

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica

Tesis

**Rediseño de la red de bombas sumergibles del nivel
190 al nivel 583 de la Mina Islay, Volcan Compañía
Minera S. A. A. - Unidad Chungar - año 2021**

Cleo Alex Alarcon Vasquez

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Mecánico

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

ASESOR

Ma. Ing. Rafael De La Cruz Casaño

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Hendel y Vibiana, a mis hermanos Abel, Ofni y Katherin, quienes me apoyan incondicionalmente, económica y emocionalmente, sin duda que sin ellos no habría logrado mis objetivos, fueron y serán los pilares de mi desarrollo profesional.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo, por brindarme una beca de estudios universitarios, para hacer realidad mis sueños y a los tutores que nos apoyan en todo momento.

A mi casa de estudios, la Universidad Continental, donde tuve años de aprendizaje, pasando días y noches enteras aprendiendo las lecciones, recibiendo cátedra de temas muy interesantes de los diferentes cursos que me formaron profesionalmente.

A la facultad de Ingeniería Mecánica, a todos los ingenieros de la facultad, en especial al ingeniero Rafael De La Cruz, quienes contribuyeron en mi desarrollo profesional, con cada lección y experiencias compartidas en clase; y a mis compañeros, quienes fueron los aliados durante todo este proceso de formación académica para cumplir nuestras metas.

A los ingenieros, supervisores y trabajadores de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar, quienes me apoyaron y dieron su confianza durante mi proceso de prácticas preprofesionales y el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Finalmente, a mis amigos, demás familiares y a todas las personas involucradas con el presente trabajo de investigación, por su apoyo y su confianza en mi persona.

DEDICATORIA

A mis padres, con mucho cariño, que con su esfuerzo hicieron posible formarme profesionalmente.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

Agradecimientos.....	iii
Dedicatoria	iv
Índice del contenido	v
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	x
Resumen.....	xii
Introducción.....	xiv
CAPÍTULO I.....	16
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	16
1.1 Planteamiento y formulación del problema.....	16
1.1.1 Planteamiento del problema	16
1.1.2 Formulación del problema.....	17
1.2 Objetivos	18
1.2.1 Objetivo general	18
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 Justificación.....	18
1.3.1 Justificación teórica.....	18
1.3.2 Justificación práctica	18
1.3.3 Justificación económica	19
1.4 Importancia.....	19
CAPÍTULO II.....	20
MARCO TEÓRICO	20
2.1 Antecedentes del problema.....	20
2.2 Bases teóricas.....	22
2.2.1 Propiedades del agua relacionadas a bombas	22
2.2.2 Ecuación de la energía	24
2.2.3 Carga de la bomba.....	26
2.2.4 Carga del sistema	29
2.2.5 Clasificación de bombas centrífugas.....	32
2.2.6 Bombas centrífugas	34
2.2.7 Mina Islay.....	39

2.2.8 Geohidráulica y bombas Hidropump	44
2.2.9 Bombas KSB WKL.....	45
2.3 Definición de términos básicos.....	46
CAPÍTULO III.....	48
METODOLOGÍA	48
3.1 Tipo de investigación.....	48
3.2 Método de la investigación	48
CAPÍTULO IV.....	50
ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.....	50
4.1. Evaluación de condiciones de operación del sistema de bombeo actual... 50	
4.1.1 Tramo 1 (Cámara de bombeo 2 a la cámara estacionaria 1).....	54
4.1.2 Tramo 2 (cámara de bombeo 3 a la cámara de bombeo 2)	55
4.1.3 Tramo 3 (cámara de bombeo 4 a la cámara de bombeo 3)	57
4.1.4 Tramo 4 (cámara de bombeo 7 a la cámara de bombeo 4)	59
4.1.5 Tramo 5 (poza de bombeo 21 a la cámara de bombeo 7)	60
4.1.6 Tramo 6 (poza de bombeo 24 a la cámara de bombeo 7)	62
4.1.7 Cámara estacionaria nivel 210.....	65
4.1.8 Cámara estacionaria del nivel 430	67
4.2 Rediseño de la red de bombas sumergibles	68
4.2.1 Configuración inicial del sistema de bombeo.	69
4.2.2 Selección de bombas.....	70
4.2.3 NPSH	78
4.3 Validación del rediseño	79
4.3.1 Evaluación operacional	79
4.3.2 Evaluación energética.....	81
4.3.3 Evaluación económica	83
4.3.4 Evaluación del ciclo de vida	87
Conclusiones.....	89
Recomendaciones.....	91
Lista de referencias	92
Anexos	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación de la presión atmosférica con respecto al nivel del mar. ...	22
Figura 2. Densidad vs. temperatura a una presión atmosférica de 0.56 atm. ...	23
Figura 3. Variación de la presión de vapor con respecto a la temperatura.	24
Figura 4. Viscosidad dinámica vs. temperatura a una presión atmosférica de 0.56 atm.....	24
Figura 5. Gráfica de un tramo de tubería	25
Figura 6. Gráfica de la ecuación de la energía.....	26
Figura 7. Sistema de tubería	26
Figura 8. Carga de la bomba añadida a la ecuación.	27
Figura 9. Esquema típico de pozas en minería	28
Figura 10. Curva característica de una bomba.....	28
Figura 11. Curva característica del sistema	29
Figura 12. Tuberías instaladas en serie	31
Figura 13. Carga del sistema de tuberías en serie.....	31
Figura 14. Tubería instalada en paralelo.....	31
Figura 15. Sistema de tuberías en paralelo.....	32
Figura 16. Criterios para clasificar las bombas.....	32
Figura 17. Clasificación primaria de las bombas.....	32
Figura 18. Clasificación de las bombas centrífugas según HI.	33
Figura 19. Clasificación de bombas en voladizo (Overhund).	33
Figura 20. Principales componentes de una bomba centrífuga.....	34
Figura 21. Partes de una bomba centrífuga.....	34
Figura 22. Potencia y eficiencia de una bomba.....	35
Figura 23. Curva del NPSH.....	36
Figura 24. Curvas características de una bomba.....	37
Figura 25. Punto de operación de la bomba.....	37
Figura 26. Variación de la velocidad de rotación de una bomba	38
Figura 27. Variación del diámetro del impulsor	38
Figura 28. Mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. - unidad Chungar	39
Figura 29. Mapa de ubicación de la mina Islay.	40

Figura 30. Diagrama unifilar esquemático del sistema de bombeo de la mina Islay.....	41
Figura 31. Cámara de bombeo estacionario 1, nivel 583 - mina Islay.....	42
Figura 32. Cámara de bombeo 7 de la mina Islay.....	43
Figura 33. Poza de sedimentación.....	43
Figura 34. Poza de sedimentación de la cámara de bombeo 7.....	44
Figura 35. Características principales de Gallardo – Hidropump.....	44
Figura 36. Características principales de Reventón – Hidropump.....	45
Figura 37. Bomba KSB – tipo WKL.....	46
Figura 38. Metodología de investigación propuesto.....	49
Figura 39. Codificación de las bombas de la mina Islay.....	51
Figura 40. Configuración de bombas del tramo 1.....	54
Figura 41. Curva del sistema vs. curva de la bomba del tramo 1.....	55
Figura 42. Configuración de tubería del tramo 2.....	56
Figura 43. Curva del sistema vs. curva de la bomba del tramo 2.....	57
Figura 44. Configuración de tuberías tramo 3.....	57
Figura 45. Curva del sistema vs. curva de la bomba del tramo 3.....	58
Figura 46. Configuración de tuberías tramo 4.....	59
Figura 47. Curva del sistema vs. curva de la bomba del tramo 4.....	60
Figura 48. Configuración de tuberías tramo 5.....	61
Figura 49. Curva del sistema vs. curva de la bomba del tramo 5.....	62
Figura 50. Configuración de tuberías del tramo 6.....	62
Figura 51. Curva del sistema vs. curva de la bomba [B18 y B19].....	63
Figura 52. Curva del sistema vs. curva de la bomba [B20 y B21].....	64
Figura 53. Configuración de tuberías de la cámara estacionaria del nivel 210.....	65
Figura 54. Curvas características de la cámara estacionaria del nivel 210.....	66
Figura 55. Configuración de tuberías de la cámara estacionaria del nivel 430.....	67
Figura 56. Curvas características de la cámara estacionaria del nivel 430.....	68
Figura 57. Propuesta inicial de sistema de bombeo.....	70
Figura 58. Cálculo de la curva del sistema (primer tramo).....	73
Figura 59. Curva del sistema vs. curva de la bomba (primer tramo).....	73
Figura 60. Curvas obtenidas de la modelación en Watercad (primer tramo) ...	74
Figura 61. Resultados de la modelación en Watercad (primer tramo).....	74
Figura 62. Cálculo de la curva del sistema (segundo tramo).....	75

Figura 63. Curva del sistema vs. curva de la bomba (segundo tramo)	76
Figura 64. Curvas obtenidas de la modelación en Watercad (segundo tramo)	76
Figura 65. Resultados de la modelación en Watercad (segundo tramo)	77
Figura 66. NPSH disponible vs. NPSH requerido.....	78
Figura 67. Resultado final rediseño del sistema de bombeo en la mina Islay ..	80
Figura 68. Variación de los costos con la implementación del proyecto	86
Figura 69. Costo del ciclo de vida de una bomba centrífuga.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Viscosidad dinámica y cinemática	24
Tabla 2. Ecuación de Darcy Weisbach y Hazen Williams	30
Tabla 3. Reglas de afinidad para variación de la velocidad y el diámetro del impulsor	39
Tabla 4. Cuadro comparativo entre mejora, rediseño y reingeniería	47
Tabla 5. Datos de las bombas y tuberías instaladas en la mina Islay	52
Tabla 6. Datos del agua en la mina Islay	53
Tabla 7. Características de las tuberías HDPE	53
Tabla 8. Carga del sistema del tramo 1	54
Tabla 9. Carga de sistema del tramo 2	56
Tabla 10. Carga del sistema tramo 3	58
Tabla 11. Carga del sistema del tramo 4	59
Tabla 12. Carga del sistema del tramo 5	61
Tabla 13. Carga del sistema de tramo 6	63
Tabla 14. Variación del caudal calculado y el caudal real	64
Tabla 15. Carga del sistema de la cámara estacionaria del nivel 210	66
Tabla 16. Carga del sistema de la cámara estacionaria del nivel 430	67
Tabla 17. Datos de las tuberías de acero utilizadas	71
Tabla 18. Datos de la tubería principal HDPE 14"	71
Tabla 19. Longitudes equivalentes para accesorios	71
Tabla 20. Carga del sistema de tuberías y accesorios (primer tramo)	72
Tabla 21. Carga del sistema de tuberías y accesorios (segundo tramo)	75
Tabla 22. Caudales obtenidos de los cálculos	77
Tabla 23. Cálculo del NPSH	78
Tabla 24. Caudal evacuado por la red de bombas sumergibles	79
Tabla 25. Caudales del sistema de bombas propuestas	80
Tabla 26. Consumo y costo de energía eléctrica del sistema de bombas sumergibles	82
Tabla 27. Consumo y costo de la energía eléctrica de sistema propuesto	82
Tabla 28. Costo de alquiler de bombas sumergibles	83
Tabla 29. Costo del sistema de bombeo propuesto	84

Tabla 30. Costo general de la implementación del sistema de bombeo propuesto	85
Tabla 31. Costo de repuestos de la bomba WKL 150/4	85
Tabla 32: Costos generales del sistema de bombeo.....	86
Tabla 33. Tiempo de recuperación de la inversión.....	87

RESUMEN

La tesis partió de la necesidad de plantear una alternativa de solución, ante deficiencias encontradas en la red de bombas sumergibles del sistema de bombeo de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar, desde la poza 24 (nivel 190) hasta la cámara de bombeo 1 (nivel 583), que presenta deficiencia en cuanto al control del agua (rebores en las pozas de bombeo, inundaciones en profundización, etc.), un problema que trae consecuencias (paralización de las labores mineras, pérdida de producción, etc.). Es un reto que afrontan los ingenieros y trabajadores en la mina Islay, la solución, una propuesta de mejora del sistema de bombeo a corto plazo que garantice un mejor control de agua.

Es por lo que se ha planteado el rediseño de la red de bombas sumergibles del nivel 190 al nivel 583 de la mina Islay, en primer lugar, se realizó un análisis de las condiciones de operación de cada una de las bombas que operan en la mina, para determinar sus puntos de operación, eficiencias de las bombas, etc. e identificar los puntos críticos del sistema. Luego, se propuso un nuevo diseño, sustentado con análisis y cálculos respectivos. Finalmente, se validó el rediseño con diferentes evaluaciones que sustentaron la propuesta.

Las 21 bombas sumergibles de 58 HP y 150 HP del nivel 190 al nivel 583, instaladas en 6 pozas de bombeo, que evacuan un caudal aproximado de 153 l/s, serán reemplazadas por 6 bombas KSB WKL 150/4, 3 de ellas instaladas en la cámara de bombeo estacionario nivel 190 con un diámetro de impulsor de 330 mm, y las otras 3 bombas instaladas en la cámara de bombeo estacionario nivel 370 con un diámetro impulsor de 360 mm, el nuevo sistema proporciona un caudal aproximado de 164.16 l/s con 4 bombas en operación y 2 bombas en *stand by* de 84.9 l/s adicionales, se planteó la implementación de 3 240 metros de tuberías HDPE de 14 pulgadas. El costo de alquiler de la red de bombas sumergibles es de US\$. 53 300 mensuales; mientras que, para implementar la propuesta, se requiere una inversión de US\$. 326 560, de ahí los costos se reducen a US\$. 30 000 mensuales para el mantenimiento de las bombas, en

cuanto al consumo de energía, se ha determinado que el nuevo diseño consumirá 630 kWh menos al día que el sistema actual, ahorrando un costo aproximado de US\$. 50 por día.

INTRODUCCIÓN

La tesis propone el rediseño de la red de bombas sumergibles del nivel 190 al nivel 583 de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar, para mejorar el sistema de bombeo (inicios del año 2021), cabe señalar, que el sistema de bombeo de la mina Islay es diseñado por ingenieros y personal experimentado, que realizan modificaciones al sistema conforme avanzan las labores, contribuyendo a la mejora continua, sin embargo, se han identificado algunas dificultades en la red de bombas sumergibles del nivel 190 al nivel 583, que si bien se puede resolver aumentando una bomba o realizando alguna modificación, pero lo que realmente se necesita es una propuesta de mejora a corto plazo, que garantice un mejor control del agua, aumente la capacidad de evacuación de agua en el interior de mina a corto plazo y reduzca los costos involucrados en el sistema de bombeo.

La evacuación de agua en minería es muy importante, para que las operaciones mineras se pueda realizar de manera adecuada, el agua que se extrae del subsuelo es un reto que afrontan la mayoría de minas subterráneas para llegar a profundizaciones donde se encuentran los minerales, para ello se hace uso de bombas de diferentes tipos e instaladas a condiciones críticas, tuberías que juegan un papel importante en el diseño, grandes distancias de bombeo, entre otros muchos factores que hacen del sistema de bombeo algo complejo, por lo tanto, se requiere de un trabajo en conjunto entre empresas contratistas especializadas en bombeo como lo es el consorcio Geohidráulica S. A. C. junto a la empresa administradora, para que el control del agua en el interior de mina siempre esté controlado.

En el capítulo I se plantea el problema y se definen los objetivos del estudio; en el capítulo II se plasman los antecedentes del problema, investigaciones relacionadas a mejora de sistema de bombeo en mina, también se redacta un marco teórico bien definido; en el capítulo III se define la metodología de investigación, además, se plantea una metodología que ayuda a seguir un procedimiento correcto al rediseño de sistema de bombeo en mina;

en el capítulo IV se realiza todo el análisis respectivo del sistema de bombeo actual, se plantea el rediseño de la red de bombas sumergibles y se valida el rediseño a través de evaluaciones que sustentan la propuesta.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

Las operaciones mineras tienen el gran reto de extraer agua del subsuelo, para que las labores mineras programadas se puedan ejecutar sin ningún problema. La existencia de aguas subterráneas depende principalmente de las fallas que presenta la superficie y las precipitaciones que se filtran a través de estas, hasta llegar a acumularse en grandes cantidades (1).

Las minas subterráneas de diferentes partes del Perú diseñan un sistema de bombeo adecuado para poder evacuar las acumulaciones de aguas, haciendo uso de variedades de bombas, tuberías y demás accesorios, seleccionados adecuadamente a través de cálculos y análisis previo de las condiciones de operación en las que trabajarán.

En la mina Islay de Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar se han identificado algunas deficiencias en la red de bombas sumergibles, del nivel 190 al 583, algunas de las bombas sumergibles tienen que ser reemplazadas cuando sufren alguna falla o pérdida de

eficiencia, en el tiempo de cambio ocurren reboses en las pozas, debido a que algunas de las pozas de bombeo no cuentan con bombas en *stand by*, ocasionando inundaciones de rampas y profundizaciones; por otro lado, un sistema de bombeo con muchas bombas ocasiona un elevado costo de alquiler y consumo de energía.

Por ello, se plantea rediseñar la red de bombas sumergibles del nivel 190 al 583, de tal manera que, se eviten problemas de reboses de las pozas, un mejor control del agua, mejorar el reemplazo y reparaciones de bombas, además, garantizar que el nuevo sistema de bombas sea económicamente conveniente a comparación del sistema del bombeo actual (inicios del año 2021).

1.1.2 Formulación del problema

Problema general

- ¿Cómo rediseñar la red de bombas sumergibles del nivel 190 al 583 de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar – 2021?

Problemas específicos

- ¿Cómo evaluar las condiciones de operación de la red de bombas sumergibles del nivel 190 al 583 de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar – 2021?
- ¿Cómo realizar el rediseño de la red de bombas sumergibles del nivel 190 al 583 de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar – 2021?
- ¿Cómo validar el rediseño de la red de bombas del nivel 190 al 583 de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar – 2021?

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Rediseñar la red de bombas sumergibles del nivel 190 al 583 de la mina Islay, Volcán Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar – 2021.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar las condiciones de operación de la red de bombas sumergibles del nivel 190 al 583 de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar – 2021.
- Realizar el rediseño de la red de bombas sumergibles del nivel 190 al 583 de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar – 2021.
- Validar el rediseño de la red de bombas del nivel 190 al 583 de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar – 2021.

1.3. Justificación

1.3.1 Justificación teórica

La teoría llevada a la práctica es posiblemente la labor que todo ingeniero debe realizar, conocimientos como diseño de estaciones de bombeo, selección de bombas, aplicados en campo como la minería y a condiciones de operación determinadas, requiere de cierto conocimiento extra que se aprende en el campo; todos los resultados de este estudio, así como los procedimientos, se utilizaron como referencia para diseñar o rediseñar sistemas de bombeo de minería ya existentes, con el objetivo de buscar la mejor eficiencia de la bombas y evitar los costos elevados de operación y mantenimiento de los sistemas de bombeo.

1.3.2 Justificación práctica

Un rediseño de red de bombas sumergibles de la mina Islay garantiza la fiabilidad de las bombas, de tal manera que, el sistema de bombeo de la mina Islay pasaría de ser un mantenimiento correctivo a mantenimiento preventivo, el equilibrio hidráulico y control del sistema garantiza a las operaciones de mina a trabajar de manera segura y cumplir las metas propuestas por la empresa.

1.3.3 Justificación económica

El rediseño, ayuda a reducir los costos destinados al sistema de bombeo de la mina Islay, según un análisis de costo de vida de una bomba realizada por Grindex, lo mayores costos son el consumo de energía con un 85%, mantenimiento un 10% y la adquisición de la bomba con tan solo un 5%; y lo más importante, un sistema de bombeo deficiente, hace que las labores se vean afectadas por la inundación, afectando directamente a la producción, que es, en definitiva, pérdida de dinero para la compañía minera (2).

