin presencia significativa de agua	Estable
ZGS-06	3945	0.02	Macizo competente	Estable
ZGS-01	3915	0.12	Agrietamientos leves	Moderadamente estable
ZGS-11	3870	0.78	Desprendimientos leves	Sensible
ZGS-12	4050	1.39	Material saturado	Geotécnicamente comprometida

Nota. Área de Geotecnia CM Antapaccay

Figura 18

Plano semanal de riesgos geotécnicos –Tajo Sur y Tajo Norte (SEM 20, 09–15 de mayo de 2024), Unidad Minera Antapaccay



Nota. Área de Geotecnia CM Antapaccay

Los resultados muestran que en determinados sectores profundos de la Fase 8 se presentan condiciones de mayor sensibilidad estructural asociadas a la presencia de agua, lo que puede favorecer movimientos diferenciales y desprendimientos localizados, especialmente en escenarios de incremento del nivel freático o precipitaciones intensas. Esta condición genera no solo afectación en la estabilidad del talud, sino también un aumento en el volumen de agua y sedimentos acumulados en el fondo del tajo. En consecuencia, la planificación y configuración del sistema de bombeo debe considerar la ubicación estratégica de pozas y el trazado de tramos de conducción en función de la estabilidad del terreno, evitando sectores con mayor susceptibilidad geotécnica y garantizando continuidad operativa.

Figura 19

Matriz GUT y estado de controles críticos en la gestión de riesgos geotécnicos



Id	GUT	Condicion Riesgo	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5
58	11	Medio	YES	YES	NO	NO	YES
74	11	Medio	YES	YES	YES	YES	YES
76	11	Medio	YES	YES	YES	NO	YES
59	10	Medio	YES	YES	YES	YES	YES
63	10	Medio	YES	YES	YES		
66	10	Bajo	YES	YES	YES	YES	YES
68	10	Medio	YES	YES	NO		
71	10	Medio	YES	YES	YES	YES	
77	10	Medio	YES	YES	YES	YES	NO
57	8	Bajo	YES	YES	YES	YES	
61	8	Medio	YES	YES	YES	YES	
70	8	Bajo	YES	YES	YES		

Suma de GUT	Condicion Riesgo	Riesgo Geotecnico Identificado	Plan de Remediacion	OData_01ControlCritico	OData_02ControlCritico	OData_03ControlCritico	OData_04ControlCritico	OData_05ControlCritico
11	Medio	ZGS 10 material Spill colgado en el talud, representan riesgo de caida de material hacia los niveles inferiores.	Monitoreo continuo de taludes que se encuentran acondicionados en proyectos del nivel 3930	Minado desde el nv 3900 ingreso por rampa auxiliar con fin de quitar carga	Minado desde nv 3885 eliminando aflojamiento y quitando carga	Cerrar ingreso a nv 3663 plataforma de pocas impactadas	Inspecciones continuas a trabajos de minado, piso de excavadora y caminos, agua ingreso	No sobreminar hacia la rampa 10
11	Medio	ZGS 4 M-R-B Deslizamiento desde el N v. 3775 hasta el Nv. 3510 - Mecanizó de falla de vóteo	Se realiza acceso auxiliar hacia fondo de minado, solo pase por parte de operadores minas y geotecnia	Un plan de trabajo para proceder a emerger las condiciones de estabilidad de la ZGS 04 en M-R, y garantizar la estabilidad de material de|adti can los niveles inferiores del talud Sur Fase 6, Acceso provisional para Ingresar al fondo de mina, controlar por parte de geotecnia y oprimir.	Desarrollar un plan de trabajo para reconformacion de banco en la rampa auxiliar Nv. 3775, en la preparación de zona geotecnica 04 MR B.	Mantoreo continuo con radares XT-520 y MSR Reutech y radar terrestre, y realizar trabajos la tendencia de movimiento, diserio intentcionado en fondo de mina y la tendenciia sigue mantener en reserva y no hay un massie de roca	Reomar las actividades de bombeo del fondo del tajo, realizar trabajos de captacion de agua para evaluar que se infiitro en la ZGS 04 MR B.	Minado del material colmatado en la rampa auxiliar con un pala en el fondo de la rampa de producción superiores, para así pase a los niveles inferiores fase 08 B y A Se tiene muro de exclusión hacia la cresta de 10m
10	Medio	ZGS-01 Sector de asentamiento Estructura de fallamiento tipo Toppling	Monitoreo crítico con el radar IBS S20 y Radar MSR MMH (REUTECH).	Proceder a realizar trabajos de estabilización, reconformando los bancos de la ZGS 01	Monitoreo de la instrumentación instalada en el sector detallamente verificando el comportamiento en tiempo.	Desarrollar los trabajos de estabilización con equipos auxiliares, delimitandose la zona de banqueta.	Eliminación de las rocas abiertas en la cresta (convención de poliorera) en el Nv. 3900 y Nv. 3885.	Construcción de berma en rampa auxiliar
10	Medio	Sector Norte 04 Tajo Norte Nv. 3845 Asentamiento de bancos y caida de rocas	Reconformación de banco en los niveles afectados, conformando rampa DD-2 (zeta).	Realizar las trabajos de reconformación de banco desde nv 4035, se realiza perforación secundaria de servicios auxiliares, unado del personal en 8 Nv. 4020.	Conformación de un muro de seguridad, zona de exclusión contención de caida de rocas.	Realizar monitoreo crítico con instrumentación geotecnica (Radares - Prismas).	Desarrollar canaletas de captación de agua, de las filtraciones que se tiene en el Nv. 4020	perforación secundaria para continuar con reconformación de bancos
10	Bajo	ZGS 04 MR A mecanismo de falla tipo volteo con deformaciones desde el Nv. 3870	Iniciar con los trabajos de reconformación del talud, ayudando a la estabilidad de los niveles inferiores, empleando equipos auxiliares.	Trabajos de perforación en 3796 hasta en 3801 las condiciones de inestabilidad en la ZGS 04 MR A, confirmando la caida de rocas y se tenga un material, donde se tiene por planes de minado, deja don al solo para cavitad el limite actual, con plataforma amplia, e incentivar con planes de término.	Mantener un monitoreo crítico empleando los radares XT-520 y MSR Reutech y radar terrestre, verificandose la tendencia de estabilidad.	Luminaria para el Trabajo en el turno noche	Minado con pala 70 desde rampa auxiliar con encintoreo crítico e inspección en campo	Solo trabajar en condiciones de riesgo geotecnico amarilla.
10	Medio	ZGS 05 Material desprendido hacia los niveles Nv. 3735.	Raconcfirmación de bancos desde rampa auxiliar y eliminación de bloques de roca, cuando lleguemos a una tendencia estable.	Reforzar colgajos en el talud desde la rampa auxiliar. Hasta el Nv. 3735, donde se tiene que realizar una plataforma amplia con un banco.	Mantener cerrado el ingreso por rampa auxiliar hacia nv 3735.	Monitoreo crítico con el Radar XT-481 y laserlimetro con el XT-520.	Instalación de prismas en bancos nv3855 y nv 3840	

Nota. Área de Geotecnia CM Antapaccay

3.4.1.5. Identificación de Limitaciones Técnicas y Operativas del Sistema Existente

Del análisis hidráulico, hidrogeológico y geotécnico desarrollado en los apartados anteriores, se identifican limitaciones concretas del sistema de bombeo del Tajo Sur, las cuales afectan su eficiencia, continuidad operativa y capacidad de respuesta ante escenarios de mayor exigencia.

Las principales limitaciones son:

- Operación con caudal máximo de 0.250 m^3/s, generando velocidades aproximadas de 4.16 m/s en tubería de 14”, cercanas al límite superior recomendado.
- Longitud total de conducción de 2 912.7 m, lo que incrementa pérdidas acumuladas por fricción y consumo energético.
- Configuración escalonada con seis pozas intermedias, generando dependencia secuencial entre estaciones y riesgo de interrupción ante falla de una etapa.
- Presencia de sectores geotécnicamente sensibles en niveles profundos, con deformación progresiva y material saturado.
- Ubicación de infraestructura en zonas activas de explotación, generando interferencia con el avance de la Fase 8.
- Incremento estacional del nivel freático, lo que reduce el margen de respuesta ante eventos de alta acumulación de agua.

3.4.2. Diseño de la Ruta Óptima de la Línea de Bombeo y Ubicación de Pozas

Para el desarrollo del diseño hidráulico de la línea de bombeo, el primer paso consiste en establecer el caudal de diseño que gobernará todos los cálculos posteriores del sistema. Este valor será utilizado para determinar velocidades de flujo, pérdidas de carga, altura dinámica total y presión de trabajo en cada tramo del bombeo progresivo. En consecuencia, se procede a definir el caudal de diseño adoptado para la Fase 8 del Tajo Sur.

3.4.2.1. Determinación del caudal de diseño del sistema de drenaje

La determinación del caudal de diseño constituye el parámetro base para el dimensionamiento hidráulico del sistema de bombeo progresivo propuesto en la Fase 8 del Tajo Sur. Este valor gobierna el cálculo de velocidades de flujo, pérdidas de carga, altura dinámica total y selección de equipos de bombeo.

Del análisis de los registros operativos del sistema existente se identificaron dos condiciones representativas de operación:

- Caudal promedio operativo: 0.107 m³/s
- Caudal máximo registrado en temporada lluviosa: 0.250 m³/s

El caudal máximo está asociado a la combinación de:

- Incremento del nivel freático por profundización del tajo.
- Recarga estacional producto de precipitaciones intensas.
- Concentración de escorrentía superficial hacia el fondo operativo.

En sistemas de drenaje minero a cielo abierto, el criterio de diseño establece que el sistema debe dimensionarse para la condición más exigente hidráulicamente, a fin de evitar acumulaciones críticas que comprometan la continuidad del minado.

En consecuencia, se adopta como caudal de diseño:

$$Q_d = 0.250\ m3/s$$

Este valor garantiza que el sistema proyectado tenga capacidad suficiente para operar bajo condiciones críticas sin generar sobrecargas hidráulicas en las pozas intermedias.

3.4.2.1.1. Condición de operación del sistema

El sistema de drenaje en la Fase 8 opera bajo régimen continuo, con funcionamiento permanente durante las 24 horas del día, especialmente en temporada húmeda.

Dado que el bombeo se realiza en régimen continuo:

$$Q_b = Q_d$$

La operación continua elimina la necesidad de aplicar factores de ajuste por intermitencia, manteniendo el diseño bajo condición hidráulica permanente.

3.4.2.1.2. Análisis del régimen de operación del sistema

El régimen de operación influye directamente en la capacidad efectiva de evacuación del sistema de drenaje. En sistemas intermitentes, el caudal de bombeo debe incrementarse para compensar la reducción de horas efectivas de operación, lo que impacta en el dimensionamiento hidráulico y en la potencia instalada.

En la Fase 8 del Tajo Sur, el sistema de bombeo opera bajo régimen continuo (24 h/día), especialmente durante temporada húmeda, debido a la necesidad de mantener control permanente del nivel de agua en el fondo del tajo. Esta condición permite que el caudal de bombeo coincida con el caudal máximo de diseño adoptado, sin requerir factores de corrección por intermitencia.

Operar en régimen continuo reduce la variabilidad del nivel hidráulico en las pozas intermedias, mejora la estabilidad operativa del sistema progresivo y disminuye el riesgo de acumulaciones súbitas asociadas a eventos de precipitación intensa.

Tabla 12

Parámetros base para el dimensionamiento hidráulico

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal promedio operativo	0.107	m^3/s
Caudal máximo registrado	0.250	m^3/s
Caudal de diseño adoptado (Qd)	**0.250**	m^3/s
Régimen de operación	Continuo	24 h/día

Nota. Elaboración Propia

3.4.2.1.3. Análisis de sensibilidad del caudal de diseño

Si bien el caudal de diseño adoptado corresponde al máximo caudal registrado durante el periodo de evaluación (0.250 m^3/s), en sistemas de drenaje minero a cielo abierto es recomendable evaluar escenarios de incremento del caudal asociados a una mayor profundización del tajo, eventos extraordinarios de precipitación o variaciones en el aporte del

nivel freático. Por tal motivo, se realizó un análisis de sensibilidad considerando incrementos del 20% y 30% respecto al caudal máximo registrado, con la finalidad de verificar la capacidad operativa del sistema propuesto frente a condiciones futuras de mayor exigencia hidráulica.

El caudal proyectado para cada escenario se determinó mediante la siguiente expresión:

$$Q_{proyectado} = Q_{máx} \times FS$$

donde:

- Qproyectado = caudal proyectado para el escenario analizado.
- Qmáx = caudal máximo registrado durante la operación (0.250 m³/s).
- FS = factor de incremento considerado.

Tabla 13

Análisis de sensibilidad del caudal de diseño

Escenario	Factor aplicado	Caudal proyectado (m³/s)	Incremento respecto al caudal máximo (%)
Caudal máximo registrado	1.00	0.250	0
Escenario conservador	1.20	0.300	20
Escenario crítico	1.30	0.325	30

Nota. Elaboración propia.

Los resultados muestran que un incremento del 20% sobre el caudal máximo registrado genera un caudal proyectado de 0.300 m³/s, mientras que un incremento del 30% produce un caudal de 0.325 m³/s. Estos escenarios representan condiciones potenciales asociadas a una mayor profundización del tajo, incremento del aporte del nivel freático o eventos extraordinarios de precipitación.

Considerando que la configuración de bombeo propuesta permite alcanzar caudales de operación superiores a 0.325 m³/s en los diferentes tramos del sistema, se verifica que el diseño presenta capacidad suficiente para responder ante incrementos moderados del caudal afluente.

Por ello, se mantiene como caudal base de diseño el valor de 0.250 m³/s, correspondiente al máximo caudal registrado durante el periodo de evaluación, utilizándose el análisis de sensibilidad como una herramienta de verificación de la robustez hidráulica del sistema propuesto.

3.4.2.2. Trazado hidráulico de la línea de impulsión

El trazado hidráulico de la línea de impulsión establece el recorrido que seguirá el sistema de bombeo progresivo desde el punto de captación en el fondo del Tajo Sur hasta la megapoza de descarga. La definición de esta ruta es determinante, ya que condiciona la longitud total del sistema, las pérdidas de carga por fricción y la configuración de los tramos de rebombeo.

El diseño del trazado se desarrolló considerando criterios hidráulicos, geotécnicos y operativos, con el objetivo de garantizar estabilidad, seguridad y continuidad operacional en la Fase 8.

3.4.2.2.1. Criterios técnicos adoptados para el trazado

Para la definición de la ruta se consideraron los siguientes criterios:

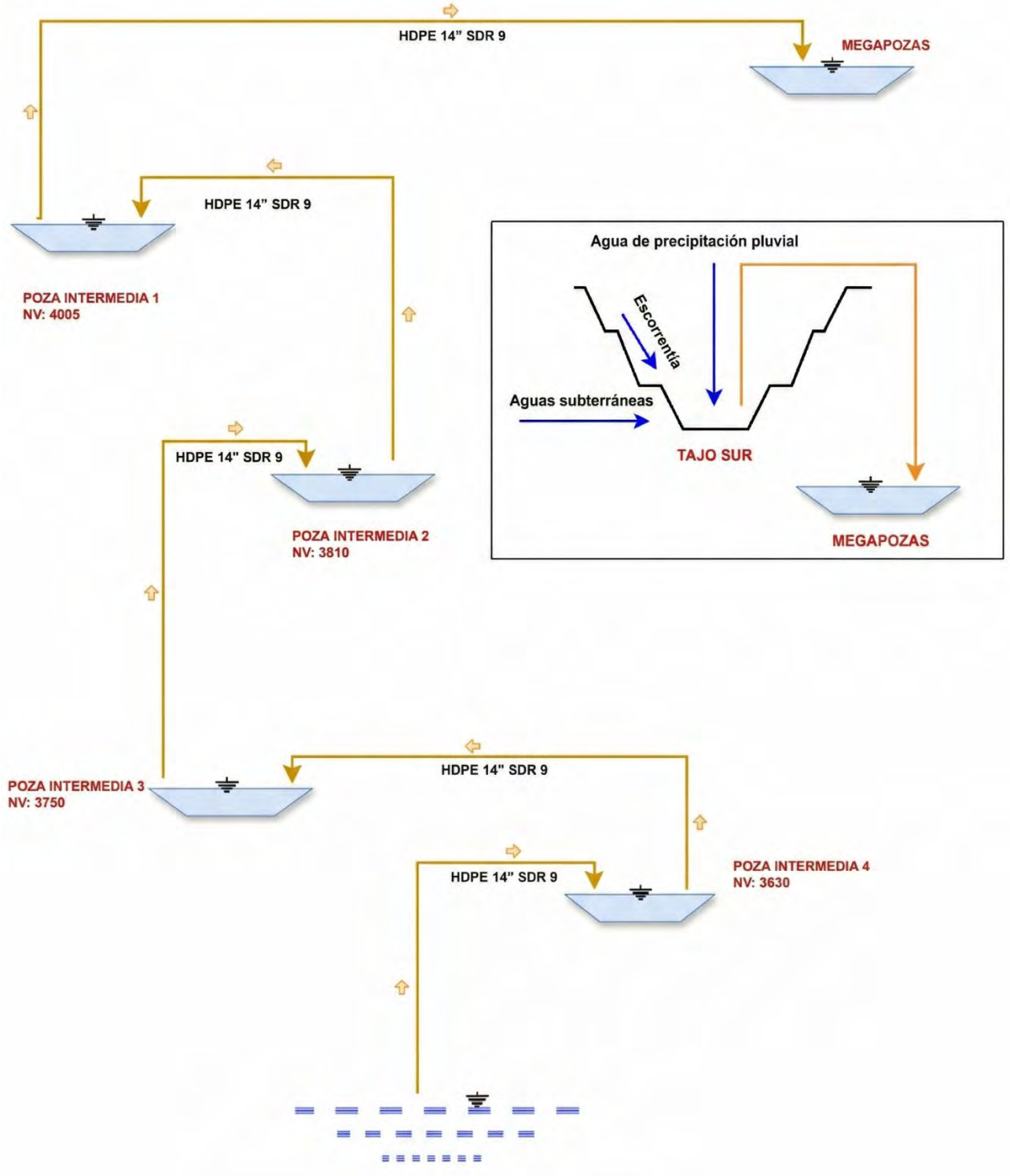
- Evitación de sectores con inestabilidad geotécnica activa.
- No interferencia con rampas principales de acarreo y zonas de operación.
- Accesibilidad para mantenimiento y supervisión de la línea.
- Compatibilidad con infraestructura existente.
- Distribución adecuada de los puntos de rebombeo.

Estos criterios permitieron establecer una configuración más estable y operativamente confiable para el sistema progresivo.

En la figura 20, se presenta la propuesta de configuración de Línea de Bombeo.

Figura 20

Diagrama de la línea de bombeo propuesto para la Fase 8 del Tajo Sur



Nota. Elaboración Propia

3.4.2.2.2. Longitud del sistema propuesto

En el sistema existente, la longitud total de la línea de impulsión era:

$$L_{existente} = 2912.7m$$

El nuevo trazado propuesto presenta una longitud total de:

$$L_{propuesta} = 3478.9m$$

Si bien la longitud total es mayor respecto al sistema anterior, la nueva configuración mejora la distribución hidráulica por tramos, reduce interferencias operativas y evita zonas geotécnicamente sensibles, lo que incrementa la confiabilidad del sistema de drenaje progresivo.

El incremento de longitud será considerado posteriormente en el cálculo de pérdidas de carga por fricción, garantizando que el dimensionamiento hidráulico se desarrolle bajo condiciones reales del trazado adoptado.