1.4. Importancia

La importancia de la tesis nace en la iniciativa de proponer mejoras a diseños ya establecidos, sabiendo que estos diseños fueron realizados por profesionales expertos en el área, pero siempre hay algún proceso, etapa, diseño por mejorar, la propuesta de mejora debe considerar, según el caso, factores como tiempo, costo, presupuestos, etc.

Como profesionales de ingeniería se debe apuntar siempre a una mejora continua, de manera que se puedan hacer los procesos más simples, pero versátiles, el rediseño se enfoca en mejorar el sistema o proceso actual, partiendo de un análisis completo y detallado a una propuesta definida y sustentada.

La propuesta del presente proyecto será una alternativa de solución ante las deficiencias que se tiene actualmente en la unidad minera, se realizaron, de manera más clara posible, todos los procedimientos, cálculos y modelaciones;, para una mejor comprensión, este proyecto fue evaluado por profesionales del área antes de ser implementado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

La tesis *“Mejoramiento del sistema de bombeo para evacuación eficiente de aguas subterráneas en Volcan Compañía Minera S. A. A. - unidad San Cristóbal”* (3). Identifica un problema en el nivel 1 020, donde existen tres bombas de 750 HP instaladas en paralelo que tienen frecuentes fallas de funcionamiento, para resolver este problema, se analizó el sistema de bombeo, se identificaron las condiciones hidráulicas y de operación para proponer un nuevo sistema de bombeo. Finalmente, el estudio dio como resultado la instalación de tres bombas de 250 HP en serie para una altura de 200 metros, que proporcionarían el mismo caudal del sistema anterior, quedando para emergencia las bombas en paralelo (3).

La tesis *“Optimización del sistema de bombeo de agua subterránea, para satisfacer su demanda volumétrica, en Volcan Compañía Minera S. A. A. - unidad Chungar”* (4) nació de la necesidad de satisfacer la demanda volumétrica de agua subterránea, la metodología que utiliza es de analizar el sistema de bombeo para proponer una optimización del sistema, el resultado de la investigación es instalar un bomba en *stand by* de 150 HP que suministre el caudal necesario que demanda el sistema de bombeo de la mina Animón (4).

La tesis *“Implementación de un sistema de bombeo integral para la evacuación de aguas subterráneas en la minera Kolpa S. A.”* (5) donde, la mina tiene dos rampas de acceso, cada rampa tiene bombas instaladas en serie, el problema que tuvo la minera Kolpa S. A. es que una bomba falló en la rampa 2 del nivel 4 330, provocando la inundación de la rampa. La metodología que utilizó es evaluar el sistema anterior para proponer un nuevo sistema, como resultado del estudio se tiene la instalación de dos bombas de turbinas de 10 etapas en serie, una en operación constante y otra en *stand by* con una potencia de 500 HP cada una (5).

La tesis *“Análisis técnico-económico para la ampliación de un sistema de bombeo en el interior de una mina subterránea”* (6), tiene como objetivo principal determinar la viabilidad y factibilidad del proyecto, para ello, se determinaron los parámetros de diseño del sistema de bombeo existente, también se analizaron las condiciones hidrogeológicas de la mina. Finalmente, se determinó que era necesario una bomba de 500 HP, para una carga dinámica de 75 metros, se seleccionó la *Goulds Pump 3316* de 1 750 rpm (6).

El artículo científico *“Equilibrio hidráulico en sistemas de bombeo minero: estudio de caso”*, tiene como objetivo analizar y validar la aplicación de los métodos de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach para un sistema de bombeo minero, para un caso de estudio de un caudal de 1 350 l/s, tuberías de acero y HDPE de 16 y 18 pulgadas de diámetro respectivamente, 2 900 m de longitud de tubería y una altura geodésica de 230 m. Los resultados del estudio fueron comparados con los medidos en campo, teniendo una desviación del sistema de bombeo de 28.6% para pérdida de carga y 3.1% para la altura manométrica total (7).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Propiedades del agua relacionadas a bombas

Los fluidos son sustancias que se deforman constantemente al estar sometidos a un esfuerzo cortante, por muy pequeña que esta sea. Existen dos tipos, líquidos y gases, un líquido tiene un volumen definido a comparación de un gas que se expande o contrae dependiendo de los cambios de temperatura y presión (8).

Para la tesis se utilizó el agua como fluido de estudio, y para ello se tuvo acceso a algunas de sus características principales, la presión atmosférica varía en relación del nivel del mar, y con ello, varias de las propiedades del agua cambian, por eso es importante tenerlo en cuenta (1).

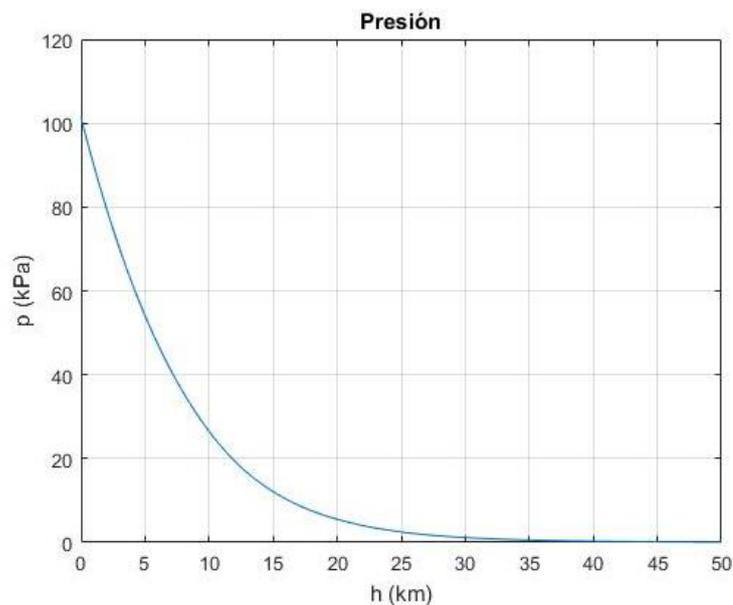


Figura 1. Variación de la presión atmosférica con respecto al nivel del mar. Tomada del Curso Interactivo de Física en Internet (9)

Densidad: es la masa de un fluido contenida en una unidad de volumen, y se representa con el símbolo " ρ ", en el Sistema Internacional está definida como (kg/m^3), en la figura 2 se muestra la variación de la densidad con la temperatura a una presión atmosférica de 0.56 atm (4615 m s. n. m.).

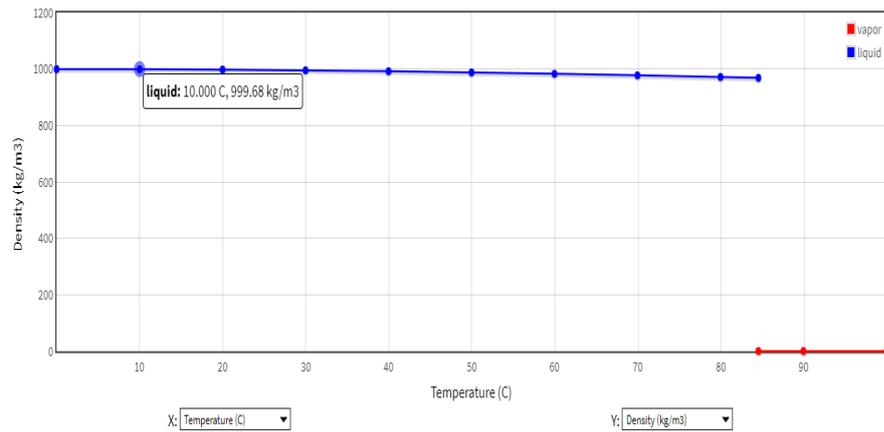


Figura 2. Densidad vs. temperatura a una presión atmosférica de 0.56 atm.
Tomada del Libro Web de Química del NIST, SRD 69 (10)
<https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

Peso específico: es el peso del fluido por unidad de volumen, se representa por el símbolo “ γ ”, en el Sistema Internacional está definida como (N/m^3), cabe precisar que el peso específico es el producto de la densidad con la aceleración de la gravedad, como se puede apreciar en la ecuación 1.

$$\gamma = \rho * g$$

Ecuación 1

Presión de vapor: es la presión absoluta a la cual un líquido se evapora a una temperatura determinada, esta propiedad es muy importante, ya que, si la presión local en un punto del fluido es menor a la presión de vapor, se formarán burbujas, esto se relaciona directamente con la cavitación en las bombas. En la figura 3 Se puede observar que a mayor temperatura se debe tener en cuenta el aumento de la presión de vapor.

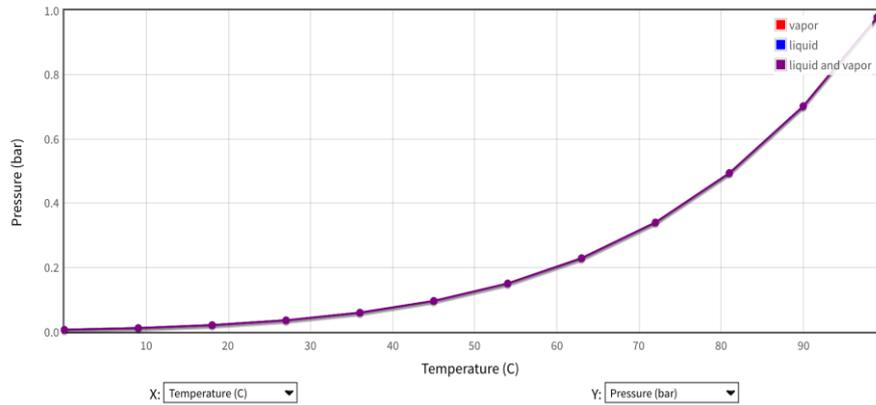


Figura 3. Variación de la presión de vapor con respecto a la temperatura. Tomada del Libro Web de Química del NIST, SRD 69 (10) <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

Viscosidad: es una propiedad que tienen los fluidos de resistirse al movimiento o flujo, existen dos tipos de viscosidad que se muestra en la tabla 1, viscosidad dinámica y cinemática; en la figura 4 se observa como varia la viscosidad dinámica con respecto a la temperatura.

Tabla 1. Viscosidad dinámica y cinemática

	Viscosidad dinámica	Viscosidad cinemática
Definición	También llamada viscosidad absoluta	Es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad
Unidades SI		

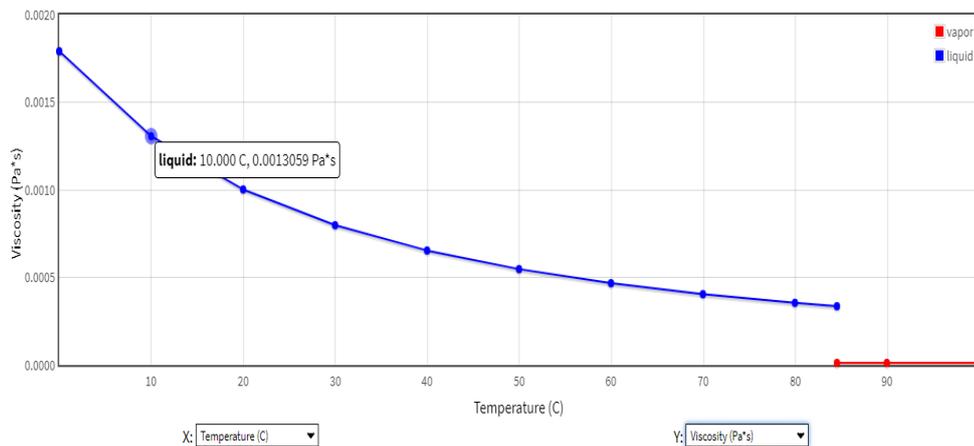


Figura 4. Viscosidad dinámica vs. temperatura a una presión atmosférica de 0.56 atm. Tomada del Libro Web de Química del NIST, SRD 69 (10) <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

2.2.2. Ecuación de la energía

Para comprender la ecuación general de la energía, se tienen que ver sus orígenes, en 1738 Daniel Bernoulli publicó el siguiente principio: “Para un flujo unidimensional, uniforme, incompresible, estacionario y sin

fricción, la suma de la energía de presión, la energía cinética y la energía por altura geodésica es constante”. Sin embargo, los fluidos reales tienen características como:

- **Tridimensionales.** Se necesitan tres coordenadas espaciales (x, y, z) para ser representados.
- **No estacionarios.** Las propiedades en un punto varían con el tiempo.
- La fricción produce pérdidas de energía por los efectos viscosos.
- La densidad del fluido puede ser variable.
- **No uniformes.** El perfil de velocidades muestra velocidades diferentes en la misma sección transversal.

El teorema de Bernoulli para fluidos ideales y sin fricción, queda definido en la ecuación 2 o ecuación 3 (Energía por unidad de peso).

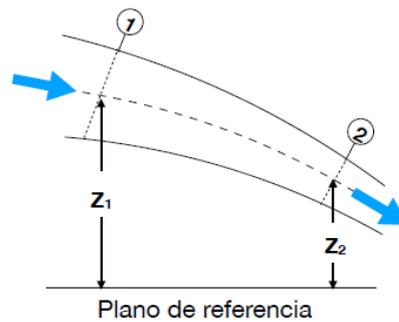


Figura 5. Gráfica de un tramo de tubería

$$p_1 + \rho * g * Z_1 + \frac{\rho * V_1^2}{2} = p_2 + \rho * g * Z_2 + \frac{\rho * V_2^2}{2} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3}$$

La ecuación de la energía para un fluido viscoso, que genera pérdidas de energía, queda definida en la ecuación 4.

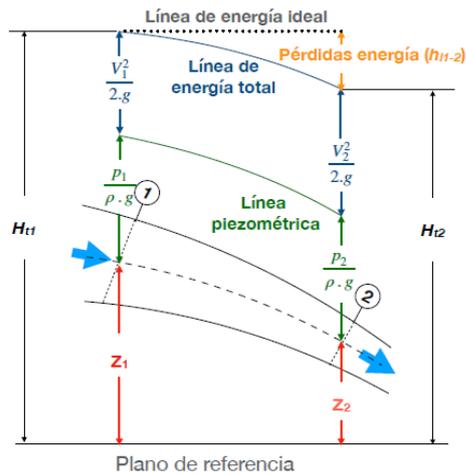


Figura 6. Gráfica de la ecuación de la energía. Tomada de PumpsBombas (11)

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g}\right) = \left(\frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}\right) + h_{l1-2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Ecuación de la continuidad

Proviene de dos grandes ecuaciones, conservación de la masa y conservación de volumen para un fluido, que es unidimensional, uniforme, estacionario, incompresible y sin fugas, la ecuación de la continuidad queda definida en la ecuación 5.

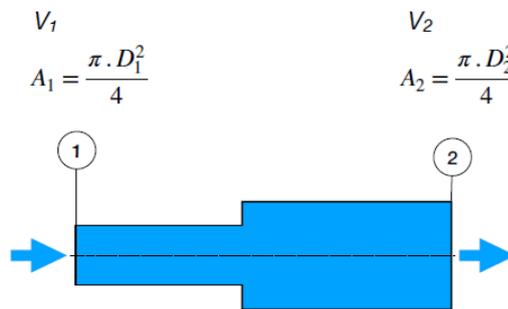


Figura 7. Sistema de tubería

$$Q = V_1 * A_1 = V_2 * A_2 = \text{constante} \quad \text{Ecuación 5}$$

2.2.3. Carga de la bomba

En un sistema típico de bombeo, ver figura 8, donde la sección 1 y sección 2, representan dos puntos cualquiera del sistema de bombeo, si se aplica la ecuación de la energía por unidad de peso para los diferentes puntos de las tuberías, existe una pérdida de energía desde la sección 1 a la sección 2, luego en ese punto, la bomba añade energía al sistema para poder transportar el líquido de un lugar a otro, denominada carga de la

bomba (H_p o H_b), por último, desde la sección d a la sección 2, se produce nuevamente un pérdida de energía. Finalmente, si se igualan los parámetros de la sección 1 y la sección 2, la ecuación de la energía para un sistema de tuberías con una bomba quedaría definida en la ecuación 6 y la ecuación 7 se puede ver despejada la carga de la bomba (H_b).

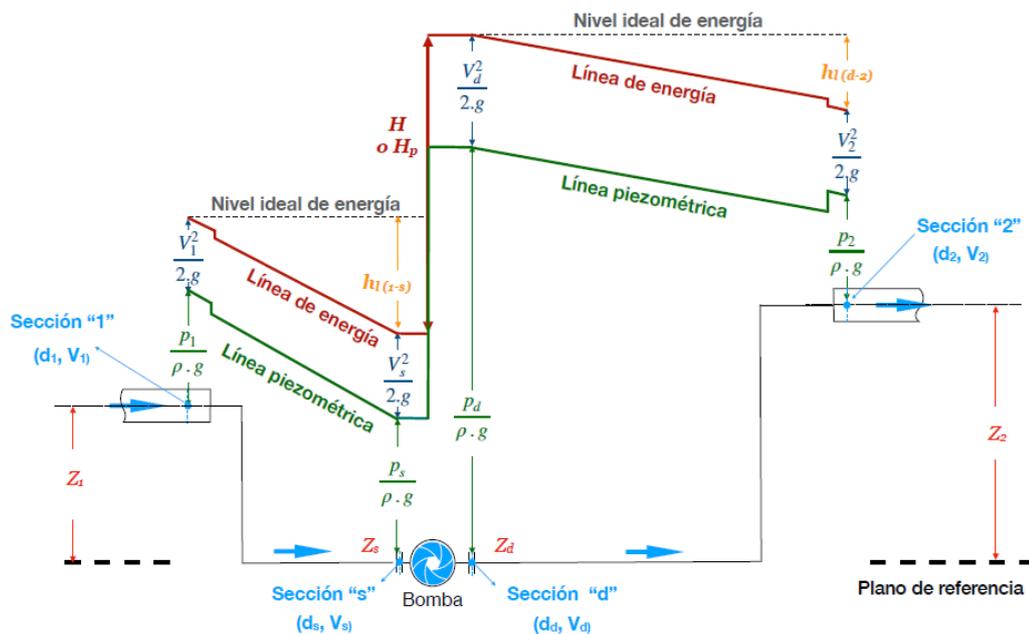


Figura 8. Carga de la bomba añadida a la ecuación. Tomada de PumpsBombas (11)

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g}\right) + H_p - h_s = \left(\frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}\right) + h_d \quad \text{Ecuación 6}$$

$$H_p = \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho g} + Z_2 - Z_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}\right) + h_d + h_s \quad \text{Ecuación 7}$$

Para un sistema de bombeo abierto, donde se transporta agua de una poza abierta a otra (no presurizadas), se eliminan las presiones (P_2 y P_1) ya que ambas tienen igual presión atmosférica.

En cuanto a velocidades, V_1 tendría la velocidad cero, debido a que las estaciones de bombeo tienen las pozas a un mismo nivel de agua, para V_2 que se encuentra en la tubería, se considera como pérdida de accesorio, por lo tanto, para un sistema, como se muestra en la figura 9, la ecuación de la energía quedaría definida en la ecuación 8.

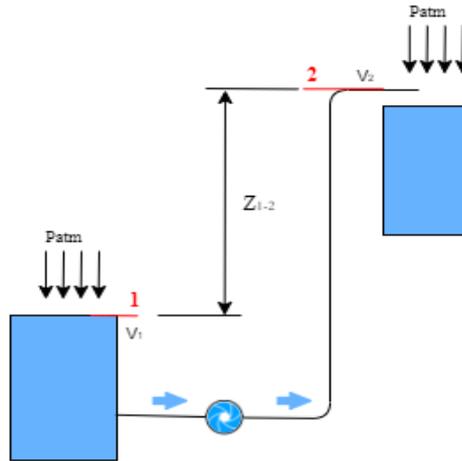


Figura 9. Esquema típico de pozas en minería

$$H_p = \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho g} + Z_2 - Z_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \right) + h_d + h_s$$

$$H_p = (Z_2 - Z_1) + h_d + h_s \quad \text{Ecuación 8}$$

La curva característica de la bomba, ver figura 10, es proporcionada por el fabricante luego de un estudio realizado a la bomba, en donde cada punto de la curva representa una forma de operación de esta, básicamente depende de la intersección con la curva del sistema, para que la bomba entregue la energía necesaria para impulsar al fluido(13).

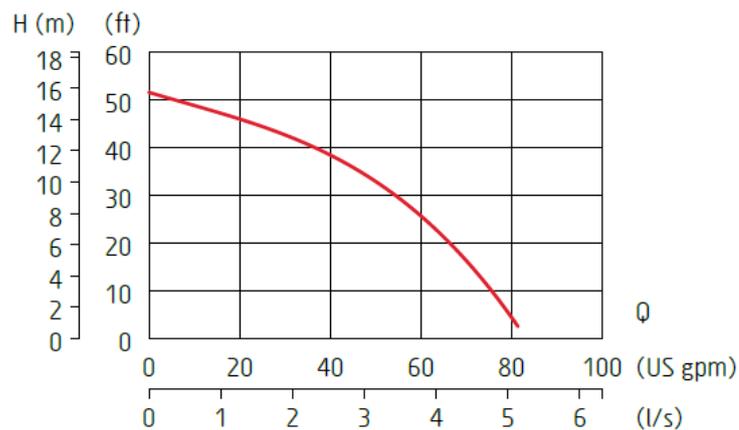


Figura 10. Curva característica de una bomba. Tomada del Manual de bombas de Grindex

2.2.4. Carga del sistema

La carga del sistema para tanques abiertos está compuesta por una altura estática, que depende de la altura de bombeo desde el nivel de la bomba hasta el nivel de descarga, y una altura dinámica variable que depende de las pérdidas que se tiene en el sistema, ver figura 11 (14).

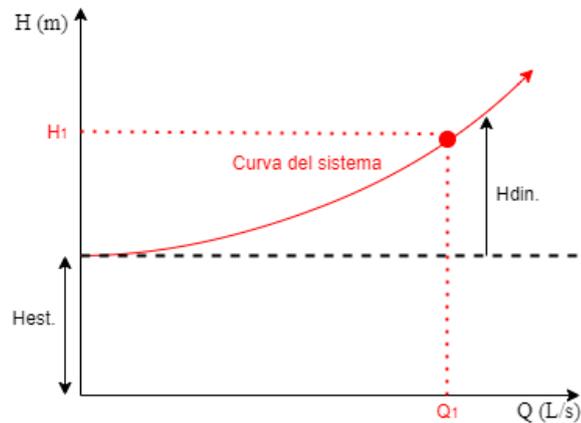


Figura 11. Curva característica del sistema

Calcular las pérdidas de energía de manera adecuada en un sistema de bombeo es muy importante para elegir una bomba correcta, las pérdidas de energía dependen básicamente de las condiciones de operación, para determinar estas pérdidas hidráulicas, se deben conocer las pérdidas provocadas por el recorrido de las tuberías y otra pérdida por los diversos accesorios que se encuentran en el sistema y que también provocan pérdidas de energía.

$$h_{totales} = h_{tubería} + h_{accesorios}$$

Ecuación 9

Pérdidas en tuberías

Existen varias ecuaciones para determinar las pérdidas del sistema de tuberías, que tienen un sustento y aplicación que lo hacen diferentes, dos de las más usadas para desarrollar los cálculos son la ecuación de Darcy Weisbach y la ecuación de Hazen Williams, las dos ecuaciones son utilizadas ampliamente a nivel mundial.

Tabla 2. Ecuación de Darcy Weisbach y Hazen Williams

Darcy Weisbach	Hazen Williams
$h =$ pérdida de carga.	$h =$ pérdida de carga
$f =$ factor de fricción	$k =$ constante
$L =$ longitud de tubería	$L =$ longitud de tubería
$D =$ diámetro de tubería	$D =$ diámetro de tubería
$V =$ velocidad	$V =$ velocidad
$g =$ aceleración por gravedad	$C =$ factor de Hazen Williams

Nota: tomada de Handbook of pumps and pumping (13)

En cuanto a la ecuación de Darcy Weisbach, existen varias fórmulas para determinar el factor de fricción, entre ellos están las ecuaciones Swamee-Jain, Haaland y Churchill, para este estudio se utilizó la Ecuación de Haaland, ya que, su aplicación es válida para régimen de transición y turbulento (12).

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{e/D}{3.7} \right)^{1.11} \right] \right\}^{-2} \quad \text{Ecuación 10}$$

Pérdidas por accesorios

Existen dos formas de calcular las pérdidas por accesorios, la primera es la más usada, donde se utiliza un factor “ k ” para cada tipo de accesorio, estos valores se encuentran en “*Flow of fluids through valves, fitting and pipes*”, “*Cameron Hydraulic Data*” y “*Centrifugal pump handbook*”, que proporcionan valores más precisos de la constante. (14)

$$h_s = k * \frac{v^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación 11}$$

La otra forma de calcular las pérdidas de energía por accesorios es utilizando una longitud equivalente para cada accesorio, que se sumará a la longitud de tubería en la ecuación de Darcy Weisbach, en el anexo 13 se muestra la figura con la que se puede determinar la longitud equivalente de los accesorios principales y, en el anexo 14, los datos tabulados.

Tuberías en serie

En la instalación de tuberías en serie, la característica principal de este modo de instalación es que el caudal permanece constante, pero las pérdidas se suman.

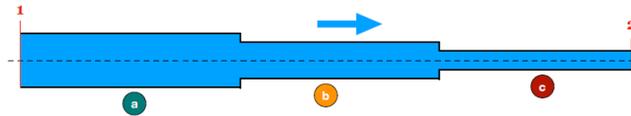


Figura 12. Tuberías instaladas en serie

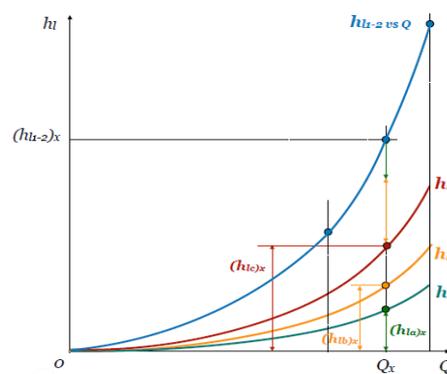


Figura 13. Carga del sistema de tuberías en serie Tomada de PumpsBombas (11)

Tuberías en paralelo

Las tuberías en paralelo se caracterizan por presentar igual cantidad de pérdidas en las tuberías, pero los caudales se suman.

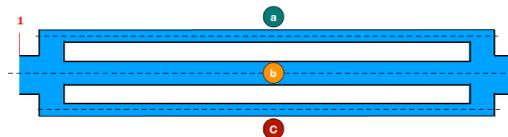


Figura 14. Tubería instalada en paralelo

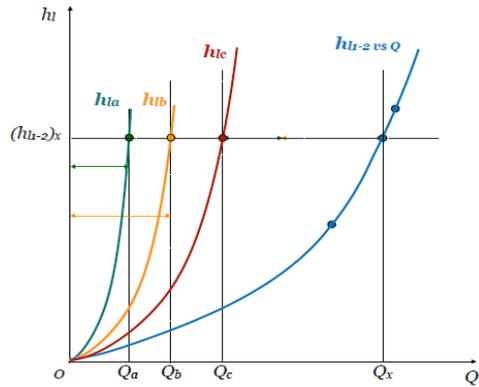


Figura 15. Sistema de tuberías en paralelo. Tomada de PumpsBombas (11)

2.2.5. Clasificación de bombas centrífugas

Existen muchos criterios para clasificar a las bombas y diferenciarlas unas de otras, entonces, en la figura 16 se pueden apreciar los principales criterios (15).

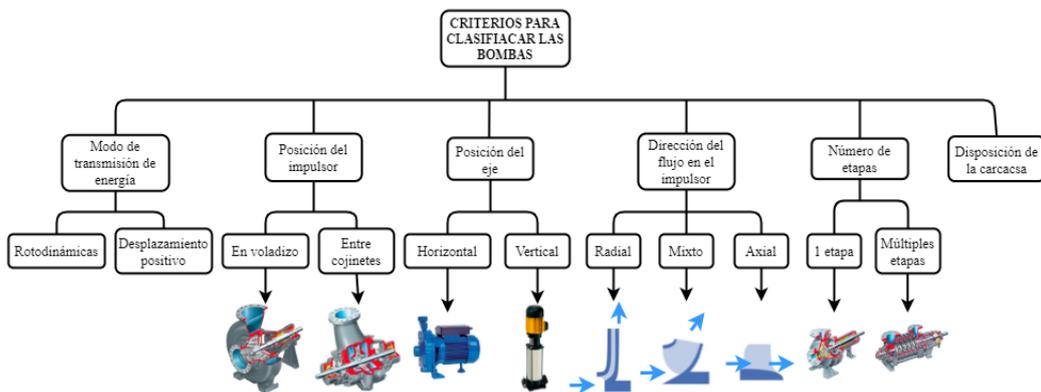


Figura 16. Criterios para clasificar las bombas. Tomada de PumpsBombas (11)

La clasificación general de las bombas las divide en dos grandes grupos que son las rotodinámicas y de desplazamiento positivo, ver figura 17 (14).

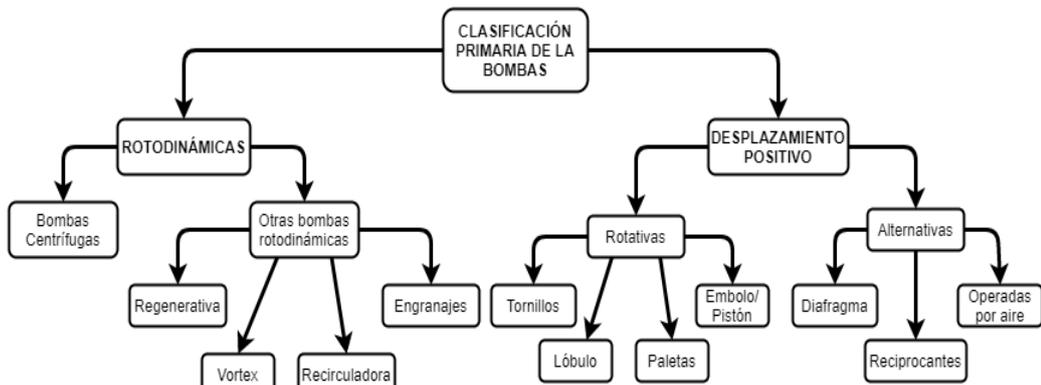


Figura 17. Clasificación primaria de las bombas. Tomada de PumpsBombas (11)

Las bombas centrífugas son las más usadas en todos los ámbitos industriales, debido a que poseen grandes ventajas y variedades, de acuerdo a las necesidades que se tengan. Para clasificar las bombas centrífugas existen normas que las definen, entre ellas esta API 610 (*American Petroleum Institute*) quien las clasifica para aplicaciones de petróleo, petroquímica e industrias del gas natural, luego está el Instituto Hidráulico (HI) que son un grupo de normas dirigidas para facilitar el entendimiento entre comprador, usuario y fabricante, clasifica a las bombas centrífugas de la siguiente manera:

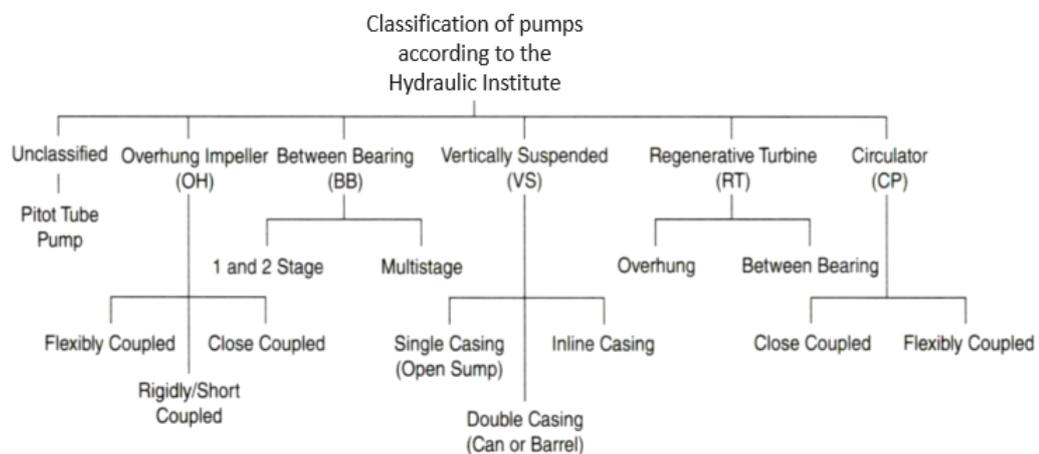


Figura 18. Clasificación de las bombas centrífugas según HI. Tomada de PumpsBombas (11)

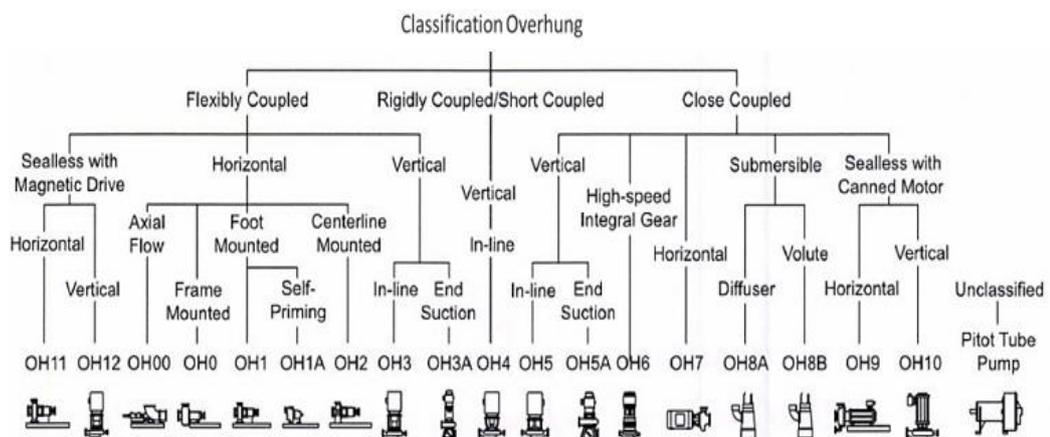


Figura 19. Clasificación de bombas en voladizo (Overhung). Tomada de PumpsBombas (11)

2.2.6. Bombas centrífugas

La bomba centrífuga es una máquina que convierte la energía mecánica en energía cinética para los fluidos, con el propósito de transportar el fluido de un lugar a otro, la bomba tiene componentes principales, ver figura 20 (16).



Figura 20. Principales componentes de una bomba centrífuga. Tomada de Zulzer/ Zulzer Ltd.

Los componentes básicos que se deben conocer de una bomba son los impulsores, haciendo que el fluido gire y sea lanzado al exterior del impulsor por la fuerza centrífuga; y la voluta tiene una forma geométrica definida, cuya función principal es disminuir la velocidad del fluido para aumentar la presión.

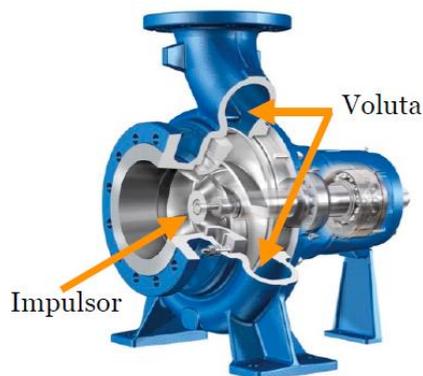


Figura 21. Partes de una bomba centrífuga. Tomada de Zulzer/ Zulzer Ltd.

Potencia y rendimiento de la bomba

La potencia requerida por la bomba es la potencia entregada por el motor a través del eje, o también llamada potencia consumida, y el rendimiento de la bomba es la relación que la bomba le transfiere al fluido y la potencia de entrada a la bomba.



Figura 22. Potencia y eficiencia de una bomba. Tomada de Zulzer/ Zulzer Ltd.

$$n = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P} \quad \text{Ecuación 12}$$

NPSH y cavitación

Cavitación significa la evaporación parcial de un líquido, cuando la presión del líquido cae por debajo de la presión de vapor, el vapor se condensa y la burbuja implota. Las desventajas de la cavitación son la disminución de la altura y rendimiento de la bomba, ruido, vibraciones y erosión en el impulsor (13).

NPSH (*Net Positive Suction Head*) o altura neta de succión positiva, son términos que se utilizan para evitar la cavitación, además de la correcta selección e instalación de la bomba (13). El NPSH requerido está en función del diseño de la bomba, es proporcionada por el fabricante, el NPSH disponible depende del sistema de succión de la bomba (17). Una bomba no cavita si el NPSH disponible es mayor que el NPSH requerido, la diferencia de estas es el margen de seguridad a la cavitación, ver figura 23.

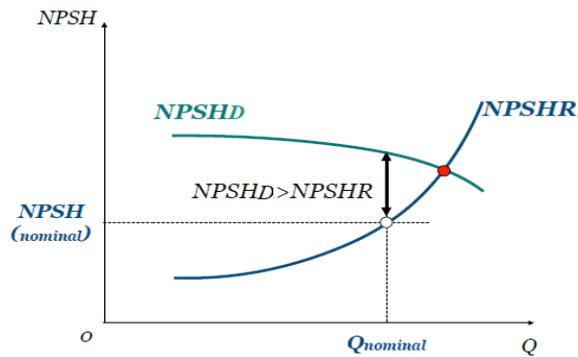


Figura 23. Curva del NPSH. Tomada de Fluidos, bombas e instalaciones industriales (19)

Para determinar el NPSH disponible hace uso de la ecuación 13, la altura de succión aparece en positivo o negativo, debido a que, en algunos diseños, el nivel del agua se encuentra por encima del eje de la bomba y en otras por debajo (18).

$$NPSH_{disponible} = H_{atm} - H_{vap} \pm h_s - h_{ps} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

H_{atm} = presión atmosférica en metros (Anexo 2)

H_{vap} = presión de vapor en metros (Anexo 3)

h_s = altura de succión (m)

h_{ps} = pérdida de carga por fricción y tubería en la succión

Curvas de las bombas centrífugas

El funcionamiento de una bomba se expresa mediante una serie de curvas de altura, potencia, eficiencia y NPSH, todas estas en función al caudal, ver figura 24, pueden estar expresadas en diferentes unidades. Los puntos de mayor eficiencia para una bomba se pueden intersecar a un caudal de máxima eficiencia (19).

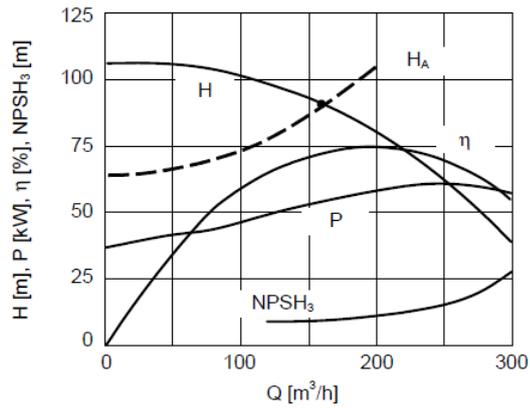


Figura 24. Curvas características de una bomba. Tomada de Sistemas de bombeo

La curva representa el comportamiento de la bomba bajo diferentes condiciones de operación, si se juntan la curva de la bomba con la curva del sistema en un mismo gráfico, se identifica el punto de operación de la bomba, ver figura 25 (20).