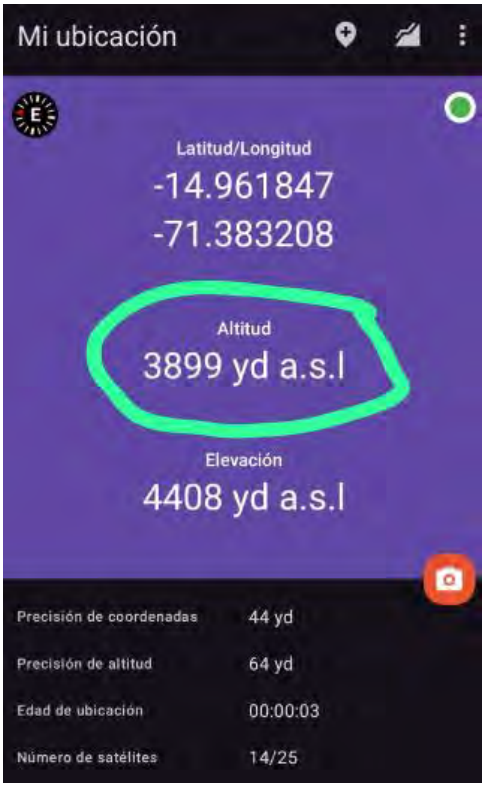
3.4.2.2.3. Configuración del sistema por tramos

El trazado hidráulico se estructuró en cinco tramos de bombeo progresivo, definidos por la ubicación estratégica de pozas intermedias:

- Tramo 1: Espejo de Agua - Poza Intermedia 4
- Tramo 2: Poza Intermedia 4 - Poza Intermedia 3
- Tramo 3: Poza Intermedia 3 - Poza Intermedia 2
- Tramo 4: Poza Intermedia 2 - Poza Intermedia 1
- Tramo 5: Poza Intermedia 1 - Megapoza de descarga

Figura 21

Altura del espejo de agua medida mediante sistema de posicionamiento GPS



Nota. Elaboración Propia

La cota del espejo de agua fue obtenida mediante medición GPS en campo. Durante el levantamiento, el equipo registró la elevación en yardas (yd) debido a la configuración de unidades del dispositivo, por lo que fue necesaria su conversión a metros para mantener consistencia con el sistema de referencia utilizado en la operación minera.

La conversión se realizó utilizando el factor:

$$1\ yd\ =\ 0.9144\ m$$

Convertimos a metros según el reporte (Figura 21) que tenemos:

$$3899\ yd \times 0.9144 = 3565\ m\ s.n.m.$$

Cada tramo será evaluado hidráulicamente de manera independiente para determinar altura geométrica, pérdidas de carga y altura dinámica total, en la Tabla 14, se presenta la longitud propuesta inicialmente.

Tabla 14

Configuración preliminar del trazado de impulsión

Parámetro	Sistema existente	Sistema propuesto
Longitud total (m)	2 912.7	3478.9
Número de tramos	6	5
Tipo de sistema	Rebombeo escalonado	Rebombeo escalonado
Punto final de descarga	Megapoza	Megapoza

Nota. Elaboración Propia

3.4.2.3. Determinación de alturas geométricas por tramo

La altura geométrica constituye el primer componente de la carga total que debe vencer el sistema de bombeo progresivo. Esta corresponde a la diferencia de elevación entre el nivel de succión en la poza inferior y el nivel de descarga en la poza superior de cada tramo.

En sistemas de bombeo escalonado en minería a tajo abierto, la determinación precisa de las cotas es fundamental, ya que la altura geométrica influye directamente en la altura dinámica total y en la potencia requerida por las bombas instaladas en cada estación.

La altura geométrica por tramo se determina mediante:

$$H_g = Z_{descarga} - Z_{succión}$$

donde:

$Zsucción$ = cota del espejo de agua en la poza inferior (msnm)

$Zdescarga$ = cota del punto de descarga en la poza superior (msnm)

3.4.2.3.1. Determinación de alturas por tramo

De acuerdo con el trazado hidráulico propuesto, el sistema se estructura en cinco tramos de bombeo progresivo.

Las cotas adoptadas para el cálculo son las siguientes:

Tramo 1: Fondo del tajo - Poza Intermedia 4

$$Z_{succión} = 3566\ msnm$$

$$Z_{descarga} = 3630\ msnm$$

$$H_{g1} = 3630 - 3566 = 64 \text{ m}$$

Tramo 2: Poza Intermedia 4 - Poza Intermedia 3

$$Z_{succión} = 3630\ msnm$$

$$Z_{descarga} = 3750\ msnm$$

$$H_{g2} = 3750 - 3630 = 120 \text{ m}$$

Tramo 3: Poza Intermedia 3 - Poza Intermedia 2

$$Z_{succión} = 3750\ msnm$$

$$Z_{descarga} = 3890\ msnm$$

$$H_{g3} = 3890 - 3750 = 140 \text{ m}$$

Tramo 4: Poza Intermedia 2 – Poza Intermedia 1

$$Z_{succión} = 3890\ msnm$$

$$Z_{descarga} = 4005\ msnm$$

$$H_{g4} = 4005 - 3890 = 115 \text{ m}$$

Tramo 5: Poza Intermedia 1 – Megapozas

$$Z_{succión} = 4005\ msnm$$

$$Z_{descarga} = 4005\ msnm$$

$$H_{g5} = 4005 - 4005 = 0 \text{ m}$$

Cabe precisar que, como se observa en la Tabla 15, el Tramo 5 presenta una altura geométrica igual a 0 m debido a que las cotas de succión y descarga son las mismas (4005 m s. n. m.). No obstante, ello no implica ausencia de requerimiento energético, ya que la bomba debe vencer las pérdidas de carga de la línea de impulsión para transportar el agua hasta la megapoza final. Por esta razón, la altura dinámica total de este tramo está determinada por las pérdidas hidráulicas del sistema.

Tabla 15

Alturas geométricas por tramo

Tramo	Cota succión (msnm)	Cota descarga (msnm)	Hg (m)
T1	3566	3630	64
T2	3630	3750	120
T3	3750	3890	140
T4	3890	4005	115
T5	4005	4005	0
Total acumulado	—	—	**439 m**

Nota. Elaboración Propia

3.4.2.4. Cálculo de pérdidas de carga en la línea de impulsión

Las pérdidas de carga representan la energía disipada por fricción durante el transporte del caudal de diseño a través de la tubería, y constituyen un componente directo de la altura dinámica total que debe vencer el sistema de bombeo en cada tramo. Para el presente diseño se consideran pérdidas por fricción (pérdidas mayores) y pérdidas localizadas (pérdidas menores) asociadas a accesorios y válvulas.

3.4.2.4.1. Pérdidas por fricción (pérdidas mayores)

Para el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías a presión de conducción de agua se empleó la ecuación de Hazen–Williams, por su uso extendido en líneas de impulsión y su aplicabilidad práctica para tuberías de HDPE.

$$h_f = 10.67 * \frac{L * Q^{1.852}}{C^{1.852} * D^{4.871}}$$

Donde:

- hf: pérdida por fricción (m)
- L: longitud del tramo (m)
- Q: caudal (m³/s)
- D: diámetro interno (m)
- C: coeficiente Hazen–Williams

Datos adoptados para el cálculo:

- Caudal de diseño: Qd=0.250m3/s
- Tubería: HDPE SDR 9
- Diámetro nominal: 14”
- Diámetro exterior: 355.6 mm
- Espesor: e = 39.5 mm
- Diámetro interno: $Di = 355.6 - 2(39.5) = 276.6\ \text{mm}$
- Coeficiente Hazen–Williams para tubería HDPE: C = 150

Tabla 16

Pérdidas por fricción por tramo (Hazen–Williams)

Tramo	Longitud L (m)	Q (m³/s)	D interno (m)	C	h*f* (m)
T1	297.00	0.250	0.2766	150	11.87
T2	1261.93	0.250	0.2766	150	50.44
T3	325.35	0.250	0.2766	150	13.01
T4	1200.29	0.250	0.2766	150	47.98
T5	394.33	0.250	0.2766	150	15.76
Total	**3478.90**	—	—	—	**139.06**

Nota. Elaboración Propia

3.4.2.5. Cálculo de la altura dinámica total por tramo

La altura dinámica total (HDT) representa la carga total que debe vencer el sistema de bombeo en cada tramo y se emplea como parámetro base para la selección de bombas y potencia instalada. Para el presente diseño, la HDT por tramo se determinó considerando la altura geométrica (Hg) y las pérdidas por fricción (hf) obtenidas mediante Hazen–Williams. En esta etapa no se incorporan pérdidas localizadas, debido a que el dimensionamiento se concentra en el componente predominante asociado a la conducción principal.

La fórmula empleada es:

$$HDT = Hg + hf$$

Donde:

HDT: altura dinámica total del tramo (m)

Hg: altura geométrica del tramo (m)

hf: pérdida de carga por fricción del tramo (m)

Tabla 17

Altura dinámica total por tramo

Tramo	Hg (m)	hf (m)	HDT (m)
T1	64	11.87	**75.87**
T2	120	50.44	**170.44**
T3	140	13.01	**153.01**
T4	115	47.98	**162.98**
T5	0	15.76	**15.76**

Nota. Elaboración propia

3.4.2.5.1. Tramo crítico

De los resultados obtenidos, el tramo con mayor exigencia hidráulica corresponde al:

$$HDT_{máx} = 170.44\ m\ (Tramo\ 2)$$

Por lo tanto, el Tramo 2 se considera el tramo crítico para el diseño del sistema de bombeo y será determinante en la selección de equipos.

3.4.2.5.2. Verificación de pérdidas localizadas en el tramo crítico

Para la verificación de las pérdidas localizadas en el Tramo 2 se consideran los accesorios principales instalados en la línea de impulsión de 14 pulgadas: un codo de 90°, una válvula antirretorno y un acople de conexión.

Para cada accesorio se adopta el coeficiente de pérdida correspondiente:

$$Kcodo = 0.30$$

$$Kválvula = 2.00$$

$$Kacople = 0.06$$

El coeficiente total de pérdidas localizadas se obtiene mediante la suma de los coeficientes individuales:

$$\sum K = Kcodo + Kvalvula + Kacople$$

$$\sum K = 0.30 + 2.00 + 0.06$$

$$\sum K = 2.36$$

La pérdida localizada total se determina mediante:

$$h_m = \sum K * \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

hm = pérdida localizada total, m.

ΣK = coeficiente total de pérdidas localizadas.

V = velocidad del flujo, 4.16 m/s.

g = aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

Para la verificación se utiliza la velocidad de 4.16 m/s considerada previamente en el análisis hidráulico del sistema.

Reemplazando los valores:

$$h_m = 2.36 * \left(\frac{(4.16)^2}{2(9.81)}\right)$$

$$h_m = 2.08\, m$$

Por tanto, la pérdida localizada producida por los accesorios considerados es de 2.08 m.

Para evaluar su incidencia respecto a la altura geométrica del Tramo 2, correspondiente a 120 m, se determina:

$$\%h_m = \frac{h_m}{H_g} * 100$$

$$\%h_m = \frac{2.08}{120} * 100$$

$$\%h_m = 1.73\%$$

La pérdida localizada representa el 1.73 % de la altura geométrica del tramo crítico. Este valor confirma que la incidencia de los accesorios es reducida respecto a la carga principal del sistema; por ello, no genera una variación significativa en el dimensionamiento hidráulico adoptado. No obstante, se incorpora dentro de la verificación para considerar el efecto real de los accesorios instalados en la línea de impulsión.

3.4.2.6. Selección del diámetro y SDR de la tubería HDPE

La selección del diámetro y del SDR de la tubería se realiza en función de los requerimientos hidráulicos del sistema (caudal de diseño y pérdidas), así como de la presión de trabajo asociada a la altura dinámica total (HDT) por tramo. En esta etapa se valida que la tubería seleccionada soporte la presión máxima estimada en el tramo crítico y que el diámetro adoptado sea compatible con el caudal de operación.

3.4.2.6.1. Diámetro empleado

Para el sistema de impulsión se adopta tubería HDPE DN 14", considerando compatibilidad con la línea propuesta y accesorios principales (válvulas mariposa 14"). Para tubería HDPE SDR 9 se emplean los siguientes parámetros geométricos:

Diámetro exterior: De=355.6 mm

Espesor: e=39.5 mm

Diámetro interno calculado:

$$D_i = De - 2e = 355.6 - 2(39.5) = 276.6\,mm = 0.2766\,m$$

Con el diámetro interno adoptado, la velocidad de flujo queda definida por:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi\left(\frac{{D_i}^2}{4}\right)}$$

3.4.2.6.2. Verificación de presión de trabajo y selección de SDR

La presión interna máxima por tramo se estima a partir de la HDT:

$$P = \rho * g * HDT$$

Para facilitar cálculos:

$$P(bar) \approx \frac{HDT(m)}{10.2}$$

Tabla 18

Presión estimada por tramo (a partir de HDT)

Tramo	HDT (m)	Presión aprox. (bar)
T1	75.87	7.44
T2	170.44	16.72
T3	153.01	15
T4	162.98	15.98
T5	15.76	1.55

Nota. Elaboración Propia

El tramo crítico corresponde a T2, con $HDTmáx$=170.44 m, equivalente a una presión aproximada de 16.72 bar.

3.4.2.6.3. Selección de la clase de presión (PN) y SDR

Para tuberías HDPE, el SDR se define como:

$$\mathrm{SDR} = \frac{\mathrm{D_e}}{\mathrm{e}}$$

Con De=355.6 mm y e=39.5 mm:

$$SDR \approx \frac{355.6}{39.5} \approx 9$$

Dado que la presión máxima estimada en el tramo crítico es 16.72 bar, se selecciona tubería HDPE SDR 9, correspondiente a una clase de presión superior a la presión de trabajo calculada, proporcionando margen de seguridad para operación continua y condiciones de servicio.

3.4.2.7. Dimensionamiento hidráulico de pozas intermedias

El dimensionamiento hidráulico de las pozas intermedias se desarrolla con el objetivo de sustentar la capacidad de almacenamiento requerida del sistema de drenaje, garantizando operación segura ante contingencias operativas (interrupciones temporales del bombeo por

mantenimiento, fallas eléctricas o variaciones operacionales). Para esta evaluación se adopta el criterio de tiempo de retención mínimo de 1 hora, establecido en el estándar operativo aplicable a pozas de bombeo por la Superintendencia de Construcción y Drenaje de C.M. Antapaccay.

Bajo este criterio, el volumen mínimo requerido se determina en función del caudal de diseño del sistema, de acuerdo con:

$$V_{mín} = Q_d * t_r$$

Donde:

- $Vmin$: volumen mínimo requerido (m³)
- Qd: caudal de diseño (m³/s)
- tr: tiempo de retención mínimo (s)

Para el sistema propuesto se considera:

- Qd=0.250 m3/s
- tr=1 hora=3600 s

$$V_{min} = 0.250 \times 3600 = 900\ m3$$

En consecuencia, cada poza intermedia debe disponer como mínimo de un volumen útil de almacenamiento mayor o igual a 900 m³, el cual será verificado mediante el cálculo geométrico del volumen útil propuesto.

3.4.2.7.1. Dimensionamiento geométrico de la Poza Intermedia 4 - NV 3630

Criterio geométrico adoptado (Estándar)

La Poza Intermedia NV 3630 está conformada por una batería de 3 compartimientos (2 de sedimentación y 1 de bombeo). Esta configuración se adopta por criterio operativo, ya que permite la decantación progresiva de sólidos antes del ingreso a bombas y reduce el desgaste de equipos.

En pozas con menor carga de sólidos o menor exigencia operativa pueden adoptarse 2 compartimientos; sin embargo, para NV 3630 se adopta 3 compartimientos por su función dentro del rebombeo.

Altura útil y freeboard

Para el cálculo hidráulico se considera solo volumen útil, es decir, el volumen hasta el nivel operativo del agua (sin freeboard):

Altura útil (hasta espejo): $h_{útil} = 4.50\ m$

Freeboard (borde libre de seguridad): $FB = 0.50\ m$

Altura total excavada: $h_{total} = h_{útil} + FB = 4.50 + 0.50 = 5.00\ m$

El freeboard se incorpora por seguridad para evitar reboses, pero no se contabiliza como volumen útil.

Método de cálculo geométrico

Debido a que la poza presenta taludes, el área en planta varía con la altura. Por ello el volumen útil se calcula con el método prismoidal:

- Áreas: $A = L \times B$
- Volumen prismoidal: $V = \frac{h}{3}\left(A_{sup} + A_{inf} + \sqrt{A_{sup} * A_{inf}}\right)$

Donde:

$Asup$ = área superior (m²)

$Ainf$ = área inferior (m²)

h = altura considerada (m)

Dimensionamiento por compartimiento y obtención del volumen útil

Dos compartimientos de sedimentación (01 y 02), dimensiones según planta:

- Superior: $L_{sup} = 21.02\ m$,$B_{sup} = 11.98\ m$

$$A_{sup} = 21.02 \times 11.98 = 251.8196\ m2$$

- Inferior: $L_{inf} = 16.63\ m$,$B_{inf} = 7.48\ m$

$$A_{inf} = 16.63 \times 7.48 = 124.3924\ m2$$

Con $h = h_{útil} = 4.50\ m$:

$$\mathrm{V}_{\text{útil}_{01\ ó\ 02}} = \frac{4.50}{3} * \left(251.8196 + 124.3924 + \sqrt{(251.8196) * (124.3924)}\right)$$

$$\mathrm{V}_{\text{útil}_{01\ ó\ 02}} = 829.80\ m^3$$

Un compartimiento de bombeo (03), Dimensiones según planta:

- Superior: $L_{sup} = 30.48\ m$,$B_{sup} = 12.60\ m$

$$A_{sup} = 30.48 \times 12.60 = 384.0480\ m2$$

- Inferior: $L_{inf} = 25.74\ m$,$B_{inf} = 8.02m$

$$A_{inf} = 25.74 \times 8.02 = 206.4348\ m2$$

Con $h = 4.50\ m$:

$$\mathrm{V}_{\text{útil}_{03}} = \frac{4.50}{3} * \left(384.0480 + 206.4348 + \sqrt{(384.0480) * (206.4348)}\right)$$

$$\mathrm{V}_{\text{útil}_{03}} = 1308.08\ m^3$$

Volumen útil total de la Poza NV 3630

Sumando los tres compartimientos:

$$V_{útil_{total}} = V_{útil_{01}} + V_{útil_{02}} + V_{útil_{03}}$$

$$V_{útil_{total}} = 829.80\ m^3 + 829.80\ m^3 + 1308.08\ m^3$$

$$V_{útil_{total}} = 2967.68\ m^3$$

Verificación hidráulica

Criterio mínimo: $V_{min} = 900\ m3$

Condición: $V_{útil_{total}} \geq V_{mi}$

Evaluación: $2956.21\ m3 \geq 900\ m3$

Por tanto, la Poza Intermedia NV 3630 cumple con el volumen mínimo requerido para un tiempo de retención de 1 hora con caudal de diseño $Qd = 0.250\ m3/s$.