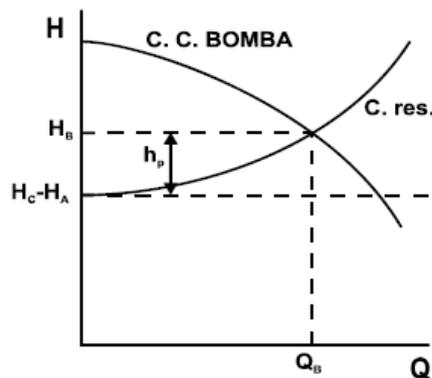


Figura 25. Punto de operación de la bomba. Tomada de Sistemas de bombeo (12)

Todas las curvas de la bomba están definidas para una velocidad de rotación del eje y un diámetro de impulsor definidos, pero si se varían estos dos factores, se obtienen curvas diferentes.

La variación de la velocidad de una bomba cambia la curva característica de esta, los fabricantes proporcionan sus curvas para diferentes velocidades estandarizadas, ver figura 26, donde son definidas por el número de polos que utiliza el motor, no obstante, se utilizan variadores de velocidad, con su uso se puede variar la curva de una bomba de acuerdo a las necesidades que se presenten, es un método

muy utilizado en aplicaciones donde se quiere que la bomba proporcione diferentes alturas y caudales (5).

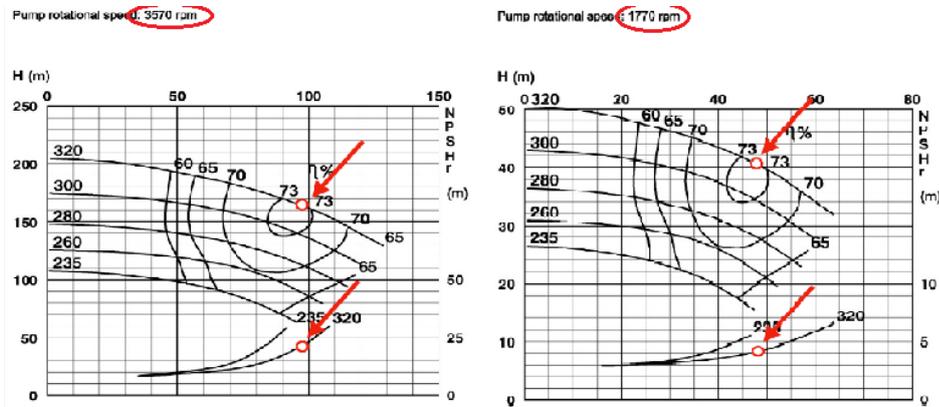


Figura 26. Variación de la velocidad de rotación de una bomba

La variación del diámetro del impulsor de una bomba cambia las curvas características de la bomba, ver figura 27, donde, para una bomba pueden existir diferentes tamaños de impulsor, mostrando diferentes propiedades. La elección correcta de un diámetro de impulsor será elegida por el diseñador de acuerdo a las necesidades, cabe precisar que, mientras más grande sea el impulsor, mayor es el coste de la bomba (11).

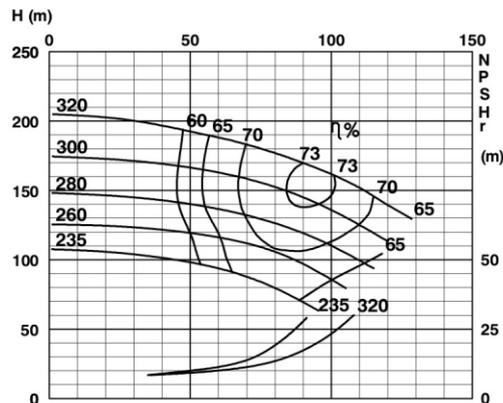


Figura 27. Variación del diámetro del impulsor

Existen reglas de afinidad que permiten el cálculo para determinar la nueva curva de una bomba variando la velocidad o el diámetro.

Tabla 3. Reglas de afinidad para variación de la velocidad y el diámetro del impulsor

Variación de la velocidad	Variación del diámetro
$\frac{Q_1}{Q_x} = \frac{n_1}{n_x}$	$\frac{Q}{Q_x} = \frac{D}{D_x}$
$\frac{H_1}{H_x} = \left(\frac{n_1}{n_x}\right)^2$	$\frac{H}{H_x} = \left(\frac{D}{D_x}\right)^2$
$\frac{P_1}{P_x} = \left(\frac{n_1}{n_x}\right)^3$	$\frac{P}{P_x} = \left(\frac{D}{D_x}\right)^3$

Nota: tomada de *Handbook of pumps and pumping* (13)

2.2.7. Mina Islay

La mina Islay, está ubicada a 4615 m s. n. m. en el departamento de Pasco pertenece a la Unidad Chungar de Volcan Compañía Minera S. A. A. uno de los mayores productores de zinc, plomo y plata a nivel mundial, la unidad Chungar está conformada por dos minas subterráneas que son Animón e Islay; y una planta concentradora con capacidad de 5500 toneladas por día. La mina Islay está ubicada debajo de una laguna y tiene una profundidad de 435 metros, desde la superficie (nivel 4 615) al tope (nivel 4 180) (13).



Figura 28. Mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. - unidad Chungar

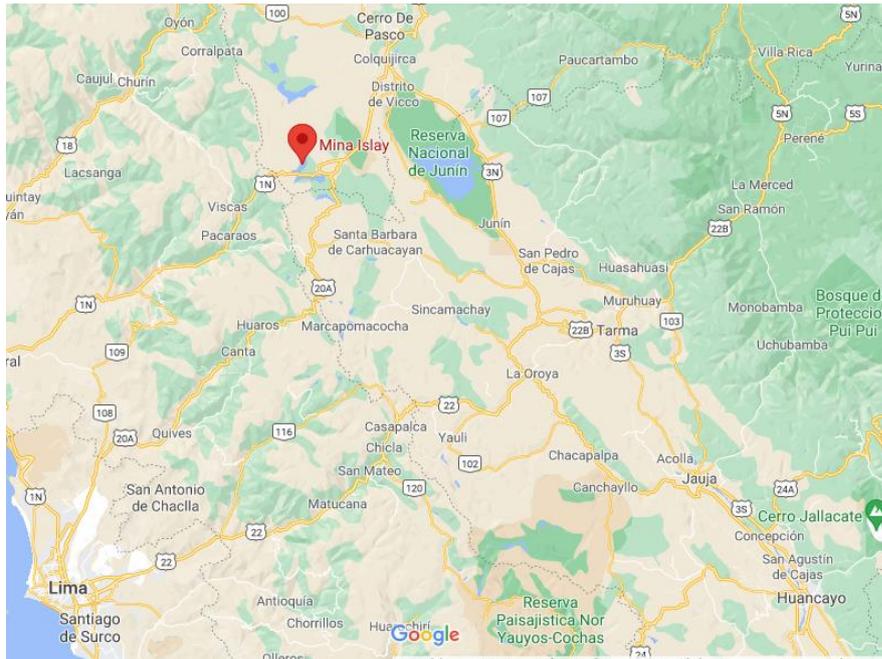


Figura 29. Mapa de ubicación de la mina Islay. Tomada de Google Maps

Sistema de bombeo de Mina Islay

Un sistema de bombeo es un conjunto de estructuras civiles, equipos, tuberías y accesorios, que toman el agua directa o indirectamente de una fuente de abastecimiento y la impulsan a un reservorio de almacenamiento para su posterior utilización. En caso de un sistema de bombeo en minería es casi lo mismo, a comparación de que, en este, la extracción del agua es el objetivo principal, para que las labores mineras puedan trabajar sin ningún impedimento (19).

De manera resumida, mientras las labores alcanzan grandes profundizaciones y se encuentre agua que impida el avance de las labores, se instalan bombas sumergibles que impulsan el agua a una poza a otra, así sucesivamente hasta sacar el agua a superficie.

Por lo tanto, el trabajo de un sistema de bombeo en minería son las 24 horas del día, de manera que el sistema debe prometer un funcionamiento óptimo para que no haya inconvenientes en cuanto a producción, en la figura 30 se puede apreciar de manera esquemática el diagrama unifilar del sistema de bombeo actual de la mina Islay (19).

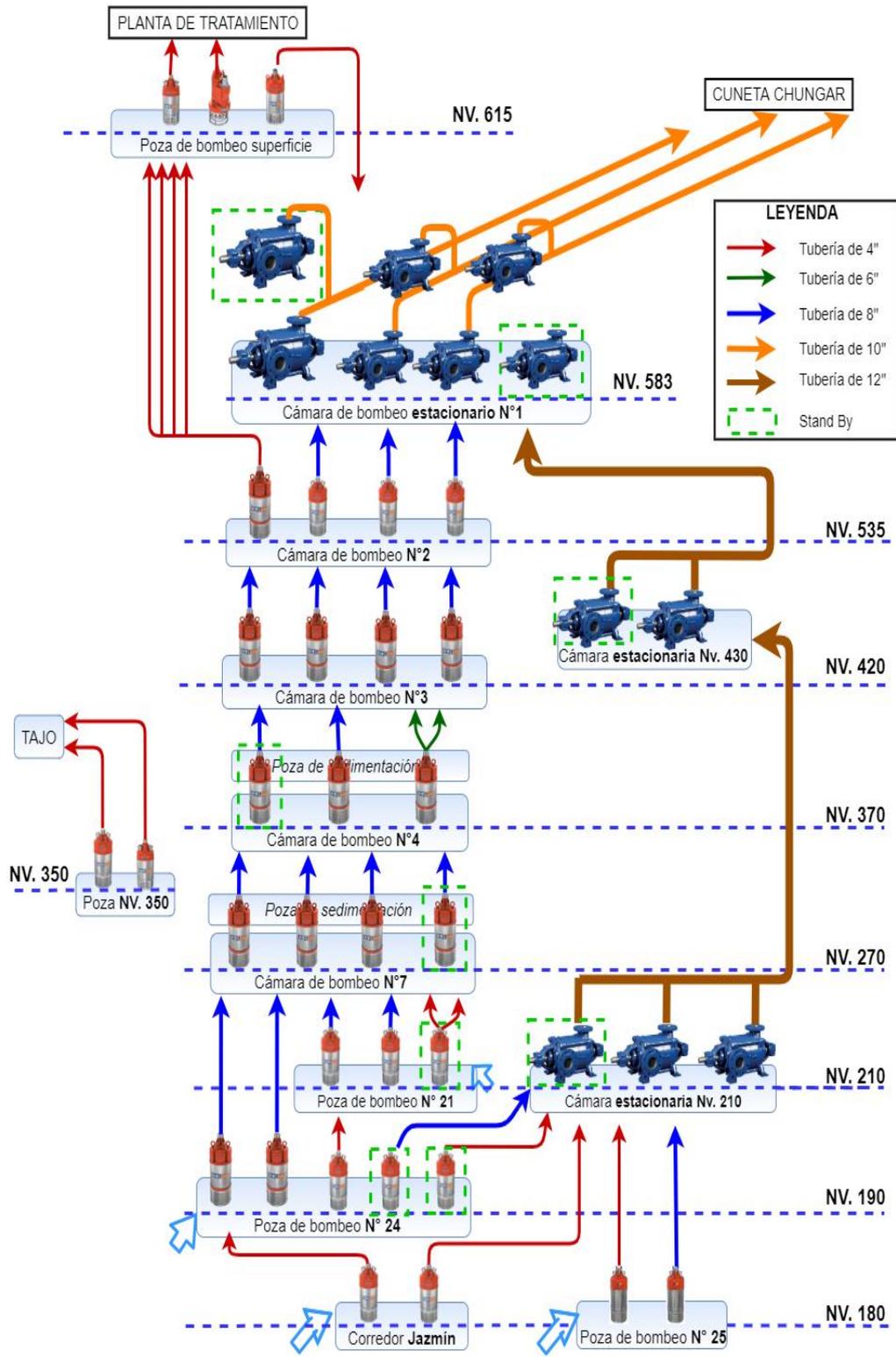


Figura 30. Diagrama unifilar esquemático del sistema de bombeo de la mina Islay. Tomada y adaptada de la base de datos de la mina Islay

Siendo el corredor Jazmín y la poza de bombeo 25 las pozas de profundización, ubicadas en el nivel 180, los topes de las labores mineras donde existen agua, alimentan a estas pozas de bombeo, con bombas de 58 HP o 15 HP, y que a partir de ahí se evacua el agua hasta llegar a superficie, en cuanto a la red de bombas estacionarias, estas han sido implementadas a mediados del año 2020, y mostraron resultados favorables, ya que, para ese entonces solo existía la red de bombas sumergibles, a excepción de la cámara de bombeo estacionaria 1 que ha sido implementada a mediados del año 2018.

Cámaras de bombeo estacionarias

Las cámaras de bombeo poseen un equipamiento estandarizado, que tiene entre sus principales componentes una poza de sedimentación, poza de succión, una bancada diseñada especialmente para la bomba, una estructura metálica que sostiene a los componentes a la salida de la bomba, espacios donde los operarios puedan verificar el buen funcionamiento de los equipos, señales de seguridad, zonas seguras, ver figura 31; la cámara de bombeo estacionaria 1 de la mina Islay, la sala de control, donde se encuentran los tableros que también forman parte de la cámara de bombeo (5).



Figura 31. Cámara de bombeo estacionario 1, nivel 583 - mina Islay

Cámara de bombeo sumergible

En las cámaras sumergibles, a comparación de una estacionaria, las bombas están dentro de la poza, deben tener una poza de sedimentación, que disminuya el porcentaje de sólidos, una estructura metálica que sostiene a la bomba mediante tecles, señales de seguridad, que permita el ingreso solo de personal autorizado, la cámara de bombeo 7 es un claro ejemplo de ello, ver figura 32 (5).



Figura 32. Cámara de bombeo 7 de la mina Islay

Poza de sedimentación

La poza de sedimentación es una poza que se antepone a la de succión, de tal manera que el agua que llega pueda disminuir su porcentaje de sólidos, utilizando solo la gravedad, esto se observa de manera esquemática en la figura 33, y su aplicación en la minería, en la figura 34.

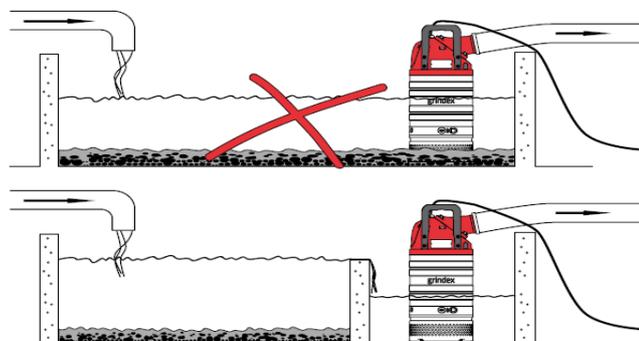


Figura 33. Poza de sedimentación. Tomada de Manual de bombas de Grindex



Figura 34. Poza de sedimentación de la cámara de bombeo 7

2.2.8. Geohidráulica y bombas Hidropump

En la actualidad la empresa contratista consorcio Geohidráulica S. A. C., es la encargada de brindar servicio de bombeo en la mina Islay, tanto del alquiler de bombas, como de proporcionar personal calificado para garantizar el funcionamiento correcto de sus bombas.

Consortio Geohidráulica S. A. C. cuenta con una amplia gama de equipos para diferentes aplicaciones como bombas para agua o lodo. En la mina Islay, Geohidráulica proporciona bombas sumergibles de la marca *Hidropump*. A continuación, se presentan algunas características de las bombas sumergibles usadas en la mina Islay.



60 Hz	N	H
Potencia, HP	58	58
Tensión V	460	460
Corriente Nominal, A	71	71
Peso, Kg	285	285
Máx. altura, mm	1303	1303
Máx. ancho, mm	509	509
Descarga, pulg.	6"	4"
Abertura de colador Ø, mm	12	12
Líquido caliente 40 °C	No	No

Figura 35. Características principales de Gallardo – Hidropump. Tomada de base de datos Geohidráulica



60 Hz	HD	ND
Potencia, HP (KW)	150(112)	150(112)
Tensión V/Fase	440/575	440/575
Corriente Nominal, A	188/118	188/118
Peso, libras (Kg)	2756(1250)	2756(1250)
Máx. altura, pulg.(mm)	69"(1750)	69"(1750)
Máx. ancho, pulg.(mm)	25"(625)	25"(625)
Descarga, pulg.	6"	8"
Abertura de colador Ø, pulg.(mm)	0.47"(12)	0.47"(12)

Figura 36. Características principales de Reventón – Hidropump. Tomada de base de datos Geohidráulica

2.2.9. Bombas KSB WKL

KSB es uno de los líderes mundiales en fabricación de bombas y válvulas, el producto principal de todas las que ofrece son las bombas centrífugas, entre ellas están las bombas sumergibles, bombas de aguas residuales y bombas de recirculación, los productos y servicios tienen diferentes aplicaciones como industria, energía y minería.

KSB Perú S. A. ofrece sus servicios y productos desde la creación de un proyecto, pasando por una selección adecuada de una bomba, hasta servicios de mantenimiento. Volcan Compañía Minera S. A. ofrece el servicio de proporcionar un producto de acuerdo a las necesidades y requerimientos de la compañía, hasta la correcta instalación, para el tema de mantenimiento la compañía se encarga de capacitar a sus trabajadores para realizar esa labor. Entonces la adquisición de una bomba KSB, vendría a ser un Capex.

La gran variedad de bombas y las múltiples modificaciones que puede entregar, convierten a KSB un aliado perfecto en el diseño de un sistema de bombeo. Las bombas WKL 150/4 y WKL 125/4 son actualmente utilizadas en la mina Islay, pues han demostrado una eficiencia considerable, ya que posee un gran rendimiento frente a otras marcas.



Figura 37. Bomba KSB – tipo WKL. Tomada de la página oficial KSB.
<https://www.ksb.com/ksb-pe/>

2.3. Definición de términos básicos

Nivel

Es la distancia de un punto con respecto al nivel del mar, en nuestro caso la superficie de la mina se encuentra a 4615 m s. n. m.; y desde ahí el nivel baja conforme avanzan las labores mineras, un dato muy importante es que, en mina omiten la cifra millar, es decir, en vez de decir 4 615 m s. n. m. solo dicen nivel 615, que simplifica los cálculos, ya que siempre se habla del nivel en la que se encuentran.

Rediseño

La palabra rediseño no está definida por la RAE, pero la inclusión del prefijo **re-** define que es el resultado de volver a diseñar algo. Sin embargo, la palabra rediseño se ha relacionado con otros términos como “*mejora*” y “*reingeniería*”; que tienen significados muy distintos. Bernhard Hitpass en su artículo “*Reingeniería, rediseño o mejora de procesos de negocio*” (18), diferencia estos términos y señala que una mejora está limitada a cambios pequeños como reglas de negocio, procedimientos locales o implementar una nueva norma; un rediseño, se refiere a realizar cambios significativos en los procesos para aumentar la eficiencia y la efectividad; y una reingeniería es un cambio radical de todo el proceso, quebrando paradigmas antiguos y procedimientos obsoletos, a continuación se muestra la diferencia de estos términos (18).

Tabla 4. Cuadro comparativo entre mejora, rediseño y reingeniería

Característica	Reingeniería	Rediseño	Mejora
Enfoque	Proceso nuevo	Reestructuración	Mejora evolutiva
Punto de partida	Proceso existente	Proceso existente	Proceso existente
Objetivo del cambio	Cambio radical, satisfacción del cliente	Rediseño de una parte del proceso	Actualización, eficiencia o satisfacción del cliente
Tipo de cambio	Radical	Estructural	Incremental
Periodicidad del cambio	Descontinuado	Intervalos intermedios	Continuo
Organización del cambio	Proyecto	Proyecto o grupo de trabajo	Dentro de operaciones
Impulsor del cambio	Directorio	Dueño de proceso	Cualquier actor
Impacto del cambio	Transversal	Proceso, subproceso	Dentro de un subproceso
	Cultural	Cultural	Cognitivo
	Procesal	Procesal	Procedimiento, regla de negocio
	Estructural	Estructural	Costo, calidad, tiempo
Riesgo	Alto	Medio	Bajo

Nota: tomada de ¿Reingeniería, rediseño o mejora de procesos de negocio? (18)

Se ha elegido este término para el título de la investigación, debido a que se realizó un cambio significativo a una parte del sistema de bombeo de la mina Islay, para aumentar la eficiencia y la efectividad de todo el sistema de bombeo.