Resultados de diseño

Finalmente, los volúmenes oficiales de ingeniería de detalle para la poza NV 3630 son (Véase la Tabla 19):

Tabla 19

Resultados del dimensionamiento hidráulico de la poza intermedia NV 3630

Compartimiento	h útil (m)	Volumen útil (m^3)	Volumen adoptado del plano (m^3)	Función
Poza 01	4.5	818.33	909.25	Sedimentación
Poza 02	4.5	829.8	935	Sedimentación
Poza 03	4.5	1308.08	1469	Bombeo
TOTAL NV 3630	**—**	**2956.21**	**3313.25**	**Estación intermedia**

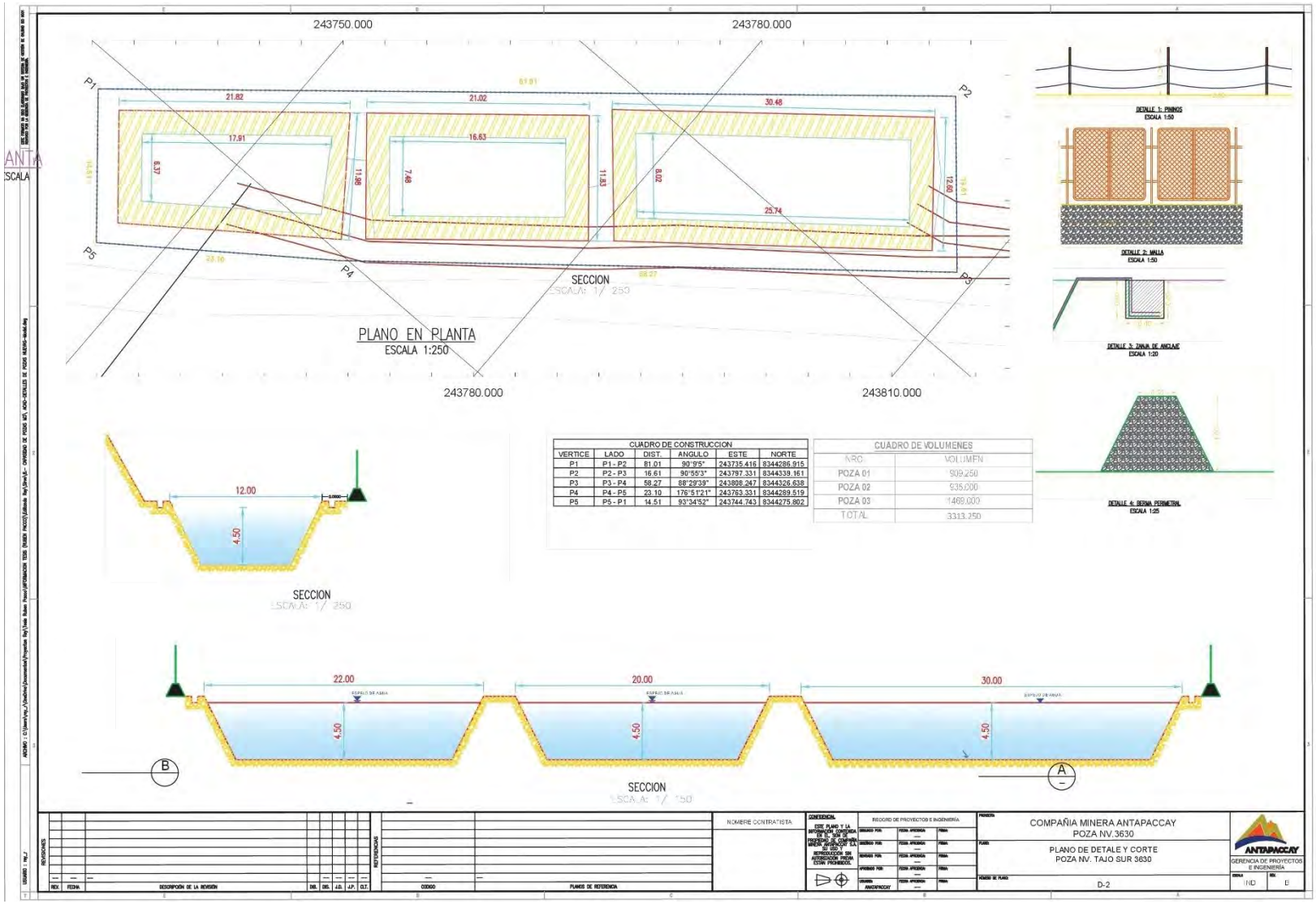
Nota. Elaboración Propia

La diferencia entre el volumen útil calculado (hasta espejo) y el volumen adoptado del plano se explica porque el plano reporta el volumen correspondiente a la geometría final y a la altura total excavada (incluyendo freeboard), además de considerar detalles constructivos propios del diseño definitivo.

Como se puede observar en la Figura 22, se presenta el plano de ingeniería de detalle correspondiente a la Poza Intermedia NV 3630, donde se muestran las dimensiones en planta, cortes, taludes, nivel operativo del agua y altura libre adoptada. Dichas dimensiones sustentan el cálculo geométrico desarrollado previamente.

Figura 22

Plano de ingeniería de detalle – Poza Intermedia NV 3630



Nota. C.M. Antapaccay

En la Figura 23 se presenta la poza intermedia NV 3630 en el proceso de excavación para su posterior impermeabilización.

Figura 23

Excavación de la poza intermedia 4 (Poza de Bombeo) – NV 3630



Nota. Elaboración Propia

En la figura 24 se presenta el proceso de impermeabilización de la poza intermedia.

Figura 24

Instalación de geomembrana en la poza intermedia 4 (Poza de Bombeo) – NV 3630



Nota. Elaboración Propia

3.4.2.7.2. Dimensionamiento geométrico de la Poza Intermedia NV 3750

Criterio geométrico adoptado

La Poza Intermedia NV 3750 está conformada por 2 compartimientos (Poza 01 y Poza 02). Esta configuración se adopta cuando las condiciones hidráulicas permiten una etapa de sedimentación previa al bombeo, manteniendo capacidad suficiente de almacenamiento para contingencias operativas del sistema de drenaje.

Altura útil y freeboard

De acuerdo con el plano de ingeniería de detalle de la Poza NV 3750 se consideran los siguientes parámetros:

Altura útil (hasta espejo): $h_{útil} = 4.50\ m$

Freeboard (borde libre de seguridad): $FB = 0.50\ m$

Altura total excavada: $h_{total} = h_{útil} + FB = 4.50 + 0.50 = 5.00\ m$

Dimensionamiento por compartimiento y obtención del volumen útil

Se diseña la poza 01 (bombeo), según las dimensiones de planta:

- Superior: $L_{sup} = 24.46\ m$,$B_{sup} = 10.62\ m$

$$A_{sup} = 24.46 \times 10.62 = 259.7652\ m2$$

- Inferior: $L_{inf} = 19.33\ m$,$B_{inf} = 5.07\ m$

$$A_{inf} = 19.33 \times 5.07 = 98.0031\ m2$$

Con $h = h_{útil} = 4.50\ m$:

$$\mathrm{V}_{\mathrm{útil}_{01}} = \frac{4.50}{3} * \left(259.7652\ + 98.0031 + \sqrt{(259.7652\ ) * (98.0031)}\right)$$

$$\mathrm{V}_{\mathrm{útil}_{01}} = 775.985\ m^3$$

Un compartimiento de sedimentación (02), Dimensiones según planta:

- Superior: $L_{sup} = 22.75\ m$,$B_{sup} = 10.00\ m$

$$A_{sup} = 22.75 \times 10.00 = 227.5\ m2$$

- Inferior: $L_{inf} = 17.87\ m$,$B_{inf} = 5.33\ m$

$$A_{inf} = 17.87 \times 5.33 = 95.2471\ m2$$

Con $h = 4.50\ m$:

$$\mathrm{V}_{\text{útil}_{02}} = \frac{4.50}{3} * \left(227.5 + 95.2471 + \sqrt{(227.5) * (95.2471)}\right)$$

$$\mathrm{V}_{\text{útil}_{02}} = 704.925\ m^3$$

Volumen útil total NV 3750

Sumando los dos compartimientos:

$$V_{\text{útil}_{total}} = V_{\text{útil}_{01}} + V_{\text{útil}_{02}}$$

$$V_{\text{útil}_{total}} = 775.985 + 704.925 = 1480.910\ m3$$

Verificación hidráulica

Criterio mínimo: $V_{min} = 900\ m3$

Condición: $V_{\text{útil}_{total}} \geq V_{mi}$

Evaluación: $1480.910 \geq 900\ m3$

Por tanto, la Poza Intermedia NV 3750 cumple con el volumen mínimo requerido.

Resultados de diseño

Finalmente, los volúmenes oficiales de ingeniería de detalle para la Poza Intermedia NV 3750 se presentan a continuación (Véase la Tabla 20).

Tabla 20

Resultados del dimensionamiento hidráulico de la poza intermedia NV 3750

Compartimiento	h útil (m)	Volumen útil (m³)	Volumen adoptado del plano (m³)	Función
Poza 01	4.5	775.99	891.03	Sedimentación
Poza 02	4.5	704.93	826.8	Bombeo
TOTAL NV 3750	**—**	**1480.91**	**1717.83**	**Estación intermedia**

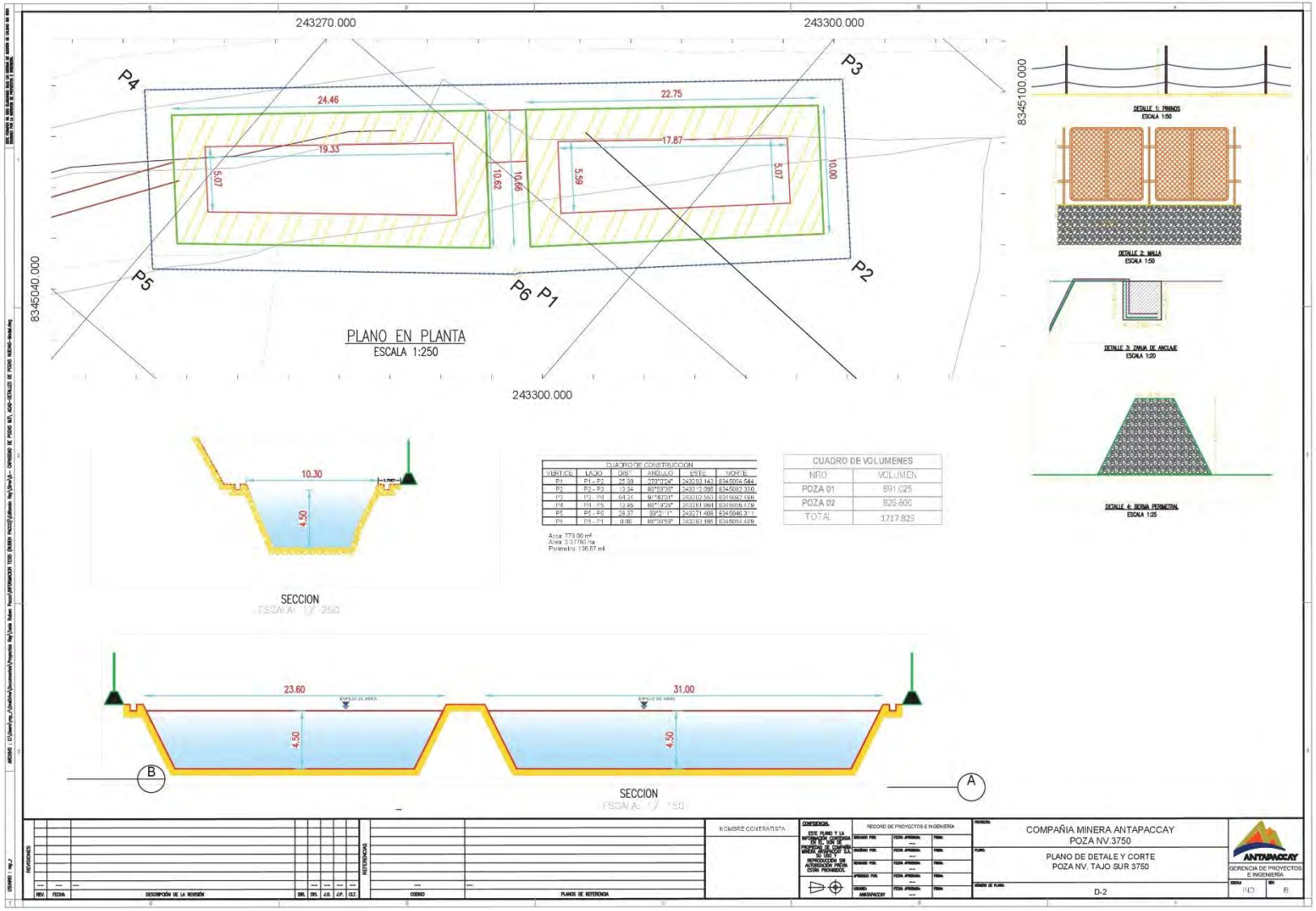
Nota. Elaboración Propia

La diferencia entre el volumen útil calculado (hasta espejo de agua) y el volumen adoptado del plano se explica porque el plano reporta el volumen correspondiente a la geometría final y a la altura total excavada (incluyendo freeboard), además de considerar detalles constructivos propios del diseño definitivo.

Como se puede observar en la Figura 25, se presenta el plano de ingeniería de detalle correspondiente a la Poza Intermedia NV 3750, donde se muestran las dimensiones en planta, cortes, taludes, nivel operativo del agua y altura libre adoptada. Dichas dimensiones sustentan el cálculo geométrico desarrollado previamente.

Figura 25

Plano de ingeniería de detalle – Poza Intermedia NV 3750



Nota. C.M. Antapaccay

En la Figura 26 se presenta la poza intermedia NV 3750 construida y impermeabilizada lista para su funcionamiento.

Figura 26

Poza intermedia NV 3750 construida e impermeabilizada



Nota. Elaboración Propia

3.4.2.7.3. Dimensionamiento geométrico de la Poza Intermedia NV 3890

Altura útil y freeboard

De acuerdo con el plano de ingeniería de detalle de la Poza NV 3890 se consideran los siguientes parámetros:

Altura útil (hasta espejo): $h_{útil} = 4.50\ m$

Freeboard (borde libre de seguridad): $FB = 0.50\ m$

Altura total excavada: $h_{total} = h_{útil} + FB = 4.50 + 0.50 = 5.00\ m$

Dimensionamiento por compartimiento y obtención del volumen útil

Se diseña la poza 01 (bombeo), según las dimensiones de planta:

- Superior: $L_{sup} = 23.60\ m$,$B_{sup} = 17.00\ m$

$$A_{sup} = 23.60 \times 17.00 = 401.20\ m2$$

- Inferior: $L_{inf} = 18.60\ m$,$B_{inf} = 12.00\ m$

$$A_{inf} = 18.60 \times 12 = 223.20\ m2$$

Con $h = h_{útil} = 4.50\ m$:

$$\mathrm{V}_{\mathrm{útil}_{01}} = \frac{4.50}{3} * \left(401.20\ + 223.20 + \sqrt{(401.20\ ) * (223.20)}\right)$$

$$\mathrm{V}_{\mathrm{útil}_{01}} = 1385.36\ m^3$$

Un compartimiento de sedimentación (02), Dimensiones según planta:

- Superior: $L_{sup} = 31.00\ m$,$B_{sup} = 17.00\ m$

$$A_{sup} = 31.00 \times 17.00 = 527.00\ m2$$

- Inferior: $L_{inf} = 26.00\ m$,$B_{inf} = 11.99\ m$

$$A_{inf} = 26.00 \times 11.99 = 311.74\ m2$$

Con $h = 4.50\ m$:

$$\mathrm{V}_{\mathrm{útil}_{02}} = \frac{4.50}{3} * \left(527.00\ + 311.74 + \sqrt{(527.00\ ) * (311.74)}\right)$$

$$\mathrm{V}_{\mathrm{útil}_{02}} = 1865.97\ m^3$$

Volumen útil total NV 3890

Sumando los dos compartimientos:

$$V_{útil_{total}} = V_{\mathrm{útil}_{01}} + V_{\mathrm{útil}_{02}}$$

$$V_{\mathrm{útil}_{total}} = 1385.36 + 1865.97 = 3251.33\ m3$$

Verificación hidráulica

Criterio mínimo: $V_{min} = 900\ m3$

Condición: $V_{útil_{total}} \geq V_{mi}$

Evaluación: $3251.33\ m3 \geq 900\ m3$

Por tanto, la Poza Intermedia NV 3890 cumple con el volumen mínimo requerido.

Resultados de diseño

Finalmente, los volúmenes oficiales de ingeniería de detalle para la Poza Intermedia NV 3890 se presentan a continuación.

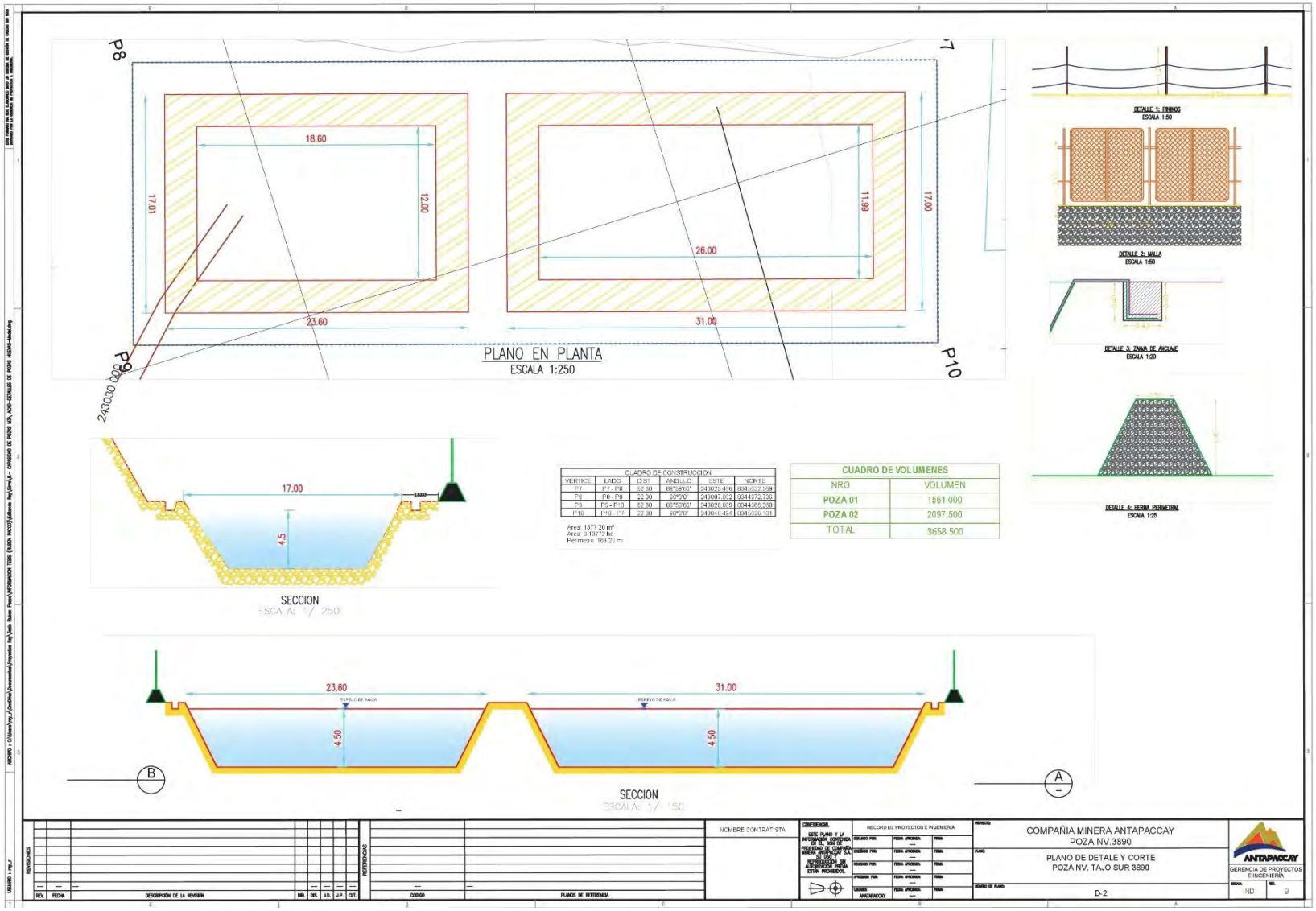
Compartimiento	h útil (m)	Volumen útil (m^3)	Volumen adoptado del plano (m^3)	Función
Poza 01	4.5	1385.36	1561	Sedimentación
Poza 02	4.5	1865.97	2097.5	Bombeo
TOTAL NV 3890	**—**	**3251.33**	**3658.5**	**Estación intermedia**

Nota. Elaboración Propia

Como se puede observar en el plano de ingeniería de detalle (Véase la Figura 27) correspondiente a la Poza Intermedia NV 3890, se muestran las dimensiones en planta, cortes, taludes, nivel operativo del agua y altura libre adoptada, las cuales sustentan el cálculo geométrico desarrollado previamente.

Figura 27

Plano de ingeniería de detalle – Poza Intermedia NV 3890



Nota. C.M. Antapaccay

En la Figura 28 se presenta la poza intermedia NV 3890 construida y impermeabilizada lista para su funcionamiento.

Figura 28

Poza intermedia NV 3890 construida e impermeabilizada



Nota. Elaboración Propia

3.4.2.7.4. Dimensionamiento geométrico de la Poza Intermedia NV 4005

Altura útil y freeboard

De acuerdo con el plano de ingeniería de detalle de la Poza NV 4005, se consideran los siguientes parámetros hidráulicos:

Altura útil (hasta espejo): $h_{útil} = 4.50\ m$

Freeboard (borde libre de seguridad): $FB = 0.50\ m$

Altura total excavada: $h_{total} = h_{útil} + FB = 4.50 + 0.50 = 5.00\ m$

El freeboard se incorpora por seguridad para evitar reboses, pero no se contabiliza como volumen útil.

Dimensionamiento por compartimiento y obtención del volumen útil

Dos compartimientos de sedimentación (01 y 02), dimensiones según planta:

- Superior: $L_{sup} = 16.09\ m$,$B_{sup} = 30.40\ m$

$$A_{sup} = 16.09 \times 30.40 = 489.14\ m2$$

- Inferior: $L_{inf} = 10.00\ m$,$B_{inf} = 20.00\ m$

$$A_{inf} = 10.00 \times 20.00 = 200.00\ m2$$

Con $h = h_{útil} = 4.50\ m$:

$$\mathrm{V}_{\mathrm{útil}_{01\ ó\ 02}} = \frac{4.50}{3} * \left(489.14 + 200.00 + \sqrt{(489.14) * (200.00)}\right)$$

$$\mathrm{V}_{\mathrm{útil}_{01\ ó\ 02}} = 1502.88\ m^3$$

Un compartimiento de bombeo (03), Dimensiones según planta:

- Superior: $L_{sup} = 29.87\ m$,$B_{sup} = 30.40\ m$

$$A_{sup} = 29.87 \times 30.40 = 907.05\ m2$$

- Inferior: $L_{inf} = 23.60\ m$,$B_{inf} = 17.00m$

$$A_{inf} = 23.60 \times 17.00 = 401.20\ m2$$

Con $h = 4.50\ m$:

$$\mathrm{V}_{\mathrm{útil}_{03}} = \frac{4.50}{3} * \left(907.05\ + 401.20 + \sqrt{(907.05\ ) * (401.20)}\right)$$

$$\mathrm{V}_{\mathrm{útil}_{03}} = 2867.23\ m^3$$

Volumen útil total de la Poza NV 4005

Sumando los tres compartimientos:

$$V_{útil_{total}} = V_{útil_{01}} + V_{útil_{02}} + V_{útil_{03}}$$

$$V_{útil_{total}} = 1502.88\ \ m^3 + 1502.88\ \ m^3 + 2867.23\ m^3$$

$$V_{útil_{total}} = 5895.81\ m^3$$

Verificación hidráulica

Criterio mínimo: $V_{min} = 900\ m3$

Condición: $V_{útil_{total}} \geq V_{mi}$

Evaluación: $5895.81\ m3 \geq 900\ m3$

Por tanto, la Poza Intermedia NV 4005 cumple con el volumen mínimo requerido, además de ello determinar que esta poza también es parte de desfogue de otra línea de bombeo, esto explica la dimensión de esta poza.

Resultados de diseño

Finalmente, los volúmenes oficiales de ingeniería de detalle para la poza NV 4005 son (Véase la Tabla 21):

Tabla 21

Resultados de diseño Poza Intermedia NV 4005

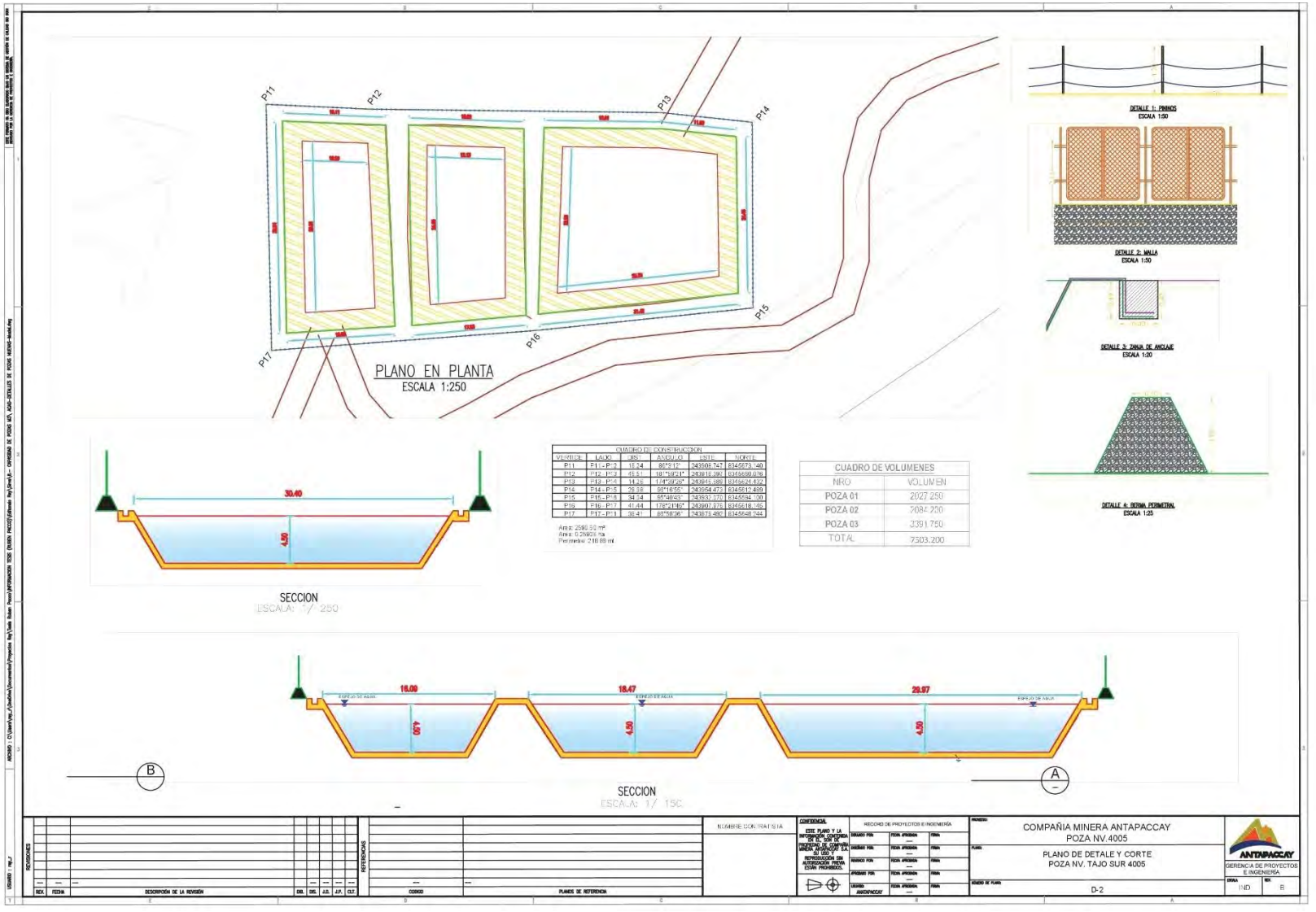
Compartimiento	h útil (m)	Volumen útil (m^3)	Volumen adoptado del plano (m^3)	Función
Poza 01	4.5	1502.88	2027.25	Sedimentación
Poza 02	4.5	1525.7	2084.8	Sedimentación
Poza 03	4.5	2867.23	3391.75	Bombeo
TOTAL NV 4005	**—**	**5895.81**	**7503.8**	**Estación intermedia**

Nota. Elaboración Propia

Como se puede observar en el plano de ingeniería de detalle (Véase la Figura 29) correspondiente a la Poza Intermedia NV 4005, se muestran las dimensiones en planta, cortes, taludes, nivel operativo del agua y altura libre adoptada, las cuales sustentan el cálculo geométrico desarrollado previamente.

Figura 29

Plano de ingeniería de detalle – Poza Intermedia NV 4005



Nota. C.M. Antapaccay

3.4.2.8. Selección de equipos de bombeo

Luego de determinar el caudal de diseño del sistema de drenaje y calcular la altura dinámica total (HDT) para cada tramo de bombeo, se procede a la selección de los equipos de bombeo requeridos para la evacuación progresiva del agua acumulada en el fondo del Tajo Sur Fase 8. La selección se realizó considerando la capacidad hidráulica de los equipos disponibles en operación, verificando que el caudal suministrado y la altura desarrollada sean compatibles con los requerimientos hidráulicos calculados para cada tramo del sistema.

Como criterios de selección se consideraron la altura dinámica total requerida, el caudal de bombeo necesario, la potencia instalada de los equipos y la disponibilidad operativa de las bombas utilizadas en la Compañía Minera Antapaccay. Asimismo, se evaluó el comportamiento hidráulico de cada equipo mediante sus respectivas curvas características H-Q, las cuales permiten relacionar el caudal bombeado con la altura desarrollada durante la operación.

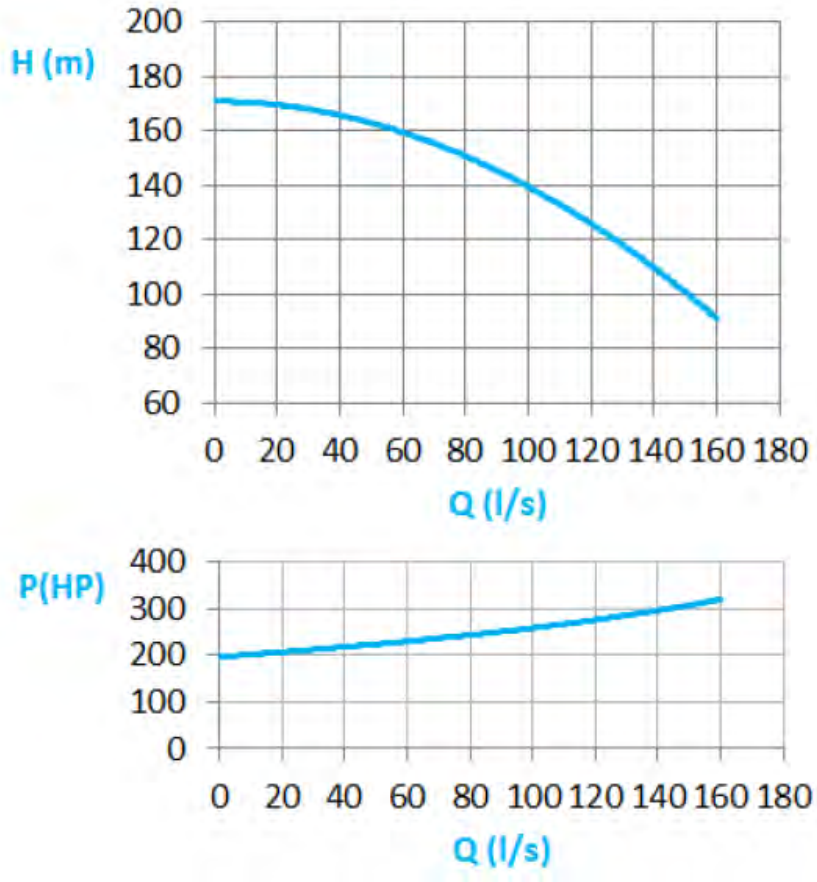
De acuerdo con estos criterios, se seleccionaron dos tipos de bombas empleadas habitualmente en las operaciones de drenaje de la unidad minera: la bomba sumergible Silver modelo H-V3 de 300 HP y la bomba Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP. Ambos equipos presentan capacidades adecuadas para operar dentro de los rangos de altura y caudal requeridos por el sistema de bombeo progresivo propuesto.

3.4.2.8.1. Bomba sumergible Silver H-V3 de 300 HP

Con la finalidad de evaluar la capacidad hidráulica de la bomba Silver H-V3 de 300 HP, se analizó su curva característica de operación, la cual relaciona el caudal bombeado con la altura desarrollada por el equipo. Adicionalmente, se presenta la curva de potencia requerida para diferentes condiciones de operación. Estas relaciones permiten estimar el caudal que puede suministrar la bomba para una determinada altura dinámica total del sistema. La curva característica correspondiente se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Curva característica de la bomba Silver H-V3 de 300 HP



Nota. Ficha Técnica SILVER H – V3

La curva característica de la bomba Silver H-V3 de 300 HP fue tabulada mediante la lectura de puntos representativos de la relación entre altura desarrollada (H) y caudal bombeado (Q). Estos valores constituyen la base para la posterior interpolación de caudales en función de la altura dinámica total calculada para cada tramo del sistema de bombeo. (Véase en la Tabla 22, que se presenta en la siguiente página).

Tabla 22

Tabulación de la curva característica de la bomba Silver H-V3 de 300 HP

Altura H (m)	Caudal Q (L/s)	Caudal Q (m^3/s)
170	0	0.000
168	20	0.020
165	40	0.040
160	60	0.060
151	80	0.080
140	100	0.100
126	120	0.120
110	140	0.140
90	160	0.160

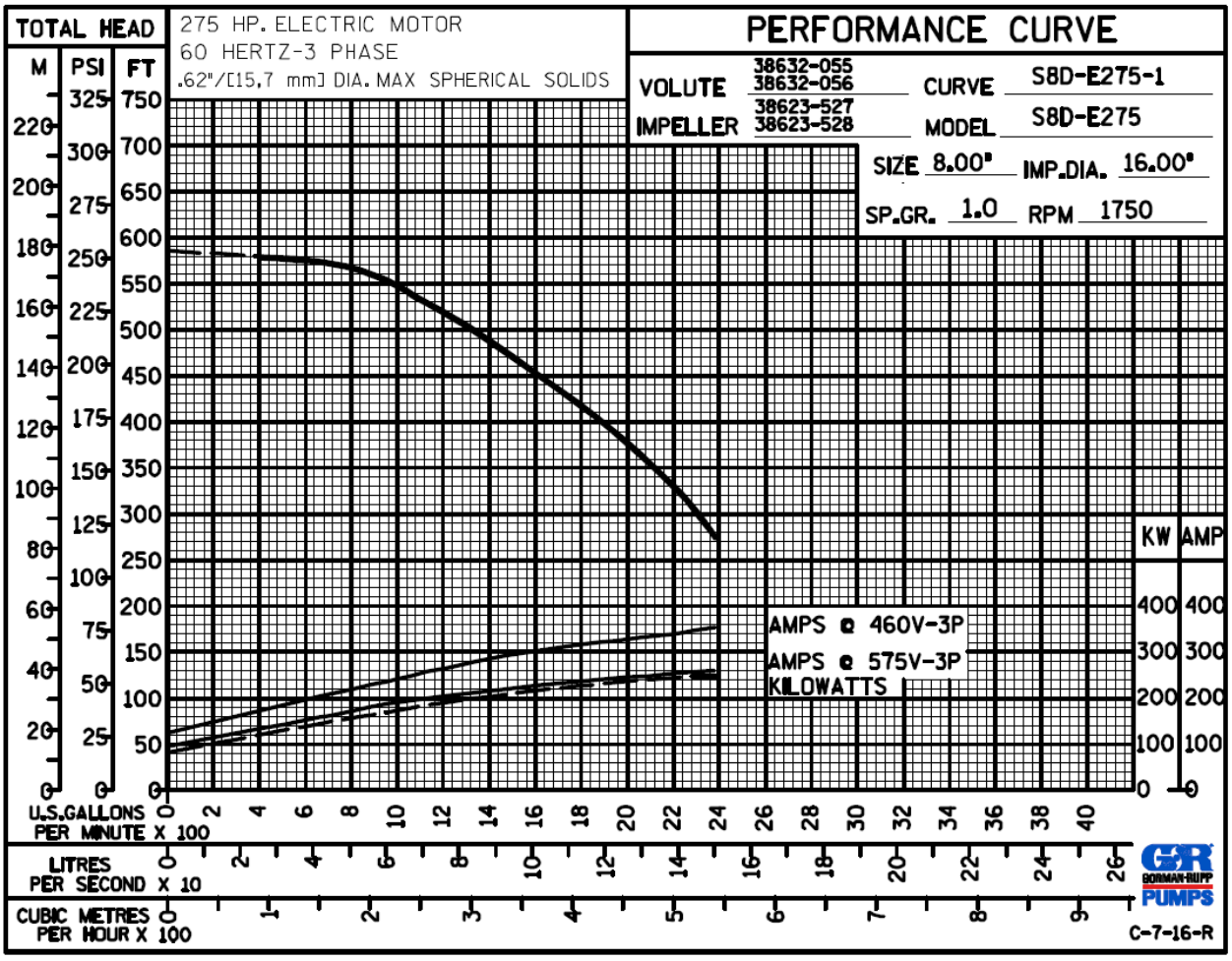
Nota. Valores obtenidos mediante lectura gráfica de la curva característica de la bomba Silver H-V3 de 300 HP.

3.4.2.8.2. Bomba Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP

Con la finalidad de evaluar la capacidad hidráulica de la bomba Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP, se analizó su curva característica de operación, la cual relaciona el caudal bombeado con la altura desarrollada por el equipo. Esta relación permite determinar el comportamiento hidráulico de la bomba bajo diferentes condiciones de operación y estimar el caudal que puede suministrar para una determinada altura dinámica total del sistema. Asimismo, la curva incorpora información complementaria sobre los requerimientos de potencia y consumo eléctrico del equipo. La curva característica correspondiente se presenta en la Figura 31, que se presenta en la siguiente página.

Figura 31

Curva característica de la bomba Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP



Nota. Ficha Técnica S8D1-E275

Con la finalidad de facilitar la estimación del caudal de operación para diferentes condiciones de altura dinámica total, se realizó la tabulación de la curva característica H–Q de la bomba Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP. Los valores presentados corresponden a puntos representativos obtenidos mediante lectura gráfica de la curva de desempeño del equipo y permiten establecer la relación entre la altura desarrollada y el caudal suministrado. Esta información será utilizada posteriormente para determinar, mediante interpolación, el caudal de operación correspondiente a cada tramo del sistema de bombeo. (Véase en la Tabla 23).

Tabla 23

Tabulación de la curva característica de la bomba Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP

Altura H (m)	Caudal Q (L/s)	Caudal Q (m^3/s)
178	20	0.020
175	40	0.040
170	60	0.060
165	70	0.070
160	80	0.080
153	90	0.090
145	100	0.100
137	110	0.110
128	120	0.120
118	130	0.130
108	140	0.140
96	150	0.150

Nota. Valores obtenidos mediante lectura gráfica de la curva característica de la bomba Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP.

3.4.2.9. Determinación del caudal de operación del sistema de bombeo

Luego de presentar las curvas características de las bombas seleccionadas, se procede a determinar el caudal de operación del sistema considerando la altura dinámica total (HDT) calculada para cada tramo. A partir de estos valores se ingresa a las curvas H–Q de las bombas Silver H-V3 de 300 HP y GR S8D1-E275 de 275 HP, obteniendo el caudal que puede suministrar cada equipo bajo las condiciones hidráulicas del sistema.

3.4.2.9.1. Determinación del caudal mediante interpolación y extrapolación de las curvas características

Para determinar el caudal de operación correspondiente a cada tramo del sistema de bombeo, se utilizaron las curvas características H-Q de las bombas Silver H-V3 de 300 HP y Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP. Cuando la altura dinámica total (HDT) calculada

se encuentra entre dos puntos conocidos de la curva, el caudal se obtiene mediante interpolación lineal. En aquellos casos donde la altura calculada se encuentra fuera del rango tabulado de la curva, se realiza una extrapolación considerando la tendencia hidráulica del equipo.