Stand by

Tiene varios significados del inglés al español, pero el significado utilizado para la investigación es cuando se hace referencia a un objeto en *stand by*, que significa que “*el objeto está listo para lidiar o ayudar con algo*”, aquí se utiliza para referirse a objetos que se tiene de reserva, que se encuentran listos para utilizar; en este caso se utilizarán para las bombas, ya que el trabajo que realizan es constante y requiere tener reemplazos listos para ser utilizados o tenerlos por lo menos en el almacén (15).

Demanda volumétrica de agua

El significado de demanda volumétrica de agua en un sistema de bombeo no es otra cosa que el caudal que se debe de bombear, el caudal mínimo de agua que se debe de extraer de la mina es un término muy utilizado en las minas, y normalmente varía con el tiempo y no es un valor fijo.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es tecnológica. Según Sinacyt, que define como *“la aplicación de los resultados de la investigación a un diseño en particular, para la elaboración de materiales, productos, métodos, procesos o sistemas nuevos, o sustancialmente mejorados, antes del comienzo de su producción o utilización comercial”* (23). Esta definición se ajusta a la presente investigación, pues se realizó un rediseño a un tramo del sistema de bombeo de la mina Islay, para garantizar que el nuevo sistema sea técnica y económicamente conveniente (16).

3.2. Método de la investigación

Se planteó una nueva metodología de investigación, ver figura 38, en base a diferentes métodos de diseño ampliamente utilizados, comienza con identificar el problema, o proceso por mejorar; que deberá de ser detallada y bien definida, ya que es la etapa que inicia la investigación.

En la etapa de recolección de datos, los datos utilizados fueron actuales y de fuentes confiables, para realizar un mejor análisis y obtener mejores resultados.

En la etapa de evaluación de condiciones, así como, en el planteamiento de la mejora; se deben realizar todos los cálculos necesarios, comprobados, si es posible, con un software especializado, que garantice que los cálculos se han elaborado de manera correcta. Todos los demás procedimientos que se realice en esta etapa deberán realizarse de manera ordenada.

En la etapa de validación de mejora, se debe realizar en diferentes aspectos posibles, haciendo uso de evaluaciones técnicas y económicas, es la etapa donde se sabe si lo planteado, es una mejora o no en el producto y proceso en el que se intervino.

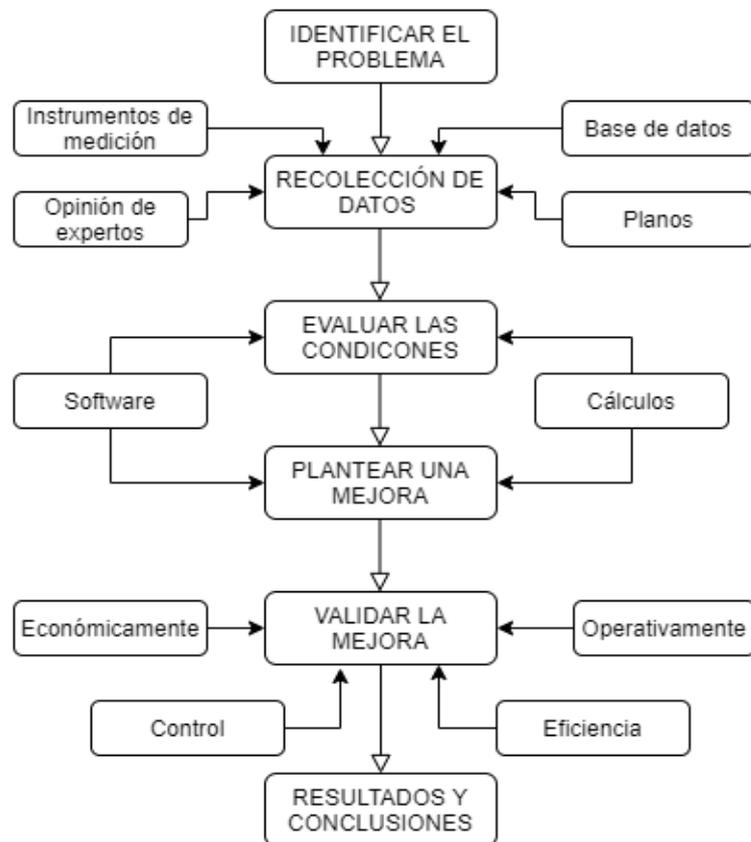


Figura 38. Metodología de investigación propuesto

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

4.1. Evaluación de las condiciones de operación del sistema de bombeo actual

Para realizar el rediseño de la red de bombas sumergibles de la mina Islay, Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar, se necesitaban conocer las condiciones de operación de cada una de las bombas. En primer lugar, se delimita el estudio codificando todas las bombas involucradas (figura 39) e identificando sus características principales de operación (tabla 5).

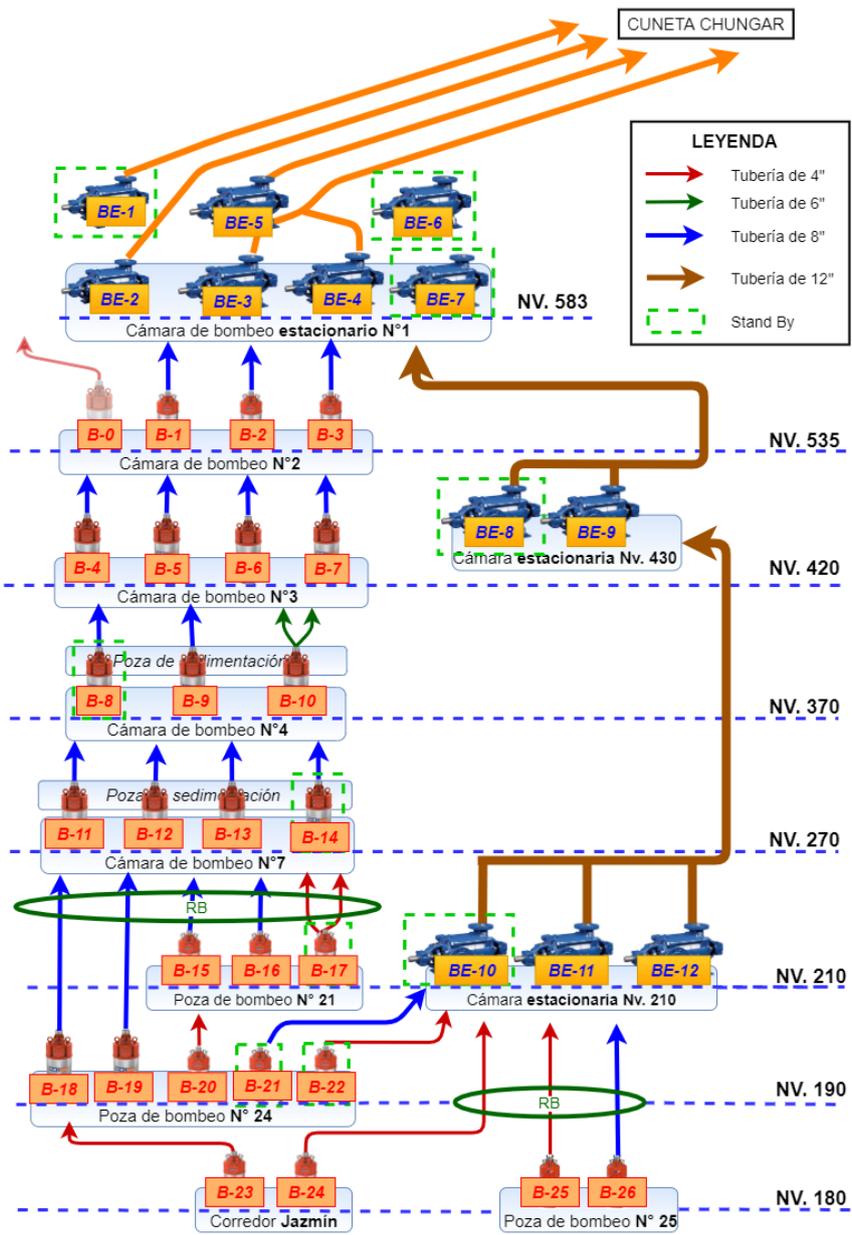


Figura 39. Codificación de las bombas de la mina Islay

Tabla 5. Datos de las bombas y tuberías instaladas en la mina Islay

CÓDIGO	MODELO	CÓDIGO EN MINA	POTENCIA (HP)	TUBERÍA			
				Altura Est. (m)	Diámetro (m)	Longitud (m)	Caudal (L/s)
Camara estacionaria N° 01 (NV. 583)							
BE-1	KSB WKL	WKL-125/4	250	40	13"	4000	0
BE-2	KSB WKL	WKL-125/4	250	40	11"	4000	41.2
BE-3	KSB WKL	WKL-150/4	400	40	18"	4000	158.5
BE-4	KSB WKL	WKL-150/4	400	40			
BE-5	KSB WKL	WKL-150/4	400	40	13"	4000	48.1
Cámara de bombeo 02 (Nv 535)							
B-0	REVENTON	GB-150H047	150	80	4LX4"	650	41.5
B-1	GALLARDO	GB-58H117	58	48	8"	530	41.5
B-2	GALLARDO	GB-58H123	58	48	8"	530	40.2
B-3	GALLARDO	GB-58H037	58	48	8"	530	39.8
Cámara estacionario Nv. 430							
BE-8	KSB WKL	WKL-150/4	400	157	12"	1500	95.2
BE-9	KSB WKL	WKL-150/4	400	157			
Cámara de bombeo 03 (NV 420)							
B-4	REVENTON	GB-150H020	150	115	8"	970	42.8
B-5	REVENTON	GB-150H108	150	115	8"	970	42.3
B-6	REVENTON	GB-150H077	150	115	8"	970	42.2
B-7	REVENTON	GB-150H052	150	115	8"	970	41.5
Cámara de bombeo 04 (NV. 370)							
B-8	REVENTON	GB-150H054	150	50	2LX6"	640	67.8
B-9	REVENTON	GB-150H105	150	50	8"	640	67.4
B-10	REVENTON	GB-150H004	150	50	8"	640	67.1
Cámara de bombeo 07 (NV. 270)							
B-11	REVENTON	GB-150H042	150	100	8"	600	54.2
B-12	REVENTON	GB-150H065	150	100	8"	600	52.1
B-13	REVENTON	GB-150H036	150	100	8"	600	51.2
B-14	REVENTON	GB-150H066	150	100	8"	600	50.2
Cámara estacionario NV. 210							
BE-10	KSB WKL	WKL-150/4	300	220			
BE-11	KSB WKL	WKL-150/4	300	220	12"	1600	95.7
BE-12	KSB WKL	WKL-150/4	300	220			
Poza de bombeo N° 21 (NV. 210)							
B-15	GALLARDO	GB-58H033	58	60	8"	350	33.5
B-16	GALLARDO	GB-58H201	58	60	8"	350	35.1
B-17	GALLARDO	GB-58H025	58	60	2LX4"	350	26.3
Poza de bombeo N° 24 (NV. 190)							
B-18	REVENTON	GB-150H021	150	80	8"	500	50.5
B-19	REVENTON	GB-150H048	150	80	8"	500	51.2
B-20	GALLARDO	GB-58H222	58	20	4"	150	30.1
B-21	GALLARDO	GB-58H087	58	20	8"	180	45.2
Corredor Jazmin (NV. 180)							
B-23	GALLARDO	GB-58H233	58	10	4"	120	40.6
B-24	GALLARDO	GB-58H235	58	33	4"	200	30.4
Poza de bombeo N° 25 (NV. 180)							
B-25	GALLARDO	GB-58H229	58	33	4"	210	31.5
B-26	GALLARDO	GB-58H257	58	33	8"	210	47.4

Nota: tomada y adaptada de la base de datos de la mina Islay

En la tabla 5 se aprecian datos muy relevantes para este estudio, como el tipo de bombas que hay instaladas en cada poza, las características de las tuberías, y un dato importante, que son los caudales reales (aforados en mina), hasta finales de enero del 2021, estos datos fueron medidos mediante un caudalímetro ultrasónico PT 900, un instrumento portátil, que mide los caudales en las tuberías sin afectar el funcionamiento del sistema.

Por otro lado, los datos del agua que se bombea en la mina Islay tienen características que son similares para todos los cálculos que se realizaron, ver tabla 6.

Tabla 6. Datos del agua en la mina Islay

DATOS DEL FLUIDO		
Temperatura	10	°C
PH		6.5
% de solidos		5 a 10
Densidad	999.68	kg/m ³
V. Dinámica	0.0013059	kg/m*s

Nota: tomada y adaptada de la base de datos de la mina Islay

Para una mejor comprensión del análisis, se realizó un análisis para cada tramo, de esta manera, se aprecia mejor el funcionamiento de cada una de las bombas, cada tramo representa un conjunto de bombas y accesorios para evacuar el agua de una poza a otra. Los datos de las tuberías como los diámetros internos reales, se tomó del manual proporcionado por los fabricantes de tuberías HDPE (anexo 8).

Tabla 7. Características de las tuberías HDPE

DATOS DE TUBERIAS												
	8 pulgadas			6 pulgadas		4 pulgadas						
D. tubería	8	in	0.203	m	6	in	0.152	m	4	in	0.102	m
D. exterior real	219.08	mm	0.219	m	168.28	mm	0.168	m	114.3	mm	0.114	m
E. de pared			19.91	mm			15.29	mm			10.39	mm
D. interno	179.26	mm	0.179	m	137.7	mm	0.138	m	93.52	mm	0.094	m
A. tubería			0.0252	m ²			0.0149	m ²			0.007	m ²
Rugosidad	0.05	mm	5E-05	m	0.05	mm	5E-05	m	0.05	mm	5E-05	m

Nota: tomada del Manual de tuberías HDPE - NICOLL

4.1.1. Tramo 1 (Cámara de bombeo 2 a la cámara estacionaria 1)

En este tramo existen tres bombas Gallardo de 58 HP tipo H, que impulsan agua hacia la cámara estacionaria 1, la bomba “B0” de 150 HP, abastece a una planta de tratamiento, esta bomba no entró al estudio, debido a que no está involucrada directamente en la evacuación de agua. En la figura 40 se detalla la configuración de las tuberías y bombas de este tramo.

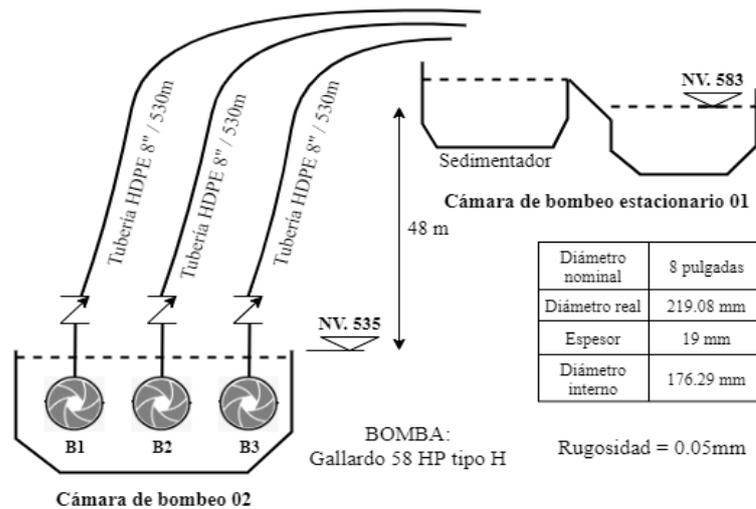


Figura 40. Configuración de bombas del tramo 1

Se aplican las fórmulas de la ecuación de la energía, ecuación de Darcy Weisbach y el factor de fricción de Haaland para diferentes caudales, y se determinó la carga del sistema de tuberías y accesorios para las bombas “B1”, “B2” y “B3”, en la misma tabla se registró la carga del sistema de la modelación en Watercad (anexo 8), donde se utilizó la ecuación de Hazen Williams.

Tabla 8. Carga del sistema del tramo 1

CAUDAL (L/s)	Velocidad (m/s)	Número de Reynols	Factor de fricción	Longitud equivalente (m)	Pérdidas totales (m)	Altura Estática (m)	Carga del sistema (m)	Carga del sistema WC (m)	Carga total del sistema WC (m)
0	0	0	0	31	0	53	53	48	53
10	0.396	54372.3	0.02122	31	0.53	53	53.53	48.68	53.68
20	0.792	108744.6	0.01886	31	1.89	53	54.89	50.46	55.46
30	1.189	163117.0	0.01782	31	4.02	53	57.02	53.22	58.22
40	1.585	217489.3	0.01721	31	6.90	53	59.90	56.90	61.90
50	1.981	271861.6	0.01681	31	10.52	53	63.52	61.45	66.45
60	2.377	326233.9	0.01653	31	14.90	53	67.90	66.86	71.86
70	2.774	380606.3	0.01631	31	20.01	53	73.01	73.09	78.09

En la figura 41 se representa la curva de la bomba Gallardo tipo H, dos curvas de carga del sistema, uno calculado manualmente utilizando la ecuación de Darcy Weisbach y el otro, los resultados de la modelación en *Watercad* utilizando la ecuación de Hazen Williams, donde existe una pequeña variación, también se añadió la curva de la eficiencia de la bomba.

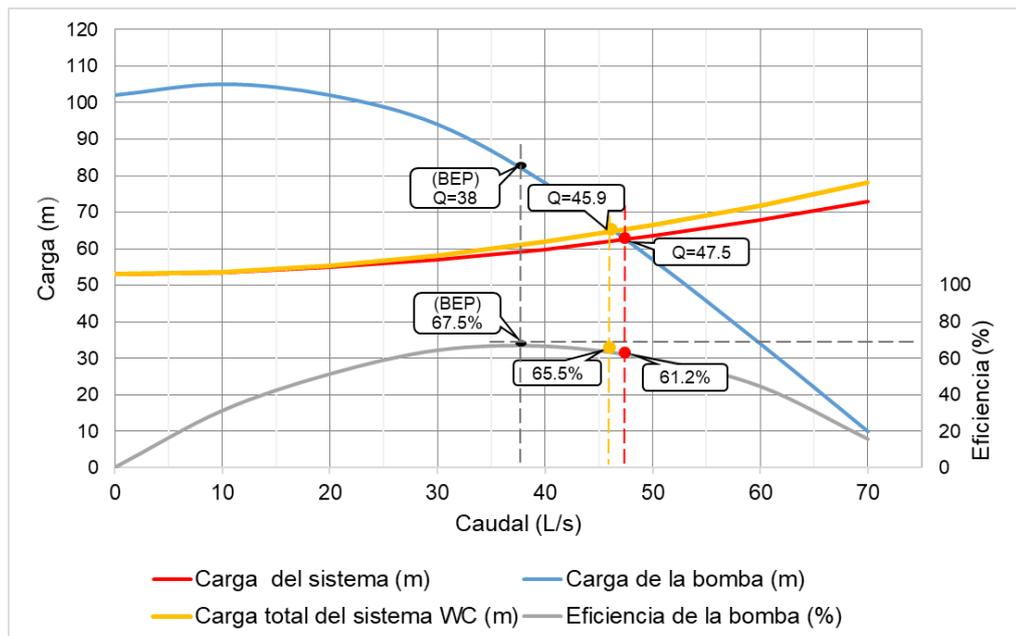


Figura 41. Curva del sistema vs. curva de la bomba del tramo 1

Se puede apreciar que la bomba opera a un caudal de 45.9 l/s con una eficiencia de 65.5%, siendo la eficiencia máxima de la bomba es 67.5% a un caudal de 38 l/s, en este tramo del sistema se concluye que la bomba está un poco alejada de su eficiencia máxima y se le identifica como un punto crítico del sistema.