Como ejemplo, se presenta el procedimiento aplicado para el Tramo T1, cuya altura dinámica total es de 75.87 m.

Bomba Silver H-V3 de 300 HP

Para el Tramo T1 se tiene una altura dinámica total de 75.87 m. Este valor se encuentra por debajo del último punto tabulado de la curva Silver H-V3, por lo que se realiza una extrapolación lineal utilizando los dos últimos puntos de la curva:

- H1 = 110 m
- Q1 = 0.140 m³/s
- H2 = 90 m
- Q2 = 0.160 m³/s

La fórmula de extrapolación lineal es:

$$Q = Q1 + \left(\frac{H - H1}{H2 - H1}\right) \times (Q2 - Q1)$$

Reemplazando:

$$Q = 0.140 + \left(\frac{75.87 - 110}{90 - 110}\right) \times (0.160 - 0.140)$$

$$Q = 0.17413\, m^3/s$$

Por lo tanto, para el Tramo T1, el caudal extrapolado de la bomba Silver H-V3 de 300 HP es:

$$\boldsymbol{Q_{Silver_{T1}}} = 0.174\, m^3/s$$

Bomba Gorman-Rupp modelo S8D1-E275 de 275 HP

Para la bomba Gorman-Rupp se realiza el mismo procedimiento, utilizando los dos últimos puntos tabulados de la curva:

- H1 = 108 m
- Q1 = 0.140 m³/s
- H2 = 96 m
- Q2 = 0.150 m³/s

La fórmula de extrapolación lineal es:

$$Q = Q1 + \left(\frac{H - H1}{H2 - H1}\right) \times (Q2 - Q1)$$

Reemplazando:

$$Q = 0.140 + \left(\frac{75.87 - 108}{96 - 108}\right) \times (0.150 - 0.140)$$

$$Q = 0.16678\, m^3/s$$

Por lo tanto, para el Tramo T1, el caudal extrapolado de la bomba Gorman-Rupp S8D1-E275 de 275 HP es:

$$\boldsymbol{Q_{GR_{T1}}} = 0.167\, m^3/s$$

3.4.2.9.2. Consolidado de caudales estimados por tramo

Luego de aplicar la interpolación o extrapolación lineal correspondiente para cada altura dinámica total calculada, se consolidaron los caudales unitarios estimados para las bombas Silver H-V3 de 300 HP y Gorman-Rupp S8D1-E275 de 275 HP. Estos valores representan el caudal aproximado que puede entregar cada equipo en función de la HDT de cada tramo del sistema de bombeo. (Véase en la Tabla 24, que se muestra en la siguiente página).

Tabla 24

Caudal estimado por bomba según la altura dinámica total

Tramo	HDT (m)	Q Silver (m³/s)	Q GR (m³/s)
T1	75.87	0.174	0.167
T2	170.44	0.000	0.058
T3	153.01	0.076	0.090
T4	162.98	0.048	0.074
T5	15.76	0.234	0.217

Nota. Valores obtenidos mediante interpolación y extrapolación lineal de las curvas características H-Q de las bombas Silver H-V3 de 300 HP y Gorman-Rupp S8D1-E275 de 275 HP.

Para el caso del Tramo T2 en la bomba Silver, la HDT calculada supera ligeramente la altura máxima de la curva tabulada, por lo que no se considera caudal operativo efectivo para dicho equipo.

3.4.2.9.3. Determinación de la configuración de bombas por tramo

Con los caudales unitarios obtenidos para cada bomba, se determina la configuración de equipos necesaria en cada tramo del sistema. El caudal total se calcula como la suma de los caudales aportados por las bombas que operan en paralelo:

$$Q_{total} = n_s * Q_{Silver} + n_g * Q_{GR}$$

donde:

n_s = número de bombas Silver en operación.

n_g = número de bombas Gorman-Rupp en operación.

Como criterio de diseño se establece que el caudal total de operación debe superar el valor base de 0.25 m³/s y mantenerse preferentemente por debajo de 0.40 m³/s, con el fin de garantizar una evacuación eficiente del agua acumulada sin exceder la capacidad hidráulica de regulación de las pozas intermedias. (Véase en la Tabla 25, que se presenta en la siguiente página).

Tabla 25

Configuración de bombas por tramo

Tramo	HDT (m)	Configuración	Nº bombas	Qtotal (m³/s)
T1	75.87	1 Silver + 1 GR	2	0.341
T2	170.44	6 GR	6	0.348
T3	153.01	2 Silver + 2 GR	4	0.332
T4	162.98	3 Silver + 3 GR	6	0.366
T5	15.76	1 Silver + 1 GR	2	0.451

Nota. Elaboración Propia

La configuración definida permite mantener los caudales de operación por encima del caudal base de diseño de 0.250 m³/s. En el Tramo 2 se consideran únicamente bombas Gorman-Rupp debido a que la altura dinámica total del tramo supera la capacidad operativa efectiva de la bomba Silver H-V3. En el Tramo 5, aunque el caudal total supera el valor referencial de 0.400 m³/s, se considera técnicamente aceptable, debido a que el flujo es conducido hacia las megapozas de almacenamiento con alta capacidad de regulación hidráulica.

3.4.2.9.4. Verificación del volumen útil de las pozas con los caudales de operación

Con los caudales de operación definidos para cada tramo del sistema de bombeo, se procede a verificar que el volumen útil de las pozas intermedias sea suficiente para almacenar temporalmente el flujo proveniente del tramo correspondiente. Esta verificación permite garantizar la continuidad operativa del sistema y evitar desbordamientos durante el proceso de rebombeo.

La verificación se realiza mediante el cálculo del tiempo de almacenamiento hidráulico:

$$t = \frac{V_u}{Q}$$

donde:

- t = tiempo de almacenamiento (s)
- Vu = volumen útil de la poza (m³)
- Q = caudal de operación del sistema (m³/s)

Asimismo, se compara el volumen disponible con el volumen mínimo requerido para una hora de almacenamiento: $V_{min} = Q * 3600$

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla 26.

Tabla 26

Verificación del volumen útil de las pozas intermedias

Poza	Tramo asociado	Caudal Q (m^3/s)	Volumen útil Vu (m^3)	Volumen mínimo Vmin (m^3)	Tiempo de almacenamiento (h)	Verificación
NV 3630	**T1**	0.341	2967.68	1227.60	2.42	Cumple
NV 3750	**T2**	0.348	1480.91	1252.80	1.18	Cumple
NV 3890	**T3**	0.332	3251.33	1195.20	2.72	Cumple
NV 4005	**T4**	0.366	5895.81	1317.60	4.47	Cumple

Nota. Elaboración Propia

Los resultados muestran que todas las pozas intermedias disponen de un volumen útil superior al volumen mínimo requerido para una hora de almacenamiento. Asimismo, los tiempos de almacenamiento calculados son mayores a una hora en todos los casos, confirmando que las pozas cuentan con capacidad suficiente para regular los caudales de operación definidos para cada tramo del sistema de bombeo. El último tramo no se incluye en esta verificación debido a que la descarga final es conducida hacia megapozas de almacenamiento, cuya capacidad excede ampliamente los requerimientos de regulación hidráulica del sistema.

3.4.2.9.5. Verificación del NPSH disponible y evaluación del riesgo de cavitación

Con el propósito de verificar que las condiciones de instalación de la bomba seleccionada permitan una operación hidráulica adecuada y reduzcan el riesgo de cavitación, se realizó el cálculo del NPSH disponible ($NPSH_a$) para el Tramo 5 del sistema de bombeo progresivo. Para ello, se emplearon los parámetros de diseño obtenidos en la presente investigación y, en los

casos donde la información no se encontraba disponible en las especificaciones técnicas del fabricante, se adoptaron criterios de ingeniería sustentados para el desarrollo del análisis.

Datos para el cálculo:

- Altitud de operación = 4005 m s. n. m.
- Temperatura del agua = 10 °C
- Presión atmosférica:

$$H_{atm} = 10.33 - \frac{4005}{900} = 5.88\, mca$$

- Presión de vapor del agua a 10 °C:

$$H_v = 0.12\, mca$$

- Sumergencia de la bomba:

$$H_{sum} = 1.50\, m$$

- Pérdidas de carga en la entrada:

$$h_e = 0.20\, m$$

- NPSH requerido:

$$NPSH_r = 4.00\, m$$

Este valor corresponde a un criterio técnico referencial adoptado para bombas centrífugas sumergibles de potencia similar, debido a que el fabricante de los equipos seleccionados no proporciona el valor de NPSH requerido en las fichas técnicas consultadas.

Ecuación empleada:

$$NPSH_a = H_{atm} + H_{sum} - H_v - h_e$$

$$NPSH_a = 5.88 + 1.50 - 0.12 - 0.20$$

$$NPSH_a = 7.06\, m$$

Al comparar el NPSH disponible obtenido (7.06 m) con el NPSH requerido adoptado para el equipo (4.00 m), se verifica que:

$$7.06\ m > 4.00\ m$$

Por lo tanto, el sistema dispone de una carga suficiente en la entrada de la bomba para evitar la formación de cavitación durante la operación, cumpliéndose el criterio hidráulico de diseño. En consecuencia, las condiciones de instalación propuestas son adecuadas para garantizar un funcionamiento estable del sistema de bombeo progresivo.

3.4.2.9.6. Configuración espacial del sistema de bombeo escalonado propuesto

El sistema de drenaje diseñado se basa en un esquema de bombeo escalonado mediante pozas intermedias, el cual permite evacuar el agua acumulada en el fondo del Tajo Sur hacia niveles superiores del tajo. La configuración considera una serie de tramos de impulsión que conectan sucesivamente las pozas NV 3630, NV 3750, NV 3890 y la Poza Intermedia 1, reduciendo la altura de bombeo requerida en cada etapa del sistema.

La Figura 32 muestra la ubicación del Tramo 4, correspondiente a la línea de impulsión entre la Poza NV 3890 y la Poza Intermedia 1. Este tramo permite transferir el flujo hacia un nivel superior del tajo, desde donde el agua es conducida posteriormente hacia las megapozas del sistema de drenaje.

Figura 32

Ubicación del Tramo 4 del sistema de bombeo entre la Poza NV 3890 y la Poza Intermedia 1



Nota. Elaboración Propia

La Figura 33 presenta la disposición general de los tramos de bombeo dentro del Tajo Sur. El sistema inicia en el fondo del tajo, donde el agua es captada y bombeada hacia la Poza NV 3630 (Tramo 1). Posteriormente el flujo es impulsado hacia la Poza NV 3750 (Tramo 2) y luego hacia la Poza NV 3890 (Tramo 3), configurando un sistema de elevación progresiva que permite transportar el agua desde los niveles inferiores hasta zonas superiores del tajo.

Figura 33

Disposición general de los tramos del sistema de bombeo escalonado en el Tajo Sur

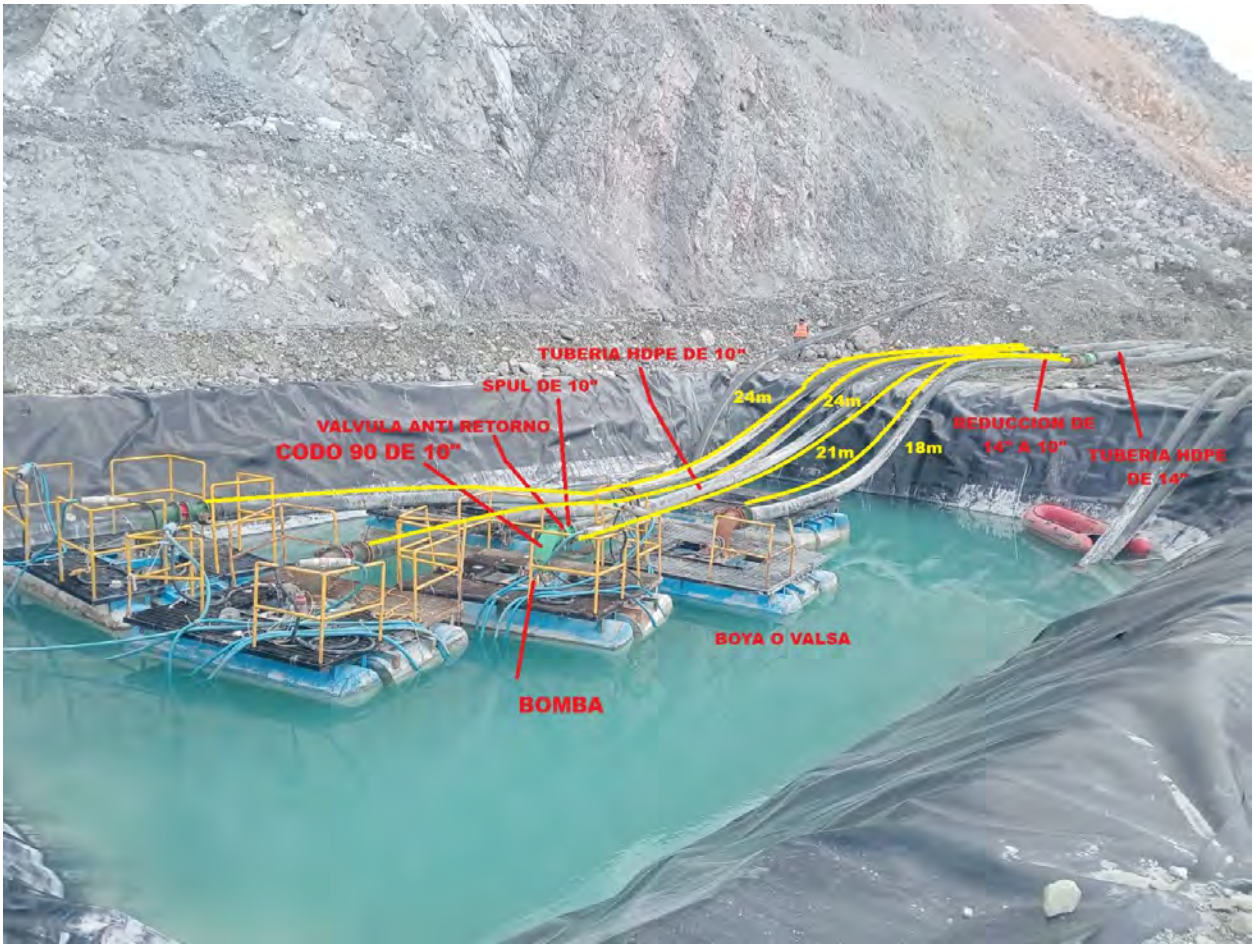


Nota. Elaboración Propia

La Figura 34 muestra el sistema de bombeo instalado en la Poza NV 3890, donde las bombas se encuentran montadas sobre plataformas flotantes, permitiendo su operación independiente de las variaciones del nivel de agua. La línea de impulsión está conformada por tuberías HDPE de 10” y 14”, conectadas mediante accesorios hidráulicos como válvulas antirretorno, codos de 90° y reducciones de diámetro, que permiten la conducción del flujo hacia el tramo siguiente del sistema.

Figura 34

Instalación del sistema de bombeo flotante en la Poza NV 3890



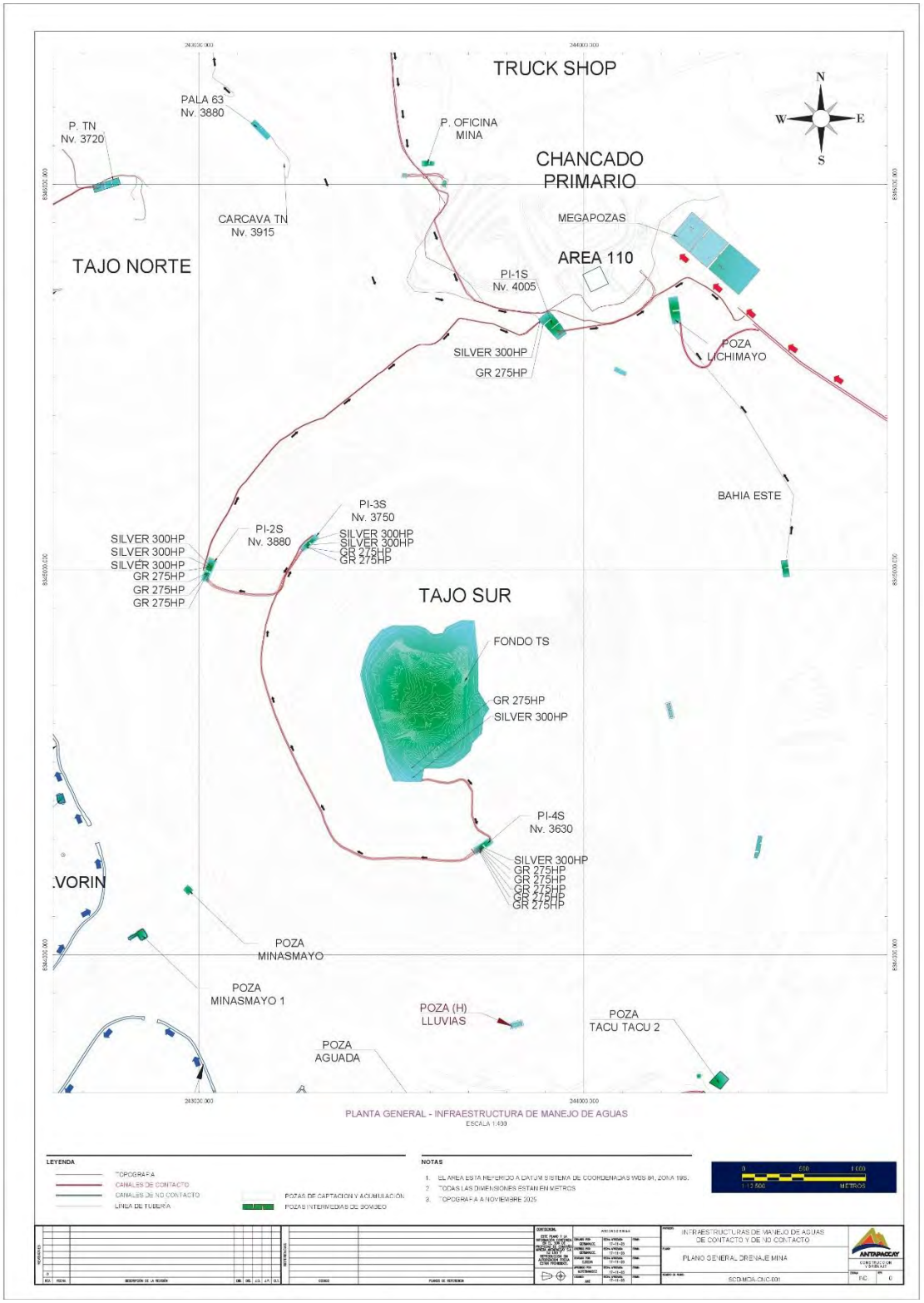
Nota. Elaboración Propia

La Figura 35 presenta la planta general del sistema de drenaje del Tajo Sur, donde se muestra la disposición de las pozas intermedias, estaciones de bombeo y líneas de impulsión que conforman el sistema de evacuación de agua.

El flujo se inicia en el fondo del Tajo Sur y es bombeado progresivamente hacia las pozas NV 3630, NV 3750 y NV 3890, hasta alcanzar la Poza Intermedia 1 (NV 4005). Desde este punto el agua es conducida hacia las megapozas del sistema de manejo de aguas ubicadas en niveles superiores de la operación.

Figura 35

Planta general del sistema de bombeo progresivo propuesto para el Tajo Sur



Nota. C.M. Antapaccay

3.4.3. Evaluación Económica del Sistema de Drenaje

La evaluación económica del sistema de drenaje se realizó a partir del metrado del sistema de impulsión por tramos y de los costos asociados a los principales componentes del sistema, incluyendo tuberías de impulsión, accesorios hidráulicos, equipos de bombeo, sistema flotante y mano de obra para la instalación.

El metrado de tuberías se determinó considerando que cada bomba opera mediante una línea de impulsión independiente, por lo que la longitud total instalada corresponde al producto entre la longitud de cada tramo y el número de bombas operativas.