4.1.2. Tramo 2 (cámara de bombeo 3 a la cámara de bombeo 2)

En este tramo operan cuatro bombas de 150 HP tipo H, que están conectadas a tuberías HDPE de 8" de diámetro y que bombean agua a una altura de 115 metros, ver figura 42.

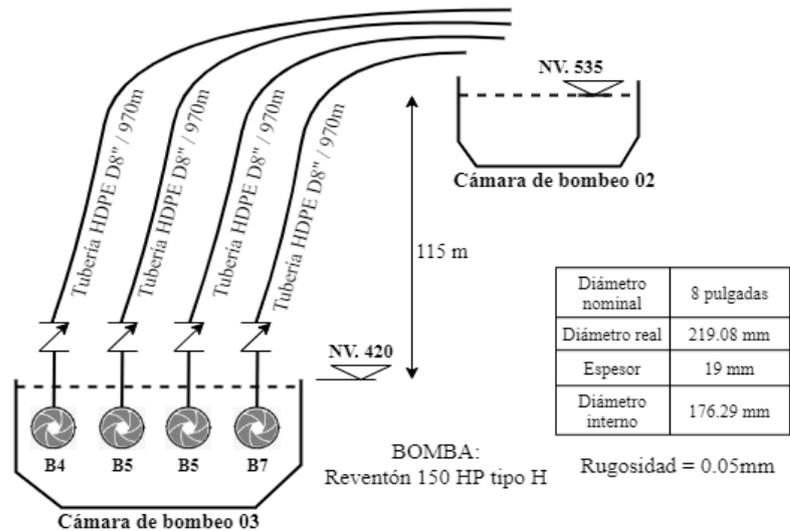


Figura 42. Configuración de tubería del tramo 2

Tabla 9. Carga de sistema del tramo 2

CAUDA L (L/s)	Velocidad (m/s)	Número de Reynols	Factor de fricción	Longitud equivalente (m)	Pérdidas Totales (m)	Altura Estática (m)	Carga del sistema (m)	Carga del sistema WC (m)	Carga total del sistema WC (m)
0	0	0	0	31	0	120	120	115	120
10	0.396	54372.3	0.02122	31	0.95	120	120.95	116.25	121.25
20	0.792	108744.6	0.01886	31	3.37	120	123.37	119.51	124.51
30	1.189	163117.0	0.01782	31	7.16	120	127.16	124.55	129.55
40	1.585	217489.3	0.01721	31	12.30	120	132.30	131.27	136.27
50	1.981	271861.6	0.01681	31	18.78	120	138.78	139.60	144.60
60	2.377	326233.9	0.01653	31	26.58	120	146.58	149.48	154.48

Para todos los cálculos se utilizaron los mismos procedimientos, teniendo en cuenta que varían algunos parámetros como la altura estática de bombeo y la longitud de tubería, en la figura 43 también se graficó el resultado de la modelación en Watercad (anexo 9).

En este tramo se define que las bombas “B4”, “B5”, “B6” Y “B7” se encuentran muy cerca del punto de eficiencia máxima, y que están operando de manera eficiente, alcanzando una eficiencia de 69.7% a un caudal 52.2 l/s.

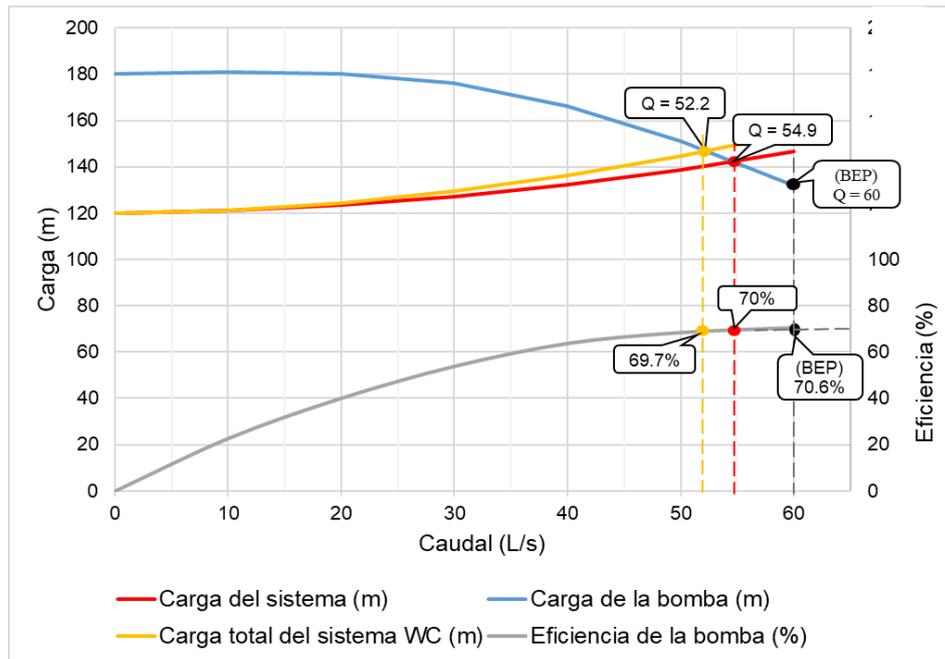


Figura 43. Curva del sistema vs. curva de la bomba del tramo 2

4.1.3. Tramo 3 (cámara de bombeo 4 a la cámara de bombeo 3)

En este tramo se encuentran tres bombas de 150 HP tipo N, bombas *Hidropump*, que bombean agua a alturas reducidas, pero con caudales elevados, la altura estática del sistema es tan solo 50 metros de altura, una de estas bombas está conectada a tuberías en paralelo de 6", ver figura 44.

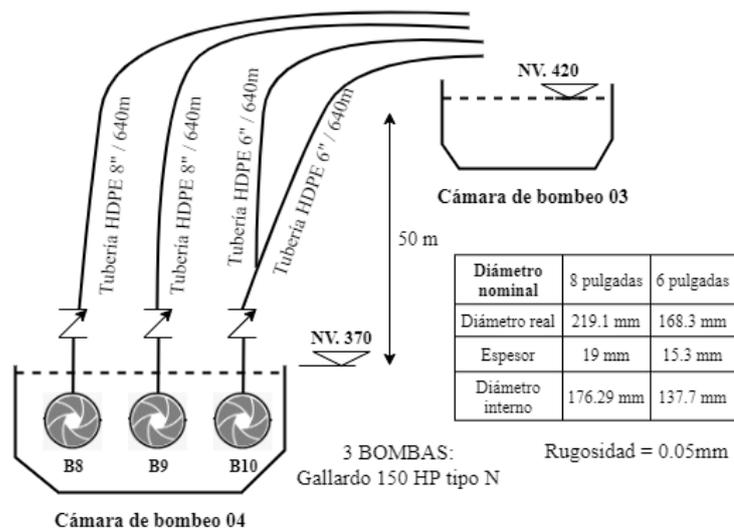


Figura 44. Configuración de tuberías tramo 3

En los cálculos realizados, se le añade 5 metros a la altura estática, debido a que las pozas no están ubicadas necesariamente al nivel que se

muestran, la diferencia es ± 1.5 metros, a esto se le suma la altura de descarga de la tubería, que están suspendidas, aproximadamente a tres metros de altura. Por lo tanto 5 metros de altura es un número considerable.

Tabla 10. Carga del sistema tramo 3

CAUDAL (L/s)	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds	Factor de fricción	Longitud equivalente (m)	Pérdidas Totales (m)	Altura Estática (m)	Carga del sistema 8" (m)	Carga del sistema 8" WC (m)	Carga total del sistema 8" WC (m)	Caraga del sistema 6" WC (m)	Carga total del sistema 6" WC (m)
0	0	0	0	31	0	55	55	50	55	50	55
10	0.396	54372.3	0.02122	31	0.64	55	55.64	50.82	55.82	50.83	55.83
20	0.792	108744.6	0.01886	31	2.26	55	57.26	52.98	57.98	52.99	57.99
30	1.189	163117.0	0.01782	31	4.80	55	59.80	56.31	61.31	56.34	61.34
40	1.585	217489.3	0.01721	31	8.25	55	63.25	60.74	65.74	60.80	65.80
50	1.981	271861.6	0.01681	31	12.59	55	67.59	66.24	71.24	66.32	71.32
60	2.377	326233.9	0.01653	31	17.82	55	72.82	72.76	77.76	72.87	77.87
70	2.774	380606.3	0.01631	31	23.94	55	78.94	80.28	85.28	80.43	85.43
80	3.170	434978.6	0.01614	31	30.94	55	85.94	88.78	93.78	88.97	93.97
90	3.566	489350.9	0.01601	31	38.83	55	93.83	98.23	103.23	98.47	103.47
100	3.962	543723.2	0.01590	31	47.61	55	102.61	108.62	113.62	108.91	113.91
110	4.358	598095.6	0.01580	31	57.27	55	112.27	119.94	124.94	120.29	125.29

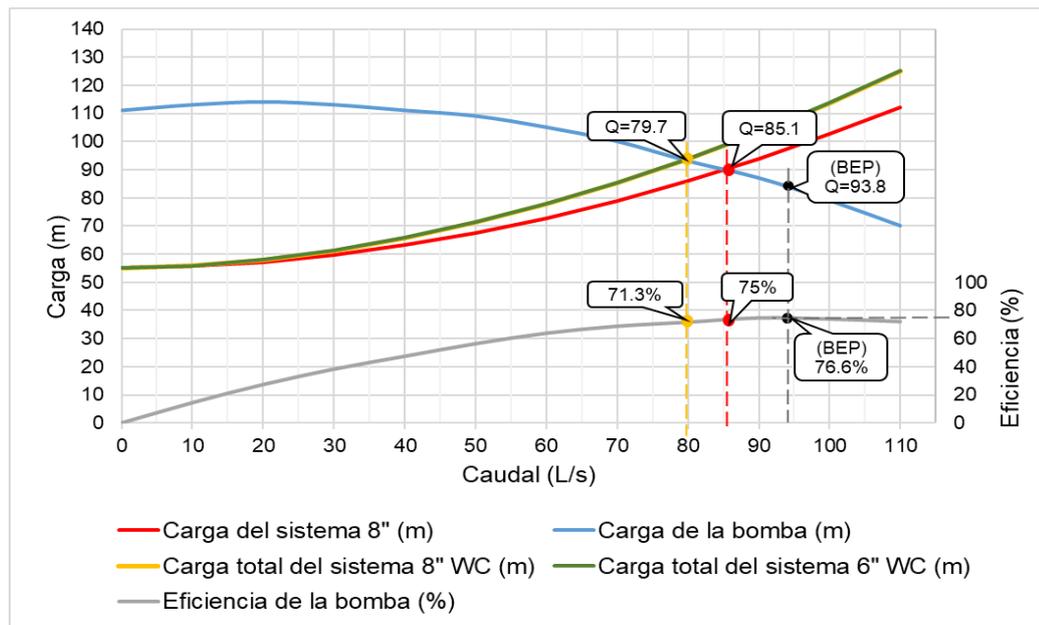


Figura 45. Curva del sistema vs. curva de la bomba del tramo 3

Las bombas “B8” Y “B9”, alcanzan caudales de 79.7 l/s a una eficiencia de 71.3%, muy cerca de su punto de eficiencia máxima, la “B10” que está conectada a tuberías de 6” en paralelo, alcanza un caudal de 79.7 l/s, con una eficiencia de 71.3%, de esta manera, se considera que las bombas están bien seleccionadas.

4.1.4. Tramo 4 (cámara de bombeo 7 a la cámara de bombeo 4)

En este tramo existen cuatro bombas de 150 HP tipo H que bombean agua a una altura aproximada de 100 m, en este análisis se le suma 10 metros a la altura estática, debido a que el punto de descarga es una poza de sedimentación que se encuentra metros más arriba de la poza principal.

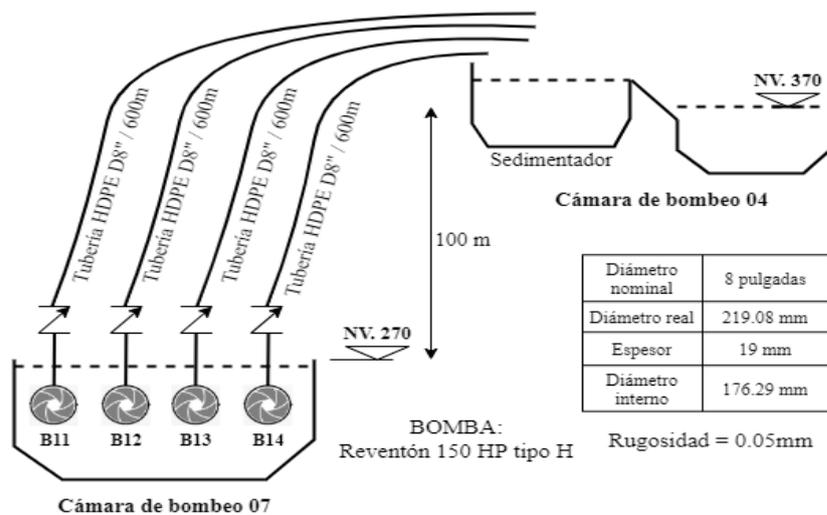


Figura 46. Configuración de tuberías tramo 4

Tabla 11. Carga del sistema del tramo 4

CAUDA L (L/s)	Velocidad (m/s)	Número de Reynols	Factor de fricción	Longitud equivalente (m)	Pérdidas Totales (m)	Altura estática (m)	Carga del sistema (m)	Carga del sistema WC (m)	Carga total del sistema WC (m)
0	0	0	0	31	0	110	110	100	110
10	0.396	54372.3	0.02122	31	0.60	110	110.60	100.77	110.77
20	0.792	108744.6	0.01886	31	2.12	110	112.12	102.79	112.79
30	1.189	163117.0	0.01782	31	4.52	110	114.52	105.91	115.91
40	1.585	217489.3	0.01721	31	7.76	110	117.76	110.07	120.07
50	1.981	271861.6	0.01681	31	11.84	110	121.84	115.23	125.23
60	2.377	326233.9	0.01653	31	16.76	110	126.76	121.34	131.34
70	2.774	380606.3	0.01631	31	22.51	110	132.51	128.39	138.39

Los puntos donde operan las bombas “B11”, “B12”, “B13” y “B14”, son puntos de máxima eficiencia, ver figura 47, cabe señalar que en la cámara de bombeo 7 es donde las bombas sumergibles presentan menos fallas y cambios a diferencia de las demás pozas, debido a dos factores importantes, las bombas están instaladas correctamente y las bombas trabajan en su punto de eficiencia máxima, estos dos factores permiten que las bombas presenten mayor tiempo entre fallas, que es bueno.

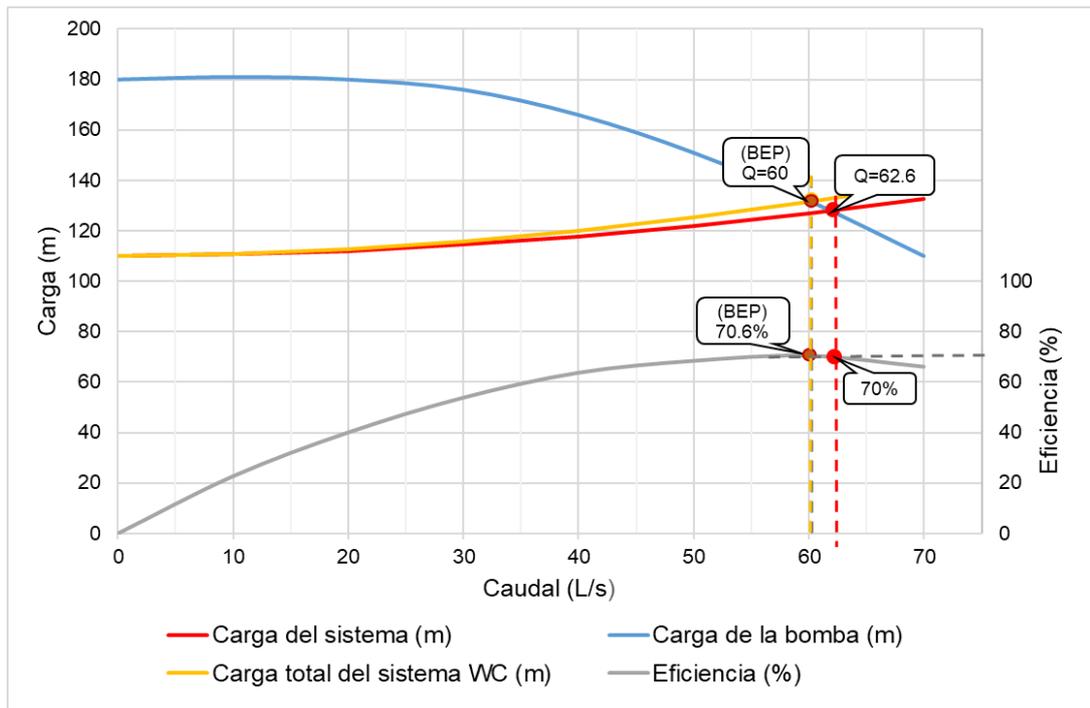


Figura 47. Curva del sistema vs. curva de la bomba del tramo 4

4.1.5. Tramo 5 (poza de bombeo 21 a la cámara de bombeo 7)

En este tramo existen tres bombas de 58 HP tipo H, dos de ellas conectadas a tubería de 8”, y la otra bomba conectada a tuberías de 6” en paralelo, ver figura 48.

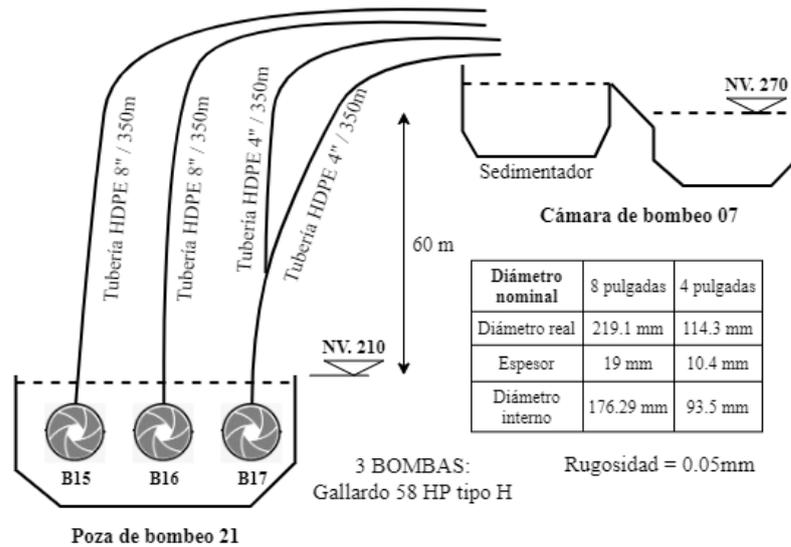


Figura 48. Configuración de tuberías tramo 5

Tabla 12. Carga del sistema del tramo 5

CAUDAL (L/s)	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds	Factor de fricción	Longitud equivalente (m)	Pérdidas Totales (m)	Altura estática (m)	Carga del sistema (m)	Carga del sistema 8" WC (m)	Carga total del sistema 8" WC (m)	Carga del sistema 4" WC (m)	Carga total del sistema 4" WC (m)
0	0	0	0	6	0	67	67	60	67	60	67
10	0.3962	54372.3	0.02122	6	0.38	67	67.38	60.52	67.52	63.04	70.04
20	0.7925	108744.6	0.01886	6	1.37	67	68.37	61.86	68.86	70.96	77.96
30	1.1887	163117.0	0.01782	6	2.91	67	69.91	63.94	70.94	83.22	90.22
40	1.5849	217489.3	0.01721	6	4.99	67	71.99	66.72	73.72	99.55	106.55
50	1.9811	271861.6	0.01681	6	7.62	67	74.62	70.16	77.16	119.80	126.80
60	2.3774	326233.9	0.01653	6	10.78	67	77.78	74.24	81.24	143.81	150.81
70	2.7736	380606.3	0.01631	6	14.48	67	81.48	78.94	85.94	171.51	178.51

Las bombas “B15” y “B16” alcanzan un caudal de 41.8 l/s, aproximadamente, con una eficiencia de 66%, cerca de su punto de eficiencia máxima; a comparación de la “B17”, su curva se comporta un poco más empinada, ver figura 49, que tan solo alcanza un caudal de 31.9 l/s entre sus dos líneas de 6”, esta es una bomba crítica que se debería reemplazar o modificar en el sistema de bombeo.

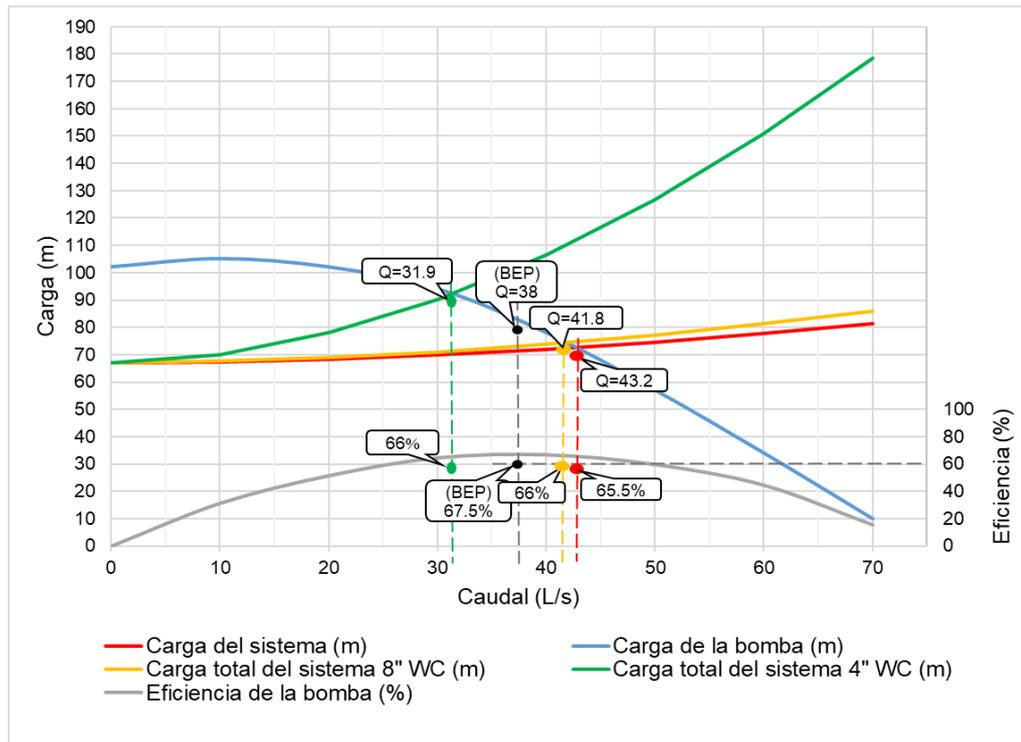


Figura 49. Curva del sistema vs. curva de la bomba del tramo 5

4.1.6. Tramo 6 (poza de bombeo 24 a la cámara de bombeo 7)

En este último tramo, las bombas más importantes son las dos bombas 150 HP tipo H, que bombean agua desde el nivel 190 al nivel 270 de un solo tramo, existen también dos bombas de 58 HP tipo H que bombeo a la poza 21, ver figura 50.

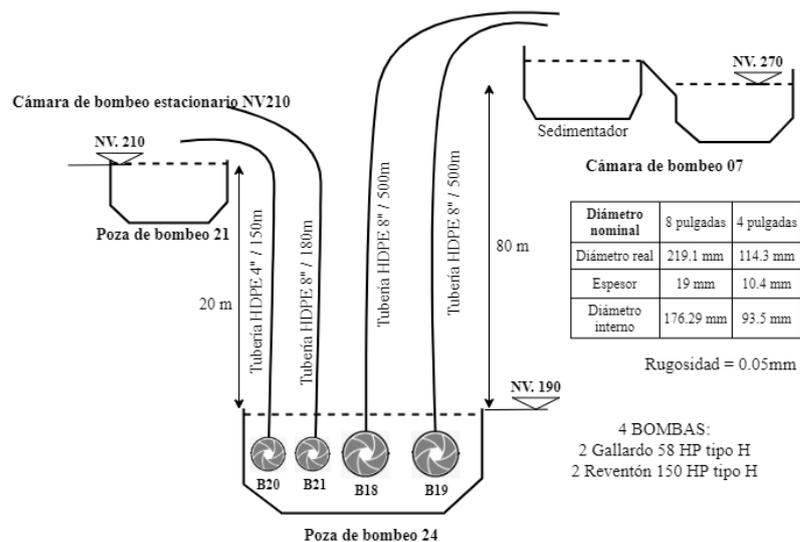


Figura 50. Configuración de tuberías del tramo 6

Tabla 13. Carga del sistema de tramo 6

CAUDAL (L/s)	Velocidad (m/s)	Número de Reynols	Factor de fricción	Longitud equivalente (m)	Pérdidas Totales (m)	Altura estática (m)	Carga del sistema 8" (m)	Carga del sistema 8" WC (m)	Carga total del sistema 8" WC (m)
0	0	0	0	6	0	95	95	80	95
10	0.396	54372.3	0.02122	6	0.48	95	95.48	80.64	95.64
20	0.792	108744.6	0.01886	6	1.70	95	96.70	82.33	97.33
30	1.189	163117.0	0.01782	6	3.62	95	98.62	84.93	99.93
40	1.585	217489.3	0.01721	6	6.22	95	101.22	88.40	103.4
50	1.981	271861.6	0.01681	6	9.49	95	104.49	92.69	107.69
60	2.377	326233.9	0.01653	6	13.44	95	108.44	97.79	112.79
70	2.774	380606.3	0.01631	6	18.05	95	113.05	103.67	118.67
80	3.170	434978.6	0.01614	6	23.06	95	118.06	110.31	125.31

Las bombas Reventón "B18" y "B19", operan un poco alejado de su punto de eficiencia máxima, pero alcanzan caudales considerables para la evacuación de agua, un total de 65.7 l/s, ver figura 51.

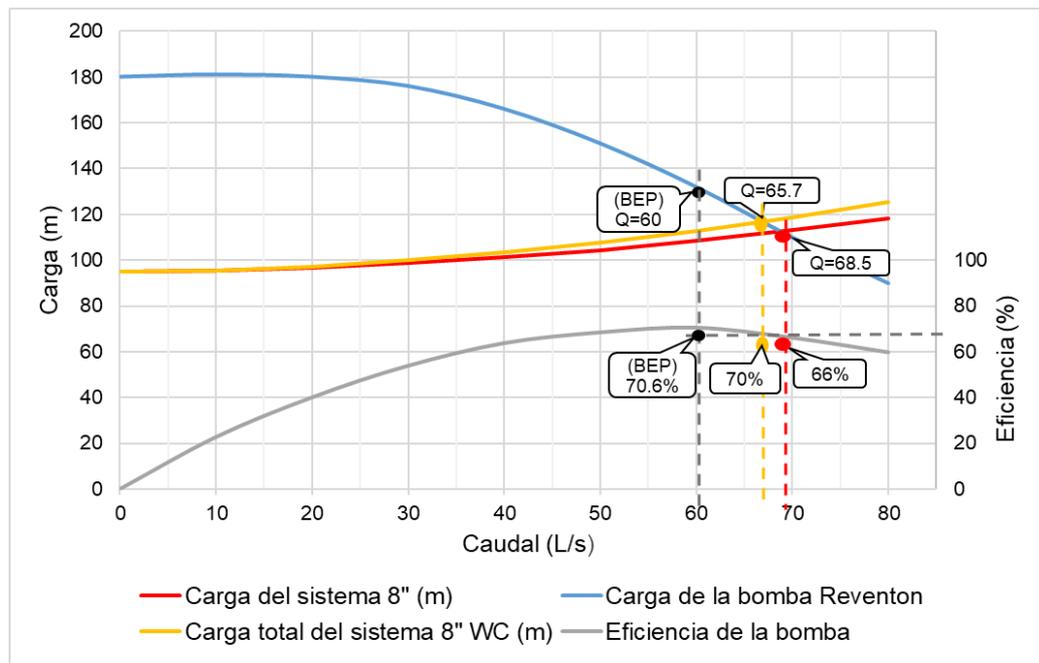


Figura 51. Curva del sistema vs. curva de la bomba [B18 y B19]

En la figura 52 se puede apreciar que la bomba B21 está mal seleccionada, debido a que se encuentra instalada a una tubería de 8" para abastecer un caudal grande, pero está alejada de su punto de eficiencia máxima, cabe precisar que estas bombas de profundización son instaladas sin un diseño previo, ya que tiene el objetivo principal de evacuar agua a medida que avanzan las labores mineras.

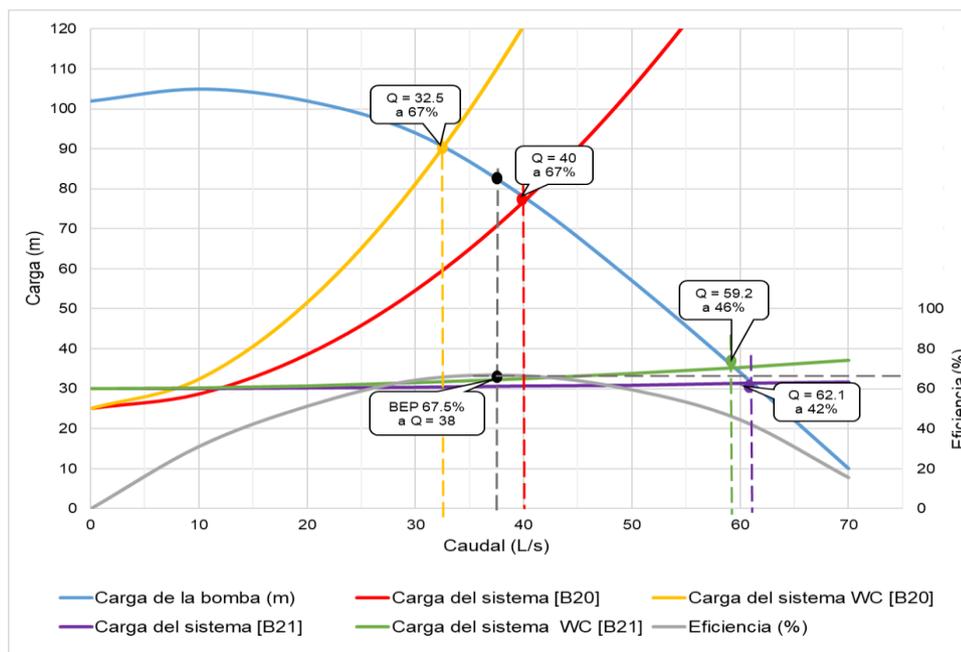


Figura 52. Curva del sistema vs. curva de la bomba [B20 y B21]

En resumen, el 50% de las bombas sumergibles trabaja un poco alejadas de su punto de eficiencia máxima, los caudales determinados mediante curvas características del sistema y curva de la bomba varían de manera moderada con el caudal real aforado en mina, ver tabla 14.

Tabla 14. Variación del caudal calculado y el caudal real

Cámara o poza de bombeo	Bomba	Caudal (L/s)		Diferencia	Variación
		Aforado	Calculado		
Cámara de bombeo 02 (NV. 535)	B1	41.5	45.9	4.4	9.6%
	B2	40.2	45.9	5.7	12.4%
	B3	39.8	45.9	6.1	13.3%
Cámara de bombeo 03 (NV. 420)	B4	42.8	52.2	9.4	18.0%
	B5	42.3	52.2	9.9	19.0%
	B6	42.2	52.2	10.0	19.2%
	B7	41.5	52.2	10.7	20.5%
Cámara de bombeo 04 (NV. 370)	B8	67.8	79.7	11.9	14.9%
	B9	67.4	79.7	12.3	15.4%
	B10	67.1	79.6	12.5	15.7%
Cámara de bombeo 07 (NV. 270)	B11	54.2	60	5.8	9.7%
	B12	52.1	60	7.9	13.2%
	B13	51.2	60	8.8	14.7%
	B14	50.2	60	9.8	16.3%
Poza de bombeo 21 (NV. 210)	B15	33.5	41.8	8.3	19.9%
	B16	35.1	41.8	6.7	16.0%
	B17	26.3	31.9	5.6	17.6%
Poza de bombeo 24 (NV. 190)	B18	50.5	65.7	15.2	23.1%
	B19	51.2	65.7	14.5	22.1%
	B20	30.1	32.5	2.4	7.4%
	B21	45.2	59.2	14	23.6%
PROMEDIO				9.14	16.3%

La variación de caudales es debido a algunos factores como el recorrido de las tuberías HDPE no son lineales, a veces presentan curvaturas en su recorrido que no se tomó en cuenta en los cálculos, ya que son difíciles de identificar en el sistema, esto produce pérdidas de energía hidráulica, otro factor de variación de caudales es el tiempo de uso de las bombas, el trabajo constante de la bomba hace que con el tiempo baje su eficiencia y, por ende, el caudal que bombea disminuye. Son estos factores que afecta de manera directa en la variación del caudal.

4.1.7. Cámara estacionaria nivel 210

La cámara estacionaria del nivel 210 presenta una configuración de tres de bombas en paralelo, utilizando tuberías de 12 pulgadas, cabe señalar que esta cámara de bombeo junto a la cámara estacionaria del nivel 430 han sido implementados a mediados del año 2020, para mejorar el sistema de ese entonces, los resultados fueron positivos en cuanto al aumento de la demanda volumétrica de agua, y se redujo un porcentaje de las bombas sumergibles de ese entonces, que era una prioridad.

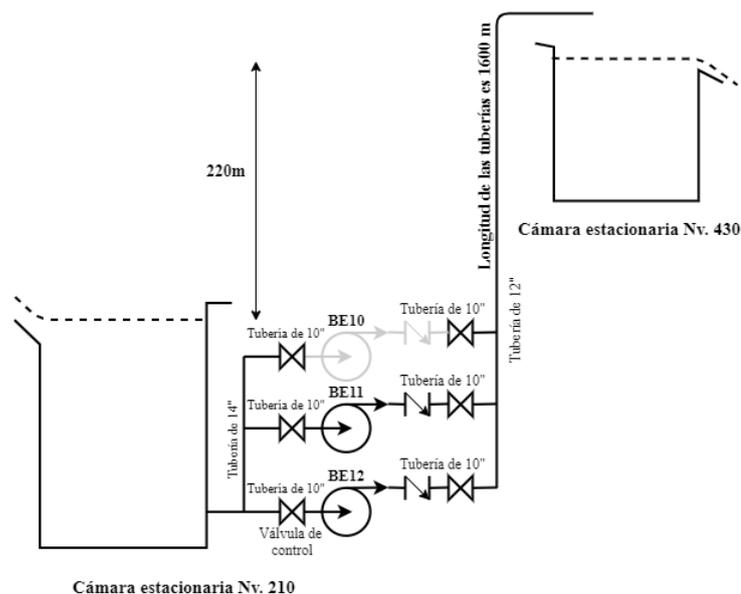


Figura 53. Configuración de tuberías de la cámara estacionaria del nivel 210

Tabla 15. Carga del sistema de la cámara estacionaria del nivel 210

CAUDAL (L/s)	Velocidad (m/s)	Número de Reynols	Factor de fricción	Pérdidas primarias (m)	Longitud equivalente (m)	Pérdidas secundarias (m)	Pérdidas Totales (m)	Altura estática (m)	Carga del sistema (m)	Carga del sistema WC (m)
0	0	0	0	0	68.8	0	0	220	220	220
10	0.1813	36784.5	0.02268	0.23	68.8	0.01	0.24	220	220.24	220.23
20	0.3627	73569.0	0.01973	0.80	68.8	0.03	0.83	220	220.83	220.84
30	0.5440	110353.4	0.01837	1.67	68.8	0.07	1.75	220	221.75	221.79
40	0.7254	147137.9	0.01755	2.84	68.8	0.12	2.96	220	222.96	223.05
50	0.9067	183922.4	0.01699	4.30	68.8	0.18	4.48	220	224.48	224.61
60	1.0881	220706.9	0.01658	6.04	68.8	0.26	6.30	220	226.30	226.46
70	1.2694	257491.3	0.01626	8.07	68.8	0.35	8.41	220	228.41	228.59
80	1.4508	294275.8	0.01601	10.37	68.8	0.45	10.82	220	230.82	231.00
90	1.6321	331060.3	0.01580	12.95	68.8	0.56	13.51	220	233.51	233.68
100	1.8135	367844.8	0.01563	15.82	68.8	0.68	16.50	220	236.50	236.63
110	1.9948	404629.2	0.01548	18.96	68.8	0.82	19.77	220	239.77	239.83
120	2.1762	441413.7	0.01535	22.38	68.8	0.96	23.34	220	243.34	243.30
130	2.3575	478198.2	0.01524	26.07	68.8	1.12	27.19	220	247.19	247.03
140	2.5389	514982.7	0.01514	30.05	68.8	1.29	31.34	220	251.34	251.00

En la tabla 15 se determinó la curva característica del sistema de tuberías utilizando la ecuación de Darcy Weisbach, también se muestran los resultados de la modelación con *Watercad* (anexo 31); en la figura 54 se puede apreciar el punto de operación de las bombas, una sola bomba en funcionamiento alcanza un caudal de 65.5 l/s, mientras que dos bombas en funcionamiento y una en *stand by* alcanza un caudal de 104.2 l/s.

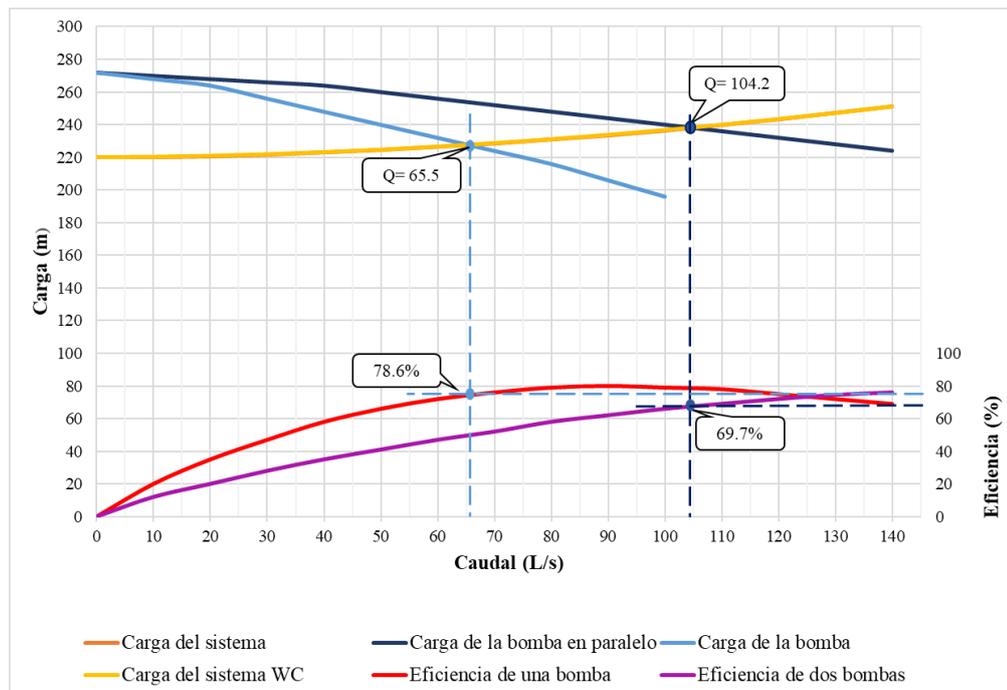


Figura 54. Curvas características de la cámara estacionaria del nivel 210

4.1.8 Cámara estacionaria del nivel 430

La cámara estacionaria del nivel 430 está conformada por dos bombas en paralelo, una en *stand by* y la otra en operación, conectadas a una tubería de 12 pulgadas, ver figura 55.