El costo total del sistema se obtiene a partir de la consolidación de los costos directos y la incorporación de un 10% de imprevistos, los cuales permiten cubrir variaciones menores de metrado, ajustes de instalación y requerimientos adicionales durante el montaje del sistema.

3.4.3.1. Costo de tuberías de impulsión

El sistema de drenaje propuesto utiliza tubería HDPE de 14 pulgadas para la conducción del flujo en los diferentes tramos del sistema de bombeo. El metrado total de tuberías se determinó considerando la longitud de cada tramo y el número de bombas asociadas.

$$L_{inst} = L_i * N_i$$

donde:

Li = longitud del tramo

Ni = número de bombas en el tramo

Tabla 27

Metrado y costo de tubería HDPE

Tramo	Longitud tramo (m)	Nº bombas	Longitud instalada (m)	PU (USD/m)	Costo (USD)
T1	297	2	594	112.43	66,783.42
T2	1261.93	6	7,571.58	112.43	851,272.74
T3	325.35	4	1,301.40	112.43	146,316.40
T4	1200.29	6	7,201.74	112.43	809,691.63
T5	394.33	2	788.66	112.43	88,669.04
TOTAL	**3,478.90**	**20**	**17,457.38**		**1,962,733.23**

Nota. Elaboración Propia

3.4.3.2. Costo de accesorios hidráulicos

Los accesorios hidráulicos permiten la conexión de las líneas de impulsión y garantizan la operación segura del sistema de bombeo.

Tabla 28

Costo de accesorios hidráulicos

Concepto	Costo (USD)
Bridas	113,540.61
Accesorios de descarga (codos, tee, válvula antirretorno)	17,772.80
Subtotal accesorios	**131,313.41**

Nota. Elaboración Propia

3.4.3.3. Costo del sistema de bombeo

El sistema de drenaje considera bombas centrífugas instaladas en pozas intermedias. De acuerdo con la configuración definida en el diseño hidráulico, se utilizan bombas Silver de 300 HP y bombas Gorman-Rupp (GR) de 275 HP, cuya cantidad varía según la altura dinámica total y el caudal requerido en cada tramo.

Tabla 29

Distribución de bombas por tramo

Tramo	Configuración	Nº Silver (300 HP)	Nº GR (275 HP)	Total bombas
T1	1 Silver + 1 GR	1	1	2
T2	6 GR	-	6	6
T3	2 Silver + 2 GR	2	2	4
T4	3 Silver + 3 GR	3	3	6
T5	1 Silver + 1 GR	1	1	2
TOTAL		7	13	20

Nota. Elaboración Propia

Tabla 30

Costo de bombas

Tipo de bomba	Potencia	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Silver	300 HP	7	20,000	140,000
Gorman-Rupp (GR)	275 HP	13	18,000	234,000
Total equipos de bombeo		**20**		**374,000**

Nota. Elaboración Propia

Tabla 31

Sistema flotante de bombeo

Concepto	Costo (USD)
Sistema flotante (boyas/plataforma)	7,876
Subtotal sistema flotante	**7,876**

Nota. Elaboración Propia

Tabla 32

Costo total del sistema de bombeo

Concepto	Costo (USD)
Equipos de bombeo	374,000
Sistema flotante	7,876
TOTAL SISTEMA DE BOMBEO	**381,876**

Nota. Elaboración Propia

3.4.3.4. Presupuesto consolidado del sistema de drenaje propuesto

Con base en los costos estimados para cada uno de los componentes del sistema de drenaje, se realizó la consolidación del presupuesto total del proyecto. Este presupuesto integra los costos asociados a tuberías de impulsión HDPE de 14”, accesorios hidráulicos, equipos de bombeo, sistema flotante y mano de obra requerida para el montaje e instalación del sistema. Asimismo, se considera un 10% adicional por imprevistos, destinado a cubrir posibles variaciones de metrado, ajustes durante la instalación y requerimientos adicionales que puedan presentarse durante la ejecución del proyecto. Los resultados del presupuesto consolidado se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 33

Presupuesto consolidado del sistema de drenaje

Concepto	Costo (USD)
A. Tubería HDPE 14" (según metrado por tramos)	1,962,733.23
B. Accesorios hidráulicos (bridas + accesorios de descarga)	131,313.41
C. Sistema de bombeo (20 bombas + sistema flotante)	381,876.00
D. Mano de obra (4 operadores + Ing. supervisión + Ing. seguridad)	164,800.00
SUBTOTAL COSTO DIRECTO	2,640,722.64
Imprevistos (10%)	264,072.26
TOTAL GENERAL	**2,904,794.90**

Nota. Elaboración Propia

Es importante señalar que la presente investigación se centra en la evaluación técnica y económica preliminar de la propuesta de drenaje, considerando como principal indicador económico el costo de inversión (CAPEX) requerido para la implementación del sistema propuesto. Asimismo, esta propuesta contempla la implementación de una línea de drenaje necesaria para garantizar la continuidad operativa del tajo, sustentada en la planificación minera vigente, la cual establece el inicio de operaciones en dicho sector, con especial énfasis en la Fase 8.

Si bien no fue posible desarrollar una evaluación completa de los costos operativos (OPEX), debido a que esta información corresponde a datos internos de carácter confidencial de la Compañía Minera Antapaccay, tales como costos de mantenimiento, mano de obra operativa, repuestos, insumos y demás gastos asociados a la operación del sistema de bombeo, sí se realizó una estimación referencial del costo energético anual del sistema propuesto, empleando la potencia nominal de los equipos seleccionados, un régimen de operación continuo y una tarifa eléctrica industrial de referencia. Esta estimación permite complementar la evaluación económica preliminar sin comprometer información confidencial de la operación.

En consecuencia, la evaluación económica presentada comprende el análisis del costo de inversión (CAPEX) y una estimación referencial del costo energético anual del sistema de bombeo progresivo propuesto. No obstante, una evaluación integral del OPEX y de los beneficios económicos asociados a la reducción de paralizaciones operativas deberá desarrollarse en estudios posteriores que dispongan de información operativa y financiera propia de la compañía.

3.4.3.5. Estimación del costo energético anual del sistema de bombeo

La estimación del costo energético anual se realizó considerando la potencia máxima absorbida de los equipos de bombeo seleccionados, el número total de bombas operativas, el régimen continuo de trabajo y una tarifa eléctrica referencial. Para este cálculo se adoptó un factor de simultaneidad igual a 1.00, debido a que las bombas de los diferentes tramos operan de manera conjunta para mantener caudales de transferencia relativamente equilibrados entre las pozas intermedias y reducir el riesgo de acumulación o rebose.

La bomba Silver H–V3 presenta una potencia máxima absorbida de 225 kW, mientras que la bomba Gorman-Rupp S8D1-E275 presenta una potencia máxima de 252 kW.

De acuerdo con la configuración propuesta del sistema, se consideran:

- 7 bombas Silver H–V3.
- 13 bombas Gorman-Rupp S8D1-E275.

- 24 horas de operación por día.
- 300 días efectivos de operación por año.
- Factor de simultaneidad: 1.00.
- Tarifa eléctrica referencial: S/ 0.223/kWh, utilizada en base a las tarifas publicadas por OSINERGMIN..

La potencia total simultánea se determina mediante:

$$P_{total} = (N_{Silver} \times P_{Silver}) + (N_{GR} \times P_{GR})$$

Reemplazando:

$$P_{total} = 4851kW$$

Las horas efectivas de operación anual se calculan como:

$$H_{anual} = \frac{24h}{día} \times 300 \frac{días}{año}$$

$$H_{anual} = 7200 \frac{h}{año}$$

El consumo energético anual estimado es:

$$E_{anual} = P_{total} \times H_{anual}$$

$$E_{anual} = 4851 \times 7200$$

$$E_{anual} = 34927200 \frac{kWh}{año}$$

Finalmente, el costo energético anual estimado se determina mediante:

$$C_{anual} = E_{anual} \times T_e$$

$$C_{anual} = 34927200 \times 0.223$$

$$\boldsymbol{C_{anual} = S/\ 7788765.60}$$

Tabla 34

Estimación del costo energético anual del sistema de bombeo

Parámetro	Valor
Número de bombas Silver H–V3	7
Potencia máxima absorbida por bomba Silver	225 kW
Número de bombas Gorman-Rupp S8D1-E275	13
Potencia máxima por bomba Gorman-Rupp	252 kW
Potencia total simultánea	4851 kW
Horas de operación por día	24 h
Días efectivos de operación por año	300 días
Horas efectivas de operación anual	7200 h/año
Factor de simultaneidad	1.00
Consumo energético anual	34 927 200 kWh/año
Tarifa eléctrica referencial	S/ 0.223/kWh
Costo energético anual estimado	**S/ 7 788 765.60**

Nota. Elaboración propia con base en las potencias máximas indicadas en las fichas técnicas de las bombas Silver H–V3 y Gorman-Rupp S8D1-E275. La tarifa eléctrica se emplea como valor referencial para fines de estimación, debido a la confidencialidad del costo real de suministro eléctrico de la operación minera. Las tarifas eléctricas reguladas son publicadas y actualizadas por OSINERGMIN mediante sus pliegos tarifarios.

Los resultados muestran que el sistema presenta un consumo energético anual estimado de 34.93 GWh, equivalente a un costo referencial de aproximadamente S/ 7.79 millones por año. Este valor representa una estimación conservadora, debido a que se consideró la potencia máxima de los equipos, la operación simultánea de todas las bombas y un régimen efectivo de 7200 horas anuales.

CAPÍTULO IV:

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Análisis de la Configuración del Sistema de Bombeo Propuesto

El diseño desarrollado en el Capítulo IV permitió definir una nueva configuración del sistema de drenaje para el Tajo Sur – Fase 8 mediante un esquema de bombeo progresivo optimizado, el cual conecta las pozas intermedias NV 3630, NV 3750, NV 3890 y la Poza Intermedia 1 mediante cinco tramos de impulsión sucesivos.

Este esquema permite evacuar el agua acumulada en el fondo del tajo mediante un sistema escalonado que reduce la altura hidráulica requerida en cada estación de bombeo.

El sistema diseñado transporta caudales comprendidos entre 0.314 m³/s y 0.376 m³/s, dependiendo del tramo del sistema.

Tabla 35

Caudal operativo del sistema por tramo

Tramo	HDT (m)	Nº bombas	Caudal total (m³/s)
T1	75.87	2	0.314
T2	170.44	6	0.331
T3	153.01	4	0.326
T4	162.98	6	0.376
T5	15.76	2	0.367

Nota. Elaboración Propia

El sistema alcanza un caudal máximo de 0.376 m³/s (376 L/s), lo cual permite evacuar mayores volúmenes de agua que los registrados en el sistema existente, mejorando la capacidad de drenaje del fondo del tajo.

4.1.2. Análisis de la Longitud del Sistema de Impulsión

El diseño del sistema de bombeo considera una longitud total de impulsión de 3478.90 m, distribuida en cinco tramos principales que conectan las estaciones intermedias de bombeo.

Sin embargo, debido a que cada bomba opera mediante una línea independiente de impulsión, la longitud total instalada de tuberías alcanza 17,457.38 m.

Tabla 36

Longitud del sistema de impulsión

Tramo	Longitud tramo (m)	Nº bombas	Longitud instalada (m)
T1	297	2	594
T2	1261.93	6	7571.58
T3	325.35	4	1301.4
T4	1200.29	6	7201.74
T5	394.33	2	788.66
Total	**3478.9**	**20**	**17457.38**

Nota. Elaboración Propia

El tramo de mayor longitud corresponde al Tramo 2, con 1261.93 m, lo cual explica el mayor valor de altura dinámica total (170.44 m) y la necesidad de instalar seis bombas en este tramo.

4.1.3. Análisis del Volumen de Almacenamiento de las Pozas Intermedias

El diseño del sistema consideró el dimensionamiento hidráulico de las pozas intermedias para garantizar una capacidad de almacenamiento suficiente frente a variaciones en el caudal de entrada.

Tabla 37

Volumen útil de las pozas intermedias

Poza	Caudal Q (m^3/s)	Volumen útil Vu (m^3)	Tiempo de almacenamiento (h)
NV 3630	0.314	2967.68	2.63
NV 3750	0.331	1480.91	1.24
NV 3890	0.326	3251.33	2.77
NV 4005	0.376	5895.81	4.35

Nota. Elaboración Propia

Los resultados muestran que todas las pozas cumplen con el criterio de almacenamiento mínimo requerido para el sistema de drenaje, presentando tiempos de almacenamiento superiores a 1 hora, lo cual garantiza estabilidad hidráulica durante la operación del sistema.

La poza con mayor capacidad corresponde a NV 4005, con 5895.81 m^3, lo que permite regular el flujo proveniente de los tramos inferiores del sistema.

4.1.4. Análisis de la Optimización del Sistema Respecto al Sistema Existente

El sistema de drenaje existente en el Tajo Sur presenta una distribución de estaciones de bombeo que se ha implementado progresivamente conforme avanzó la explotación minera.

El análisis comparativo permitió identificar mejoras operativas del sistema diseñado respecto al sistema existente.

Tabla 38

Comparación de parámetros operativos

Parámetro	Sistema existente	Sistema propuesto
Número de estaciones de bombeo	7	5
Número total de bombas	mayor dispersión operativa	20 bombas optimizadas
Caudal estimado del sistema	menor capacidad	hasta 0.376 m^3/s
Capacidad de almacenamiento de pozas	variable	hasta 5895.81 m^3

Nota. Elaboración Propia

El nuevo sistema permite reducir el número de estaciones intermedias, optimizando la distribución del bombeo mediante tramos hidráulicos mejor definidos.

Asimismo, el sistema propuesto incrementa la capacidad de evacuación del agua mediante la utilización de configuraciones de bombeo más eficientes por tramo.

4.1.5. Análisis Económico del Sistema de Drenaje

El costo total del sistema de drenaje propuesto se estimó a partir del metrado de tuberías, accesorios hidráulicos, equipos de bombeo y costos de instalación.

Tabla 39

Presupuesto del sistema de drenaje

Concepto	Costo (USD)
Tubería HDPE 14"	1,962,733.23
Accesorios hidráulicos	131,313.41
Sistema de bombeo	382,876.00
Mano de obra	164,800.00
Subtotal	2,640,722.64
Imprevistos (10%)	264,072.26
Costo total	**2,904,794.90**

Nota. Elaboración Propia

El componente de mayor costo corresponde a la instalación de tuberías HDPE, que representa aproximadamente 67 % del costo total del sistema, debido a la gran longitud instalada del sistema de impulsión.

Por otro lado, el costo asociado al sistema de bombeo representa aproximadamente 13 % del costo total del proyecto, considerando la instalación de 20 bombas operativas.

4.1.6. Análisis de la Mejora Operativa del Sistema

A partir del análisis del sistema diseñado se identifican las siguientes mejoras operativas:

- Incremento de la capacidad de evacuación del sistema hasta 0.376 m^3/s, lo cual permite manejar mayores aportes de agua en el fondo del tajo.
- Optimización de la distribución de estaciones de bombeo mediante un esquema de bombeo escalonado con tramos hidráulicamente definidos.

- Mayor capacidad de almacenamiento temporal en pozas intermedias, alcanzando hasta 5895.81 m³.
- Reducción de interrupciones operativas mediante un sistema hidráulico que permite regular variaciones de caudal.

Estas mejoras permiten garantizar la continuidad de las operaciones mineras en el fondo del Tajo Sur durante el desarrollo de la Fase 8, reduciendo los riesgos asociados a la acumulación de agua y mejorando la eficiencia del sistema de drenaje.

4.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

4.2.1. Verificación de la hipótesis general

En el desarrollo del diseño hidráulico se determinó un caudal promedio de drenaje de 0.107 m³/s y un caudal máximo de diseño de 0.250 m³/s. El sistema propuesto fue configurado mediante cinco tramos de impulsión, obteniéndose una capacidad de evacuación de 0.376 m³/s, superior al caudal máximo de diseño. Asimismo, el sistema fue dimensionado con alturas dinámicas totales entre 75.87 m y 170.44 m, valores utilizados para la selección de los equipos de bombeo.

4.2.2. Verificación de la hipótesis específica 1

Los resultados identificaron que la profundidad del Tajo Sur, la distribución de niveles de bombeo, los caudales de diseño, la altura dinámica total, las pérdidas de carga y las condiciones geotécnicas fueron los criterios considerados para el dimensionamiento del sistema. Estos parámetros permitieron establecer la configuración hidráulica y seleccionar los equipos de bombeo correspondientes para cada tramo.

4.2.3. Verificación de la hipótesis específica 2

El diseño definió una línea de impulsión compuesta por cinco tramos y la construcción de pozas intermedias impermeabilizadas, permitiendo reducir la altura de impulsión por tramo y

establecer un sistema de bombeo escalonado. La configuración obtenida permitió alcanzar una capacidad de evacuación de 0.376 m³/s, manteniendo la continuidad hidráulica del sistema.

4.2.4. Verificación de la hipótesis específica 3

El dimensionamiento hidráulico determinó alturas dinámicas totales de 75.87 m, 170.44 m, 153.01 m, 162.98 m y 15.76 m para los cinco tramos del sistema. Con estos resultados se seleccionaron bombas de 95 HP, 140 HP, 275 HP y 300 HP, de acuerdo con las condiciones hidráulicas de cada tramo, verificándose además que el Tramo 2 constituye el tramo crítico del sistema.

4.3. DISCUSIÓN

4.3.1. Factores operacionales que condicionan el diseño del sistema de bombeo

Los resultados muestran que la profundidad del Tajo Sur Fase 8 constituye el principal factor que condiciona el diseño del sistema de bombeo. La distribución actual de bombas GR 95 HP, Flygt 140 HP, GR 275 HP y Silver Plus 300 HP entre las cotas 3470 m y 4005 m evidencia que la evacuación del agua requiere dividir la carga hidráulica total en varios tramos de rebombeo. Bajo estas condiciones, un sistema de bombeo directo generaría mayores requerimientos de potencia, mayores pérdidas por fricción y menor eficiencia operacional.

Este comportamiento coincide con Cansaya (2017), quien identificó en Antapaccay la necesidad de emplear bombas entre 95 HP y 275 HP distribuidas en diferentes niveles para reducir la carga hidráulica por tramo. Sin embargo, la incorporación de equipos de hasta 300 HP en la presente investigación indica que las condiciones actuales de profundización del Tajo Sur Fase 8 demandan mayores capacidades de bombeo respecto a las evaluadas en dicho estudio.

Asimismo, Cano (2022) señala que la selección de equipos debe realizarse considerando la altura dinámica total y las pérdidas de carga del sistema. En consecuencia, los equipos seleccionados en la presente investigación responden a las condiciones hidráulicas específicas de cada tramo y no únicamente al caudal de operación.

La principal limitación del análisis es que se basa en información operacional disponible durante el periodo de evaluación y no incorpora simulaciones hidrogeológicas futuras que permitan estimar variaciones de caudal asociadas a nuevas fases de profundización del tajo.

4.3.2. Diseño de la ruta de bombeo y ubicación de pozas intermedias

La ruta de bombeo propuesta se desarrolló con el objetivo de reducir la altura de impulsión que debe vencer cada estación de bombeo. Para ello se planteó la utilización de pozas intermedias que permiten almacenar temporalmente el agua y transferirla progresivamente hacia niveles superiores. Este criterio reduce la exigencia hidráulica sobre los equipos y facilita el mantenimiento del sistema.

Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Barreto (2017), quien diseñó estaciones intermedias para transportar agua entre distintos niveles operativos de Antapaccay. Sin embargo, la ubicación de las pozas propuestas en la presente investigación responde específicamente a la geometría actual del Tajo Sur Fase 8, por lo que no constituye una réplica del diseño anterior sino una adaptación a las condiciones actuales de operación.

Asimismo, Cahyono et al. (2025) concluyen que la capacidad insuficiente de las estructuras de almacenamiento genera desbordes e interrupciones operativas. En ese sentido, la incorporación de pozas intermedias en la presente propuesta busca evitar acumulaciones excesivas de agua y mantener la continuidad del drenaje.

Una limitación del diseño es que la ubicación de las pozas depende de la configuración actual del tajo, la cual puede modificarse conforme avance el plan de minado.

4.3.3. Diseño de pozas, selección de equipos y línea de bombeo

El diseño de las pozas, la selección de equipos y el trazado de la línea de bombeo fueron desarrollados como un sistema integrado. La capacidad de las pozas permite regular temporalmente el flujo de agua entre estaciones, mientras que la selección de bombas responde a los requerimientos hidráulicos identificados para cada tramo.

Los resultados guardan relación con Cano (2022), quien establece que la selección de bombas debe realizarse en función de la altura dinámica total y las pérdidas por fricción de la línea de impulsión. De igual forma, Barreto (2017) señala que el desempeño del drenaje depende de la interacción entre estaciones de bombeo, pozas y tuberías.

Por otro lado, Ortiz (2014) reportó 558 horas de paralización anual debido a problemas asociados a la acumulación de agua en mina. Este antecedente evidencia que un sistema de drenaje insuficiente puede afectar directamente la continuidad operativa. En contraste, la presente propuesta busca reducir este riesgo mediante una distribución progresiva de las estaciones de bombeo y una adecuada regulación hidráulica entre pozas.

La principal limitación corresponde a que el diseño no fue validado mediante pruebas operacionales a escala real, por lo que su desempeño deberá verificarse durante futuras etapas de implementación.

CONCLUSIONES

- Se diseñó un sistema de bombeo progresivo para mejorar la efectividad de la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur – Fase 8 de la Compañía Minera Antapaccay, tomando como base un caudal máximo de diseño de 0.250 m^3/s y una longitud total de impulsión de 2 912.7 m. La propuesta permite incrementar la capacidad de drenaje y garantizar la continuidad operativa durante la profundización del tajo.
- Se determinó que los principales factores que influyen en el diseño del sistema corresponden al caudal de drenaje, la altura geométrica total de 439 m, las pérdidas por fricción de 139.06 m y las condiciones geotécnicas para la ubicación de las pozas intermedias. Como resultado del análisis hidráulico, se obtuvieron alturas dinámicas totales entre 75.87 m y 170.44 m, identificándose el Tramo 2 como la condición más crítica para el dimensionamiento del sistema.
- Se definió una configuración de bombeo progresivo compuesta por cinco tramos de impulsión y cuatro pozas intermedias ubicadas en los niveles 3630, 3750, 3890 y 4005. Esta configuración permite distribuir la carga hidráulica total en etapas sucesivas de rebombeo y proporciona una capacidad de almacenamiento temporal de hasta 5 895.81 m^3, favoreciendo la regulación operativa del sistema de drenaje.
- Se establecieron los criterios técnicos para el dimensionamiento hidráulico y la selección de equipos mediante una línea de impulsión HDPE de 14” SDR 9 y un sistema conformado por 20 bombas distribuidas en los distintos tramos. El sistema alcanza capacidades operativas entre 0.314 m^3/s y 0.376 m^3/s, superiores al caudal máximo de diseño de 0.250 m^3/s, representando una capacidad adicional aproximada de 50.4 %. Asimismo, el presupuesto consolidado de la propuesta asciende a USD 2 904 794.90.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda al área de drenaje y planeamiento de la Compañía Minera Antapaccay considerar la actualización periódica de los registros de caudal de infiltración y escorrentía en el fondo del Tajo Sur, especialmente durante periodos de mayor precipitación, con la finalidad de contar con información hidráulica actualizada que permita validar los parámetros utilizados en el diseño del sistema de bombeo progresivo.
- Se recomienda al área de ingeniería y planeamiento minero tomar como referencia la configuración hidráulica propuesta en el presente estudio, particularmente en lo relacionado con la ubicación de pozas intermedias y la distribución de tramos de bombeo, a fin de facilitar la evaluación técnica de alternativas de drenaje en etapas futuras de profundización del tajo.
- Se recomienda al área de operaciones y mantenimiento realizar revisiones periódicas del estado operativo de las bombas, tuberías de impulsión y estructuras de captación de agua, con el propósito de asegurar un adecuado funcionamiento del sistema de drenaje y prevenir posibles pérdidas de eficiencia hidráulica durante la operación.
- Se recomienda a las áreas técnicas relacionadas con la gestión del drenaje en mina considerar los resultados del presente estudio como una referencia técnica para la planificación del manejo de aguas en el Tajo Sur, debido a que el sistema de bombeo progresivo propuesto permite mejorar la capacidad de evacuación de agua y contribuir a la continuidad operativa de las actividades de minado.

BIBLIOGRAFÍA

Barreto, C. (2017). Optimización del sistema de bombeo – construcción y drenaje – Unidad Minera Antapaccay [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio institucional disponible en https://repositorio.unsa.edu.pe/items/4301573e-0f9d-4f16-b1b0-1da5971439ca

Cansaya Vara, F. E. (2017). Diseño e implementación del sistema de drenaje para mejorar el sistema de acarreo de mineral en la mina Antapaccay–2016 [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNA-Puno. https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/20.500.14082/3884/1/Cansaya_Vara_Fleming_Euler.pdf

Colindustria S. A. S. (2019). ¿Qué es RDE / SDR en tubería de polietileno? https://colindustria.com/que-es-rde/

Compañía Minera Antapaccay S.A. (2024). Segunda Modificación del Estudio de Impacto Ambiental detallado (MEIA): Capítulo 1. Resumen ejecutivo (Rev. 0). Documento institucional presentado al SENACE.

Del Carpio, H. (s. f.). Operaciones mineras [Ponencia]. En Foro TIS – PERUMIN 35. https://perumin.com/perumin35/public/uploads/shares/perumin35/media/04.Conferencias/Foro_TIS/TT_FORO_TIS/Trabajos%20T%C3%A9cnicos%20-%20Foro%20TIS/Trabajos%20en%20PDF/Mi%C3%A9rcoles/Hebert%20del%20Carpio/7.%20TT-227%20Operaciones%20Mineras.pdf

Fajardo, S. (s. f.). Figura 1. Ilustración de las partes de una bomba centrífuga (Adaptación de Warren et al., 2007) [Figura]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Ilustracion-de-las-partes-de-una-bomba-centrifuga-Adaptacion-de-Warren-et-al_fig3_330937488

Geomating Ingeniería. (s. f.). Detección de fugas en geomembrana mediante métodos geoeléctricos en el Perú. http://geomatingenieria.com/Articulo/Deteccion-de-Fugas-en-Geomembrana-Mediante-Metodos-Geoelectricos-en-Peru

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Jordán, L. S., Sánchez, E., Acebedo, M., & Lázaro, M. C. (2014). Controles estructurales en el distrito minero de Tintaya. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, 109, 67–72. https://www.sgp.org.pe/boletin/109/067-072.pdf

Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2016). Pump handbook (4th ed.). McGraw-Hill Education. https://accessengineeringlibrary.mhprofessional.com/content/book/9780071810331

Mamani Mara, J. S. (2019). Mitigación de áreas afectadas por la minería a tajo abierto Antapaccay [Examen de suficiencia profesional, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional UNA-Puno.

Ortíz Ramírez, G. E. (2014). Diseño e implementación del sistema de bombeo principal del sector A – mina Calenturitas, propiedad de C. I. Prodeco S. A., La Loma, Cesar [Proyecto de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Repositorio institucional disponible en http://repositorio.uptc.edu.co

Rodríguez Malaver, J. V. (2019). Estudio geotécnico para tajo, Proyecto Coroccohuayco – Cusco – Perú [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis UNMSM. https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/10555

Sandoval Erazo, W. R. (s. f.). Figura 18. Sistema de bombeo del ejemplo 1.3 [Figura]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/Figura-18-Sistema-de-Bombeo-del-Ejemplo-13_fig2_341165763

Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). Advanced water distribution modeling and management. Haestad Press. https://www.worldcat.org/oclc/50255620

Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). Mine water: Hydrology, pollution, remediation. Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0610-1

ANEXOS

ANEXO 1:

ÁREA DE ESTUDIO DE LA INVESTIGACIÓN

Ubicación

El área de estudio se localiza en el sur del Perú, en el distrito de Yauri, provincia de Espinar, departamento del Cusco, dentro del ámbito de operaciones de la Compañía Minera Antapaccay. La investigación se desarrolla específicamente en el Tajo Sur – Fase 8, correspondiente a una operación minera a tajo abierto, situada a una altitud aproximada de 4100 m s.n.m., en un entorno característico de la zona altoandina del sur peruano.

Desde el punto de vista hidrográfico y operativo, el área se emplaza en la subcuenca del río Cañipia, donde la presencia de aguas subterráneas y precipitaciones estacionales influye directamente en la acumulación de agua en el fondo del tajo. Estas condiciones geográficas e hidrogeológicas constituyen un factor determinante para el diseño y evaluación del sistema de bombeo progresivo planteado en la presente investigación.

Tabla 40

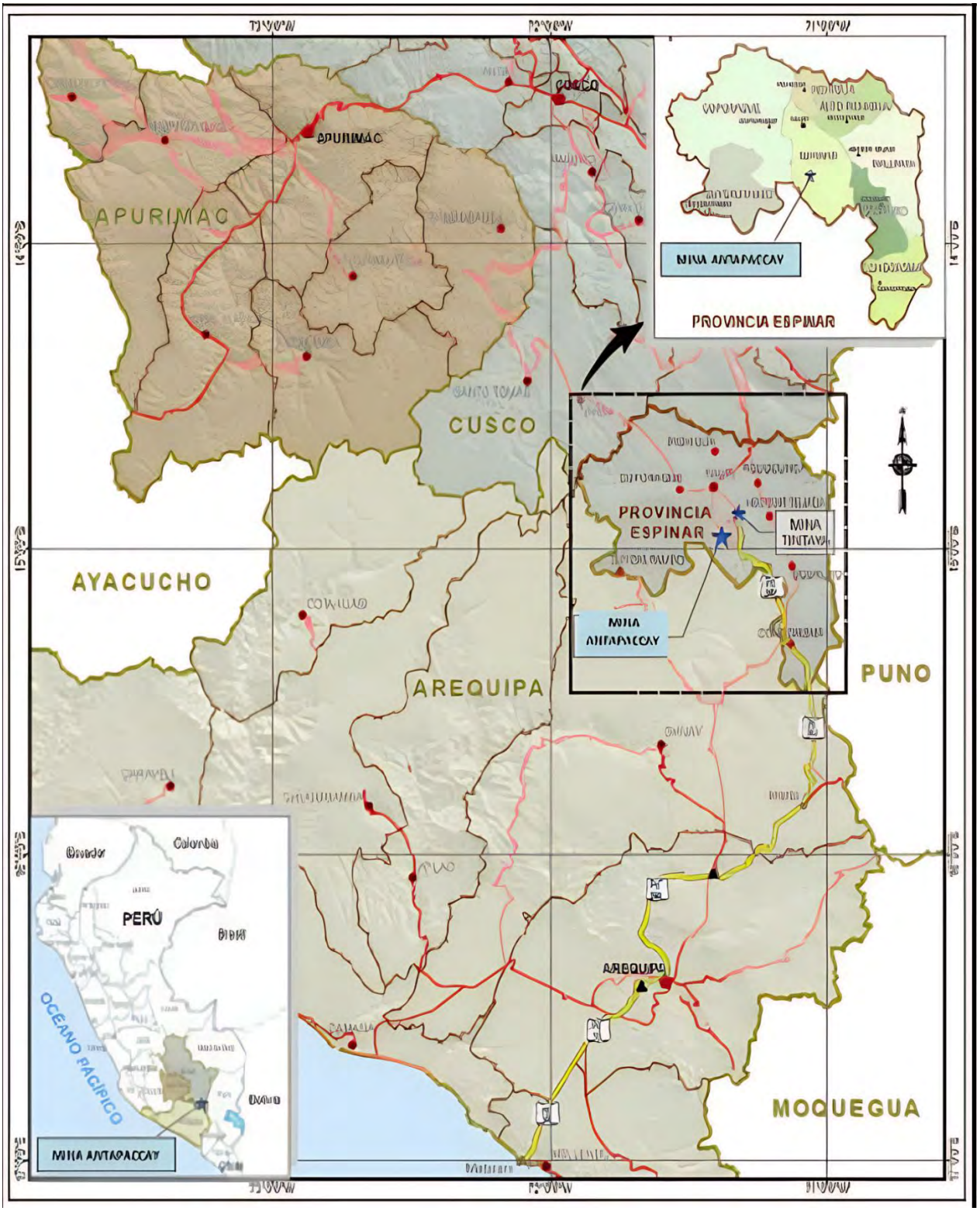
Coordenadas de las principales áreas de la Unidad Minera Antapaccay

Área operativa	Zona UTM	Este (m)	Norte (m)
Tajo Sur	19 S	240 800	8 336 800
Tajo Norte	19 S	241 800	8 337 900
Relavera Tintaya	19 S	243 600	8 341 200

Nota. SENACE (2016)

Figura 36

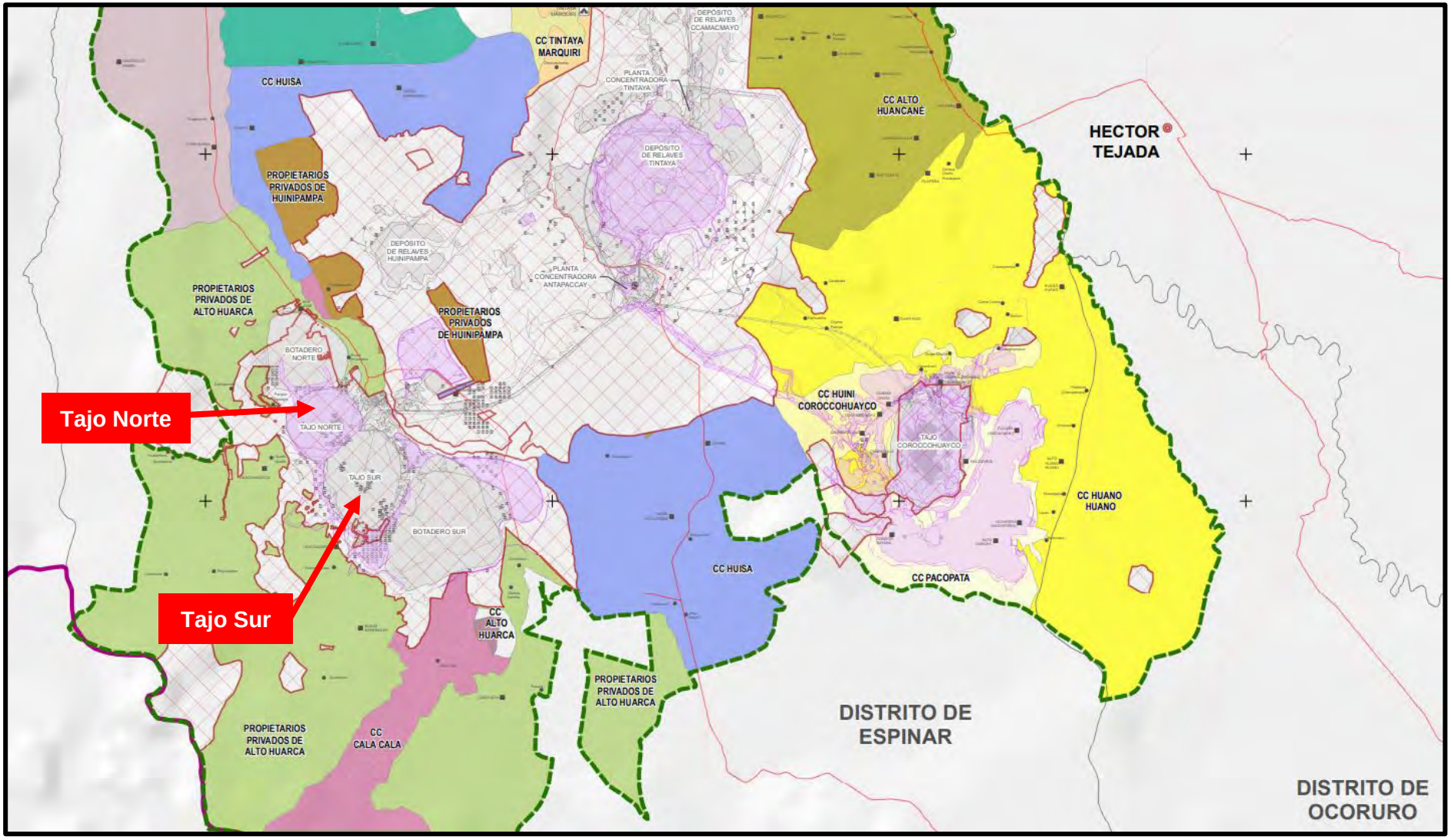
Ubicación de operaciones de CM Antapaccay



Nota. Compañía Minera Tintaya

Figura 37

Ubicación de las operaciones Tajo Sur y Tajo Norte de la CM Antapaccay



Nota. Compañía Minera Antapaccay

Accesibilidad

El acceso al Tajo Sur de la Unidad Minera Antapaccay se realiza principalmente desde la ciudad del Cusco, siguiendo la ruta Cusco – Sicuani – Yauri, a través de una carretera asfaltada en condiciones operativas adecuadas. El tiempo promedio de viaje desde la ciudad del Cusco hasta Sicuani es de 2.5 a 3 horas, continuando luego desde Sicuani hasta la ciudad de Yauri con un tiempo aproximado de 3 a 4 horas, totalizando un tiempo de viaje estimado de 6 a 7 horas para llegar a la provincia de Espinar.

Desde la ciudad de Yauri, el acceso al Tajo Sur se efectúa mediante una carretera afirmada y vías internas de operación minera, con un recorrido aproximado de 15 km y un tiempo adicional de 30 a 45 minutos. Estas vías permiten el tránsito de equipos pesados y personal operativo; sin embargo, durante la época de lluvias, las condiciones de accesibilidad pueden verse temporalmente afectadas, situación que es considerada en la planificación de las labores mineras y en el diseño del sistema de drenaje y bombeo.

Tabla 41

Accesibilidad al Tajo Sur de la Unidad Minera Antapaccay

Tramo de acceso	Origen – Destino	Tipo de vía	Distancia aproximada	Tiempo promedio
Tramo 1	Cusco – Sicuani	Carretera asfaltada	135 km	2.5 – 3 h
Tramo 2	Sicuani – Yauri	Carretera asfaltada	121 km	3 – 4 h
Tramo 3	Yauri – Tajo Sur	Carretera afirmada / vía minera	15 km	0.5 – 0.75 h

Nota. Elaboración Propia

Clima

La Compañía Minera Antapaccay presenta un régimen climático altoandino y estacional, con precipitaciones concentradas principalmente entre los meses de enero y marzo, periodo en el cual se incrementa la escorrentía superficial y la recarga de aguas subterráneas, influyendo directamente en la acumulación de agua en los tajos. Las temperaturas promedio anuales oscilan entre 2 °C y 12 °C, registrándose valores mínimos cercanos o inferiores a 0 °C durante la noche

en la época seca, condiciones que deben ser consideradas en el diseño y operación de los sistemas de drenaje y bombeo de la unidad minera.

Hidrología

La Compañía Minera Antapaccay se emplaza dentro de la subcuenca del río Cañipia, donde el régimen hidrológico está controlado por la estacionalidad de las precipitaciones y la presencia de aportes subterráneos. Durante la época lluviosa se incrementa el escurrimiento superficial proveniente de quebradas y zonas de drenaje natural, mientras que los aportes de aguas subterráneas se mantienen a lo largo del año, influyendo de manera permanente en la acumulación de agua en los tajos a cielo abierto. Estas condiciones hidrológicas constituyen un factor crítico para el diseño, dimensionamiento y operación de los sistemas de drenaje y bombeo implementados en la unidad minera.

Topografía y Relieve

La Compañía Minera Antapaccay se caracteriza por un relieve accidentado y de alta montaña, con pendientes moderadas a fuertes y una topografía irregular propia de la zona altoandina. La configuración del terreno presenta laderas, quebradas y depresiones naturales que condicionan el escurrimiento superficial y la concentración de aguas hacia las zonas más bajas de las áreas operativas, particularmente en los tajos a cielo abierto. Estas características topográficas influyen directamente en el trazado de las rutas de drenaje, la ubicación de pozas y el diseño de los sistemas de bombeo, siendo determinantes para garantizar la estabilidad del terreno y la eficiencia en la evacuación de aguas.

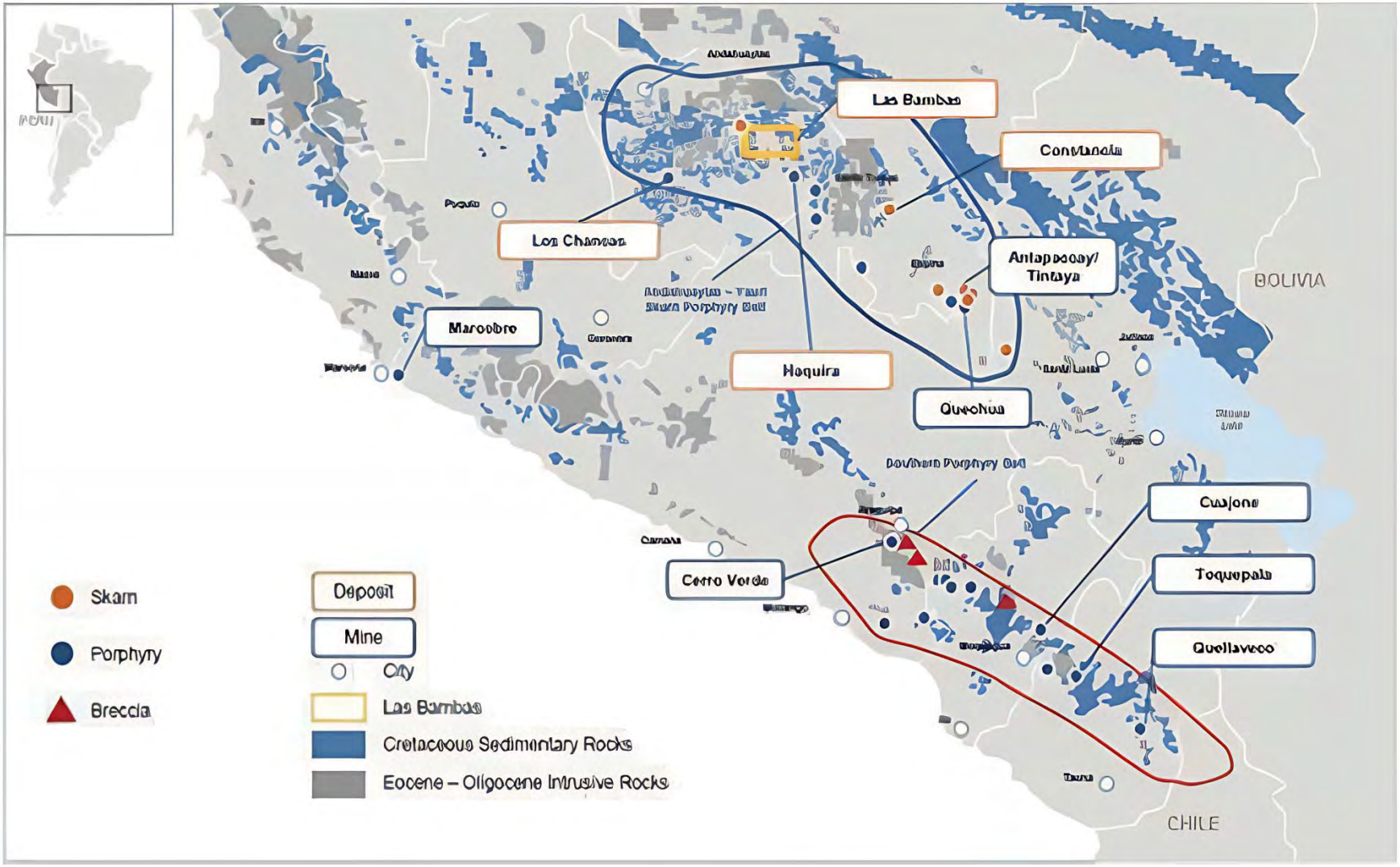
Geología del Área de Estudio

El área de estudio se emplaza dentro de un entorno geológico complejo, definido por la interacción de procesos magmáticos, sedimentarios y tectónicos asociados al cinturón metalogenético Andahuaylas–Yauri. Este marco geológico ha condicionado la geometría del cuerpo mineralizado, la disposición de las unidades litológicas y el desarrollo de estructuras que influyen directamente en el comportamiento geomecánico e hidrogeológico del macizo rocoso,

aspectos relevantes para el diseño y operación de la explotación minera desarrollada en el Tajo Sur.

Figura 38

Plano de Franja Eocena-Oligocena del cinturón Andahuaylas-Yauri



Nota. Área de Geología - CM Antapaccay

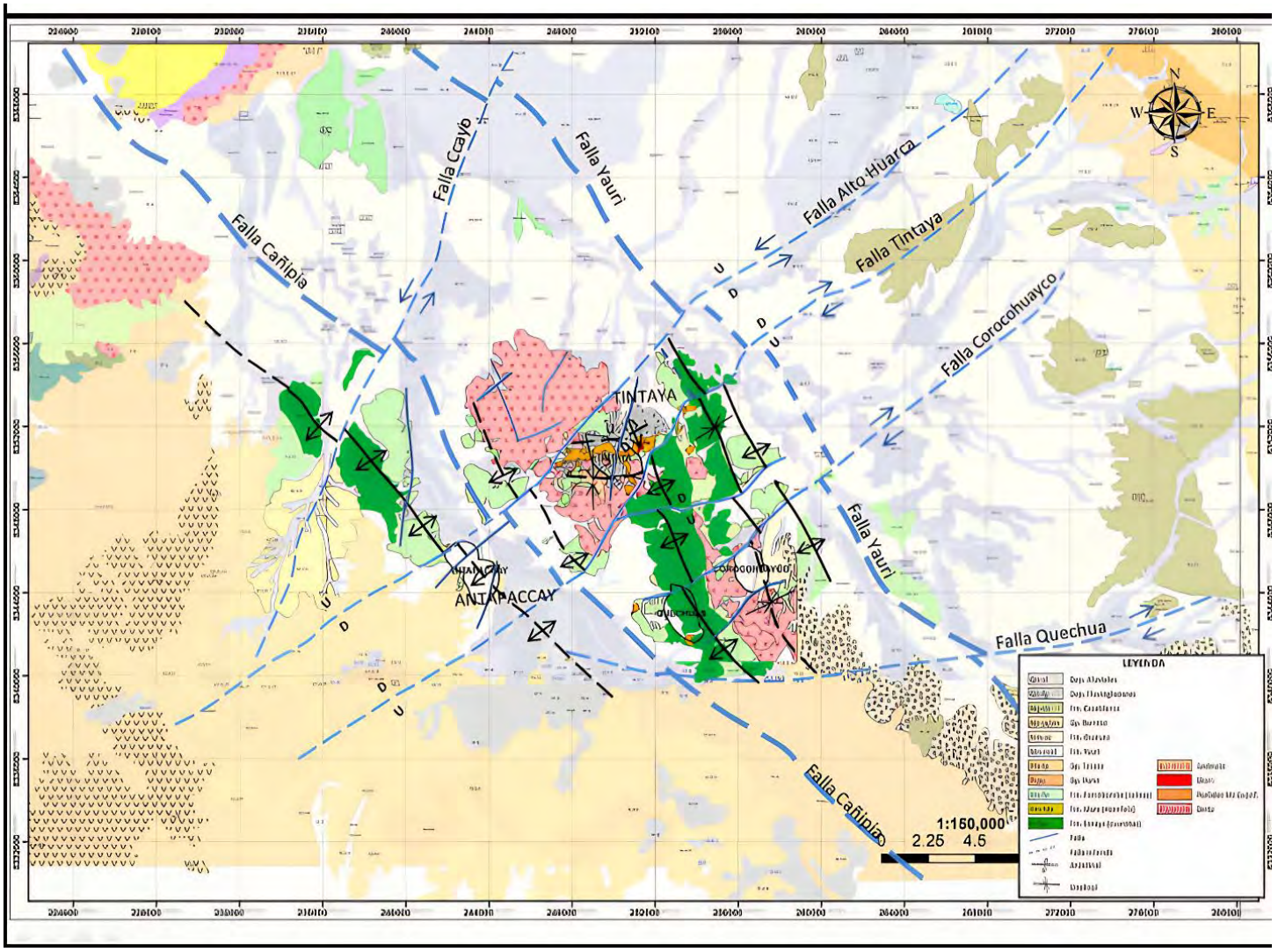
Geología Regional

A escala regional, el área de estudio forma parte de la franja metalogenética Eocena–Oligocena del cinturón Andahuaylas–Yauri, reconocida por albergar importantes depósitos de cobre del tipo pórfido y skarn en el sur del Perú. Esta franja se desarrolló sobre una corteza continental engrosada y estuvo asociada a un intenso magmatismo paleógeno, favorecido por un régimen tectónico de transición entre diferentes estilos de subducción.

Geológicamente, la región está conformada por una potente secuencia de rocas sedimentarias cretácicas deformadas durante la orogenia andina, las cuales fueron posteriormente intruidas por numerosos cuerpos ígneos pertenecientes al Batolito Andahuaylas–Yauri. Estas unidades constituyen el marco geológico regional sobre el cual se emplaza el yacimiento Antapaccay y, en particular, el sector correspondiente al Tajo Sur.

Figura 39

Plano geológico---estructural del distrito minero de Tintaya



Nota. A. Maldonado (2006) e INGEMMET.

Geología local

A nivel local, la mineralización del área de estudio se encuentra asociada principalmente a cuerpos intrusivos de composición intermedia que intruyen rocas sedimentarias carbonatadas, dando lugar a un sistema mineralizado del tipo pórfido–skarn de Cu–Ag–Au. La geometría del yacimiento presenta una elongación preferencial con variaciones laterales y verticales, lo que ha condicionado el desarrollo de la explotación a cielo abierto, siendo el Tajo Sur el principal sector de interés para la presente investigación.

La caracterización geológica local del Tajo Sur se basa principalmente en información proveniente de perforaciones diamantinas y del mapeo geológico de los frentes de explotación, debido a la limitada presencia de afloramientos superficiales. Estas observaciones han permitido identificar variaciones litológicas, estructurales y de alteración que influyen tanto en la estabilidad del macizo rocoso como en la circulación de aguas subterráneas.

Litología

La litología del Tajo Sur está dominada por rocas intrusivas intermedias, principalmente pórfidos y dioritas, que intruyen calizas pertenecientes a la Formación Ferrobamba. Estas calizas afloran de manera discontinua, restringidas a pequeños parches entre los cuerpos intrusivos. Asimismo, se reconocen extensas coberturas de tobas volcánicas de grano fino a medio, además de unidades del Grupo Maure y depósitos cuaternarios superficiales.

La heterogeneidad litológica presente en el Tajo Sur genera contrastes significativos en las propiedades geomecánicas y en la permeabilidad del macizo rocoso, favoreciendo la infiltración, almacenamiento y circulación de agua en determinados sectores, lo cual resulta relevante para la evaluación de las condiciones de drenaje.

Alteración Hidrotermal

El sistema de alteración hidrotermal presenta un zonamiento irregular, controlado por la interacción entre los cuerpos intrusivos mineralizados, las rocas encajonantes y el marco estructural existente. En el Tajo Sur, predomina una alteración potásica en las rocas intrusivas,

mientras que en las zonas de contacto con las rocas carbonatadas se desarrollan asociaciones de alteración vinculadas a la formación de skarn y stockwork.

Estas zonas alteradas suelen presentar un mayor grado de fracturamiento y permeabilidad, facilitando la circulación de fluidos y contribuyendo a la presencia de filtraciones hacia los niveles más bajos del Tajo Sur.

Mineralización

La mineralización metálica en el Tajo Sur está compuesta principalmente por calcopirita, acompañada por bornita y, en menor proporción, calcocita. Los minerales de mena se presentan en forma de diseminaciones, vetillas y brechas hidrotermales dentro de los cuerpos intrusivos, así como en zonas de contacto con rocas sedimentarias, donde se desarrollan cuerpos de exoskarn y estructuras tipo stockwork.

Las mayores concentraciones de cobre y oro se asocian a zonas con desarrollo intenso de stockwork, mientras que a mayor profundidad se observa una variación progresiva en la asociación mineralógica, reflejando cambios en las condiciones del sistema hidrotermal del Tajo Sur.

Geología Estructural

El marco estructural del área de estudio está definido por la presencia de fallas, pliegues y sistemas de fracturas asociados al cinturón Andahuaylas–Yauri. En el Tajo Sur, se reconocen orientaciones estructurales dominantes NNW–NW y N–S, vinculadas a pliegues y cabalgamientos, así como estructuras frágiles de orientación NE que actúan como zonas de debilidad.

Estas estructuras controlan la distribución de la mineralización y el grado de fracturamiento del macizo rocoso, además de constituir vías preferenciales para la circulación de aguas subterráneas, influyendo directamente en la acumulación de agua y en la estabilidad de los taludes del Tajo Sur.

Geología Económica

Desde el punto de vista de la geología económica, el Tajo Sur representa el principal sector productivo del yacimiento Antapaccay, debido a la continuidad, extensión y geometría del cuerpo mineralizado. La interacción entre litología, alteración y estructura genera zonas con mayor permeabilidad, favoreciendo la presencia de flujos de agua subterránea que deben ser gestionados adecuadamente.

En este contexto, el conocimiento detallado de la geología del Tajo Sur constituye un elemento clave para la planificación minera y para el diseño eficiente de los sistemas de drenaje y bombeo, contribuyendo a la continuidad operativa y a la seguridad de la explotación en la Compañía Minera Antapaccay.

ANEXO 2: MATRIZ DE CONSISTENCIA

<table>
<tr><th colspan="6">DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO PROGRESIVO DE LA FASE 8, DRENAJE, TAJO SUR - COMPAÑIA MINERA ANTAPACCAY-ESPINAR</th></tr>
<tr><th rowspan="2">PROBLEMA GENERAL</th><th rowspan="2">OBJETIVO</th><th rowspan="2">HIPÓTESIS</th><th>VARIABLES</th><th>DIMENSIONES E INDICADORES</th><th rowspan="2">METODOLOGÍA</th></tr>
<tr><th colspan="2">VARIABLE INDEPENDIENTE</th></tr>
<tr><td>¿Cómo debe diseñarse el sistema de bombeo progresivo para mejorar la efectividad de la evacuación de aguas acumuladas en el fondo del Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay-Espinar?</td><td>Proponer el diseño del sistema de bombeo progresivo para mejorar la efectividad de la evacuación de aguas acumuladas en el fondo del Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar.</td><td>El diseño de un sistema de bombeo progresivo, sustentado en criterios operacionales, hidráulicos y geotécnicos, permitirá desarrollar una capacidad de evacuación de hasta 0.376 m³/s, superior al caudal máximo de diseño de 0.250 m³/s, garantizando técnicamente la evacuación de las aguas acumuladas en el fondo del Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay–Espinar.</td><td>Diseño del sistema de bombeo progresivo.</td><td>Factores operacionales
• Caudal de diseño.
• Régimen de operación.
Diseño hidráulico
• Altura dinámica total (HDT).
• Pérdidas de carga.
• Diámetro de tubería.
• Potencia instalada.
• Capacidad de bombeo.
• Número de bombas.</td><td rowspan="3">Tipo: Aplicada.
Enfoque: Cuantitativo.
Nivel: Descriptivo – Propositivo.
Diseño: No experimental – transversal.

Técnicas:
• Análisis documental.
• Observación directa.
• Trabajo de campo.

Instrumentos:
• Fichas documentales.
• Registro fotográfico.
• Planos.
• Libreta de campo.

Procesamiento de datos:
• Microsoft Excel.
• AutoCAD.
• Civil 3D.
• Estadística descriptiva.</td></tr>
<tr><th>PROBLEMAS ESPECÍFICO</th><th>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</th><th>HIPÓTESIS ESPECÍFICOS</th><th colspan="2">VARIABLES DEPENDIENTES</th></tr>
<tr><td>¿Cuáles son los factores operacionales, hidráulicos y geotécnicos que influyen en el diseño del sistema de bombeo progresivo para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay-Espinar?</td><td>Determinar los factores operacionales, hidráulicos y geotécnicos que influyen en el diseño del sistema de bombeo progresivo para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay-Espinar.</td><td>Los factores operacionales, hidráulicos y geotécnicos influyen en el diseño del sistema de bombeo progresivo para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay-Espinar.</td><td rowspan="3">Efectividad de evacuación de aguas acumuladas.</td><td rowspan="3">Capacidad de evacuación
• Caudal evacuado.
• Caudal de operación.
Operatividad del sistema
• Velocidad de flujo.
• Funcionamiento hidráulico.
Capacidad de almacenamiento
• Volumen útil de pozas.
• Tiempo de almacenamiento.</td></tr>
<tr><td>¿Cuál es la configuración más adecuada del sistema de bombeo progresivo, en términos de ubicación de pozas intermedias y trazado de la línea de impulsión, para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay-Espinar?</td><td>Diseñar la configuración del sistema de bombeo progresivo considerando la ubicación de las pozas intermedias y el trazado de la línea de impulsión para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay-Espinar.</td><td>La definición adecuada de la ubicación de las pozas intermedias y del trazado de la línea de impulsión permite establecer una configuración técnicamente viable para el sistema de bombeo progresivo.</td></tr>
<tr><td>¿Cuáles son los criterios técnicos requeridos para el dimensionamiento de las pozas y la selección de los equipos de impulsión necesarios para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay-Espinar?</td><td>Establecer los criterios técnicos para el dimensionamiento de las pozas y la selección de los equipos de impulsión necesarios para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay-Espinar.</td><td>El establecimiento de criterios técnicos para el dimensionamiento de las pozas y la selección de los equipos de impulsión permite desarrollar una propuesta técnicamente sustentada para la evacuación de aguas acumuladas en el Tajo Sur, Fase 8, de la Compañía Minera Antapaccay-Espinar.</td></tr>
</table>

Nota. Elaboración Propia

ANEXO 3: REGISTRO FOTOGRÁFICO



Nota. La imagen muestra el proceso de unión de tuberías mediante termofusión, utilizado para la conformación de la línea de impulsión del sistema de drenaje. Este procedimiento permite obtener uniones continuas y herméticas entre los tramos de tubería HDPE, garantizando la resistencia mecánica y la estanqueidad requeridas para la conducción del agua en las condiciones operativas de la Compañía Minera Antapaccay. Registro fotográfico tomado durante las actividades de instalación del sistema de bombeo.



Nota. La imagen muestra una bomba sumergible Gorman-Rupp utilizada en las operaciones de drenaje de la Compañía Minera Antapaccay. Este equipo fue considerado dentro de la evaluación técnica del sistema de bombeo progresivo debido a su capacidad hidráulica y desempeño operativo en labores de evacuación de aguas acumuladas en el tajo. El registro fotográfico constituye evidencia de los equipos disponibles para la implementación de la propuesta de drenaje.



Nota. La imagen muestra bombas sumergibles Silver H-V3 utilizadas en las operaciones de drenaje de la Compañía Minera Antapaccay. Estos equipos fueron considerados en el análisis hidráulico y en la selección de equipos de bombeo debido a su capacidad de operación bajo diferentes condiciones de altura dinámica total. El registro fotográfico constituye evidencia de los equipos evaluados para la propuesta del sistema de bombeo progresivo.