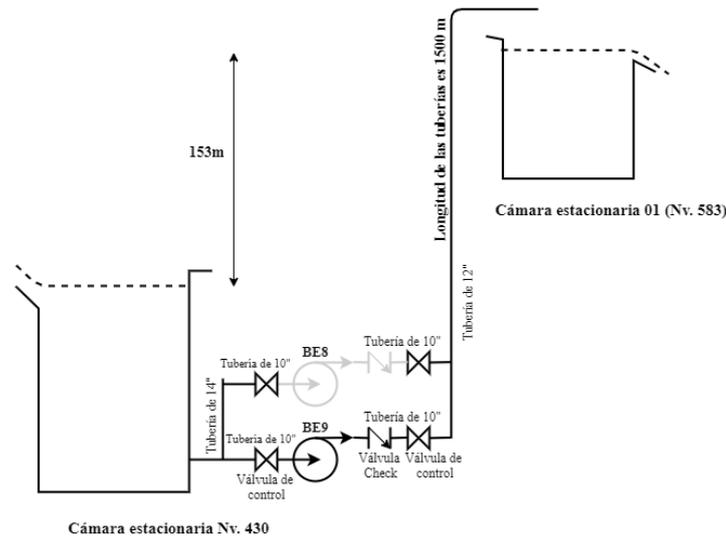


Figura 55. Configuración de tuberías de la cámara estacionaria del nivel 430

Tabla 16. Carga del sistema de la cámara estacionaria del nivel 430

CAUDAL (L/s)	Velocidad (m/s)	Número de Reynolds	Factor de fricción	Pérdidas primarias (m)	Longitud equivalente (m)	Pérdidas secundarias (m)	Pérdidas Totales (m)	Altura estática (m)	Carga del sistema (m)	Carga del sistema WCp (m)
0	0	0	0	0	42.7	0	0	153	153	153
10	0.1813	36784.5	0.02514	0.24	42.7	0.01	0.25	153	153.25	153.41
20	0.3627	73569.0	0.02306	0.88	42.7	0.02	0.90	153	153.90	154.49
30	0.5440	110353.4	0.02224	1.90	42.7	0.05	1.95	153	154.95	156.17
40	0.7254	147137.9	0.02180	3.31	42.7	0.09	3.40	153	156.40	158.40
50	0.9067	183922.4	0.02152	5.10	42.7	0.15	5.25	153	158.25	161.17
60	1.0881	220706.9	0.02133	7.28	42.7	0.21	7.49	153	160.49	164.46
70	1.2694	257491.3	0.02119	9.85	42.7	0.28	10.13	153	163.13	168.26
80	1.4508	294275.8	0.02108	12.80	42.7	0.36	13.17	153	166.17	172.55
90	1.6321	331060.3	0.02099	16.14	42.7	0.46	16.60	153	169.60	177.32
100	1.8135	367844.8	0.02093	19.86	42.7	0.57	20.42	153	173.42	182.57
110	1.9948	404629.2	0.02087	23.96	42.7	0.68	24.65	153	177.65	188.30
120	2.1762	441413.7	0.02082	28.45	42.7	0.81	29.26	153	182.26	194.48
130	2.3575	478198.2	0.02078	33.33	42.7	0.95	34.28	153	187.28	201.12
140	2.5389	514982.7	0.02075	38.59	42.7	1.10	39.69	153	192.69	208.21

Al determinar la curva característica del sistema, ver tabla 16, e intersecar con la curva de la bomba instalada, se determina en punto de operación de la bomba, que opera a un caudal de 106.3 l/s, aproximadamente, con una eficiencia de 79.9%, ver figura 56.

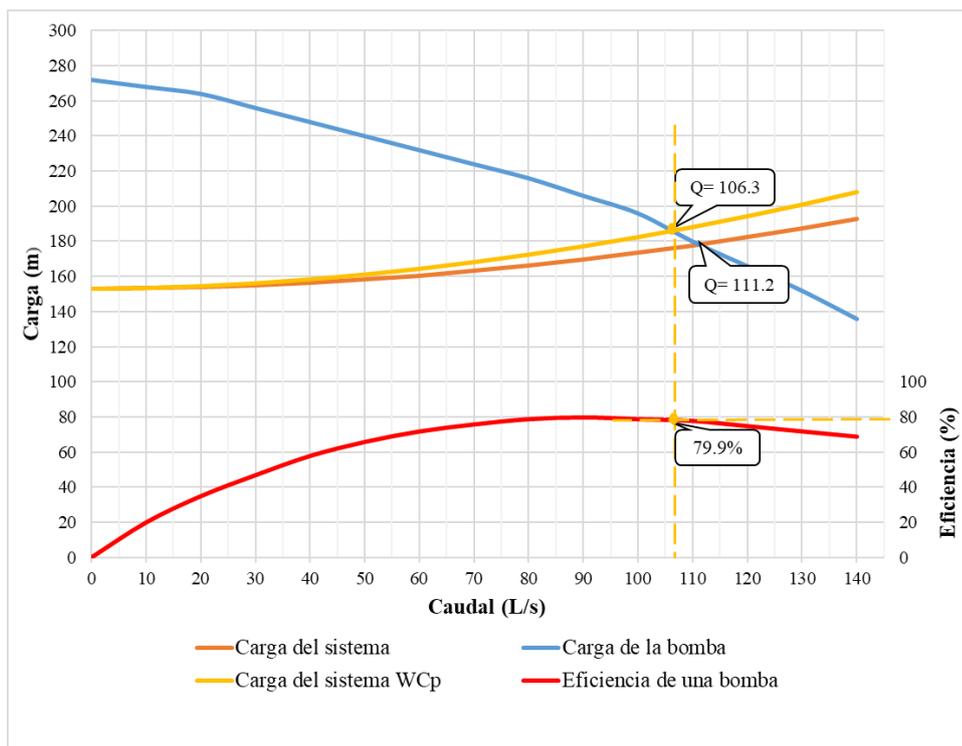


Figura 56. Curvas características de la cámara estacionaria del nivel 430

En el caso de las bombas estacionarias, la variación de caudales calculados con los caudales reales aforados en mina existe una variación promedio de 10%, ver tabla 16. Por lo tanto, para el diseño se tomó un factor de seguridad de 10%, para tener una certeza real del caudal con la que operó el nuevo sistema de bombeo.

Tabla 16. Variación de los caudales de las bombas estacionarias

Cámara o poza de bombeo	Bomba	Caudal (L/s)		Diferencia	Variación
		Aforado	Calculado		
Camara de bombeo estacionario Nv. 430	BE - 8	95.2	106.3	11.1	10.44%
	BE - 9				
Camara de bombeo estacionario Nv. 210	BE - 10	95.7	104.2	8.5	8.16%
	BE - 11				
	BE - 12				
PROMEDIO					9.30%

4.2. Rediseño de la red de bombas sumergibles

Para realizar el rediseño de la red de bombas sumergibles de la mina Islay, se tuvo como objetivo principal, disminuir la cantidad de bombas sumergibles, esto debido a que las bombas sumergibles se utilizan para crear redes de bombeo temporales, ya que, un sistema que bombea grandes

caudales, con pequeñas bombas, solo consumirá mayor cantidad de energía y utilizará muchas líneas de tuberías para cumplir con la demanda; por ello, se debe aumentar la potencia de las bombas, para finalmente tener bombas grandes que reemplacen a las bombas pequeñas y se reduzca el número de ellas; las alternativas serían bombas centrífugas estacionarias, que proporcionan altos caudales a grandes alturas de bombeo.

4.2.1. Configuración inicial del sistema de bombeo.

El tipo de bomba para este diseño debe ser una bomba centrífuga de alta presión, con gran capacidad de altura de bombeo y caudal, características que se encuentran en las bombas estacionarias multietapas, como las bombas KSB WKL instaladas en la mina Islay, que han demostrado estar preparadas para bombeo a gran escala, adaptándose a las condiciones de operación en mina, KSB Perú S. A. proporciona bombas de diferentes modelos que se selecciona de acuerdo a los requerimientos del cliente final.

Para seleccionar la bomba que necesita el nuevo diseño, primero se define la distancia en la que se transporta el líquido, que es desde el nivel 190 al 583, aproximadamente 393 metros de altura, una gran altura, que necesita al menos de dos tramos para poder transportar un caudal mayor a 153 l/s; la capacidad máxima promedio de las bombas es de 80 a 100 l/s, por lo tanto, se establece que haya dos bombas en operación y una bomba en *stand by* en cada tramo de bombeo, estas bombas deben de ser de las mismas características, para un correcto intercambio de roles de funcionamiento. El tramo intermedio se designó al nivel 370 y se determinó según los cálculos si ese es el nivel apropiado.

En cuanto a la configuración de tuberías, basándose en instalaciones de sistema de bombeo en paralelo de diferentes minas, se determinó que existen tuberías paralelas que alimentan a las bombas estacionarias conectadas a una tubería de mayor diámetro que se conecta a la poza de succión; y en la descarga, de la misma manera, tuberías en

paralelo que salgan de las bombas y que alimentan a una tubería principal de mayor diámetro que guía el agua hasta la poza de descarga.

La longitud de la tubería principal se determinó mediante las longitudes de las tuberías ya instaladas, la mayoría de ellas tienen un recorrido óptimo, es así como se asignó una longitud de 1 100 metros de recorrido para la cámara de bombeo nivel 190 y un recorrido de 2 140 metros para la cámara de bombeo en el nivel 370. De esta manera, la propuesta inicial del rediseño de la red de bombas sumergibles queda definida en la figura 57.

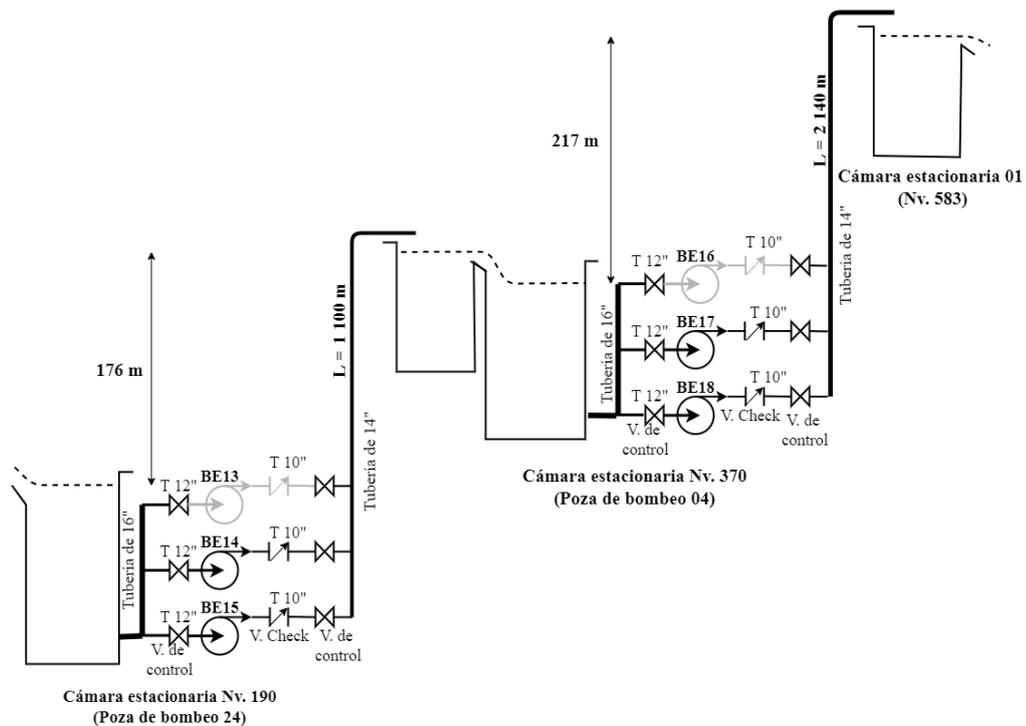


Figura 57. Propuesta inicial de sistema de bombeo

4.2.2. Selección de bombas

Los datos de las tuberías de acero según la norma ASTM A53, que se utilizó para la implementación del diseño, se muestran en la tabla 17, y en la tabla 18 se muestran los datos de la tubería principal de este diseño, una tubería HDPE de diámetro de 14".

Tabla 17. Datos de las tuberías de acero utilizadas

DATOS DEL TUBERIAS DE ACERO A53 SH						
	10 pulgadas		12 pulgadas		16 pulgadas	
D. nominal	10 in	0.254 m	12 in	0.305 m	16 in	0.406 m
D. exterior real	273.1 mm	0.273 m	323.85 mm	0.324 m	406.40 mm	0.406 m
Espesor		15.09 mm		17.48 mm		21.44 mm
D. interno	242.87 mm	0.243 m	288.89 mm	0.289 m	363.52 mm	0.364 m
Área		0.0463 m ²		0.0655 m ²		0.1038 m ²
Rugosidad		0.0001 m		0.0001 m		0.0001 m

Nota: tomada de tuberías de acero ASTM A53 – FR

Tabla 18. Datos de la tubería principal HDPE 14"

DATOS DE TUBERIA HDPE		
	14 pulgadas	
D. nominal	14 in	0.356 m
D. exterior real	355.60 mm	0.356 m
Espesor		32.33 mm
D. interno	290.94 mm	0.291 m
Área		0.0665 m ²
Rugosidad		0.00005 m

Nota: tomada de la Ficha Técnica Nicoll – Tuberías HDPE

Los accesorios que interviene en el diseño como las válvulas, entradas, salidas, codos y demás, donde se utilizó su longitud equivalente en los cálculos para determinar las pérdidas que generan, los valores de las longitudes equivalentes de los accesorios involucrados se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Longitudes equivalentes para accesorios

Longitudes equivalentes para accesorios (m)			
	10 in	12 in	14 in
Entrada normal	4.5	5.5	6.2
V. compuerta	1.7	2.1	2.4
V. de ángulo	43	51	60
Te salida lateral	16	19	22
Salida	7.5	9	11
V. Check	20	24	28
Codo 90° medio	6.7	7.9	9.5

Nota: tomada del cuadro de longitudes equivalentes

Nueva cámara estacionaria en el nivel 190

Aplicando la ecuación de la energía, para un sistema abierto, la energía requerida del sistema queda definida en términos de altura de bombeo y pérdidas de energía hidráulica en succión y en descarga.

$$H_p = \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho g} + Z_2 - Z_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \right) + h_d + h_s$$

$$H_p = (Z_2 - Z_1) + h_d + h_s$$

Para calcular las pérdidas hidráulicas, se utilizó la ecuación de Darcy Weisbach con el factor de fricción de Haaland, y para las pérdidas de accesorios se utilizó la longitud equivalente. En la tabla 20 se aprecian las cargas de cada línea de tubería para dos bombas en funcionamiento, en la succión, una tubería de 16" y dos tuberías de 12" en paralelo; y en la descarga, las dos tuberías de 10" en paralelo y la tubería principal de 14".

Tabla 20. Carga del sistema de tuberías y accesorios (primer tramo)

CAUDA L (L/s)	SUCCIÓN				DESCARGA				CARGA TOTAL DEL SISTEMA
	Carga tubería de 16"	Carga tubería de 12"	Carga en paralelo 12"	Carga de 14"+10"P	Carga tubería de 10"	Carga en paralelo 10"	Carga tubería de 14"	Carga de 10"P+12"	
0	0.00	0	0	0	3	3	173	176	176
10	0.00	0.00	0.00	0.00	3.01	3.00	173.10	176.10	176.10
20	0.00	0.00	0.00	0.00	3.02	3.01	173.35	176.36	176.36
30	0.00	0.00	0.00	0.01	3.05	3.01	173.74	176.75	176.75
40	0.01	0.01	0.00	0.01	3.08	3.02	174.25	177.27	177.28
50	0.01	0.01	0.00	0.01	3.12	3.03	174.88	177.92	177.93
60	0.01	0.02	0.00	0.02	3.17	3.05	175.64	178.69	178.71
70	0.02	0.02	0.01	0.03	3.23	3.06	176.52	179.58	179.61
80	0.03	0.03	0.01	0.03	3.29	3.08	177.52	180.60	180.64
90	0.03	0.03	0.01	0.04	3.37	3.10	178.65	181.74	181.78
100	0.04	0.04	0.01	0.05	3.45	3.12	179.89	183.01	183.06
110	0.05	0.05	0.01	0.06	3.54	3.14	181.25	184.39	184.45
120	0.06	0.06	0.02	0.07	3.64	3.17	182.73	185.89	185.96
130	0.06	0.07	0.02	0.08	3.75	3.20	184.32	187.52	187.60
140	0.07	0.08	0.02	0.10	3.86	3.23	186.04	189.27	189.36
150	0.08	0.09	0.02	0.11	3.99	3.26	187.88	191.13	191.24
160	0.10	0.10	0.03	0.12	4.12	3.29	189.83	193.12	193.24
170	0.11	0.12	0.03	0.14	4.26	3.33	191.90	195.23	195.37
180	0.12	0.13	0.03	0.15	4.41	3.37	194.09	197.46	197.61
190	0.13	0.15	0.04	0.17	4.57	3.41	196.40	199.80	199.98
200	0.15	0.16	0.04	0.19	4.74	3.45	198.82	202.27	202.46

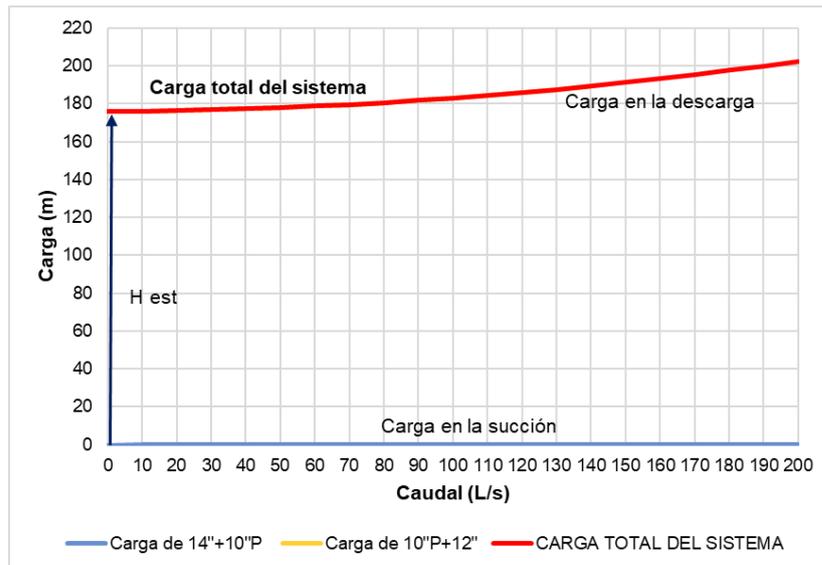


Figura 58. Cálculo de la curva del sistema (primer tramo)

La curva del sistema se intersecó con varias curvas de bombas KSB de diferentes diámetros, finalmente se definió la bomba KSB WKL 150/4 con diámetro de impulsor de 330 milímetros, a una velocidad de 1 750 rpm. En la figura 59 se observa que una bomba opera a un caudal de 108 l/s, con una eficiencia de 79.8%; cuando dos bombas operan en simultaneo alcanzan un caudal de 189.2 l/s con una eficiencia de 79.8%.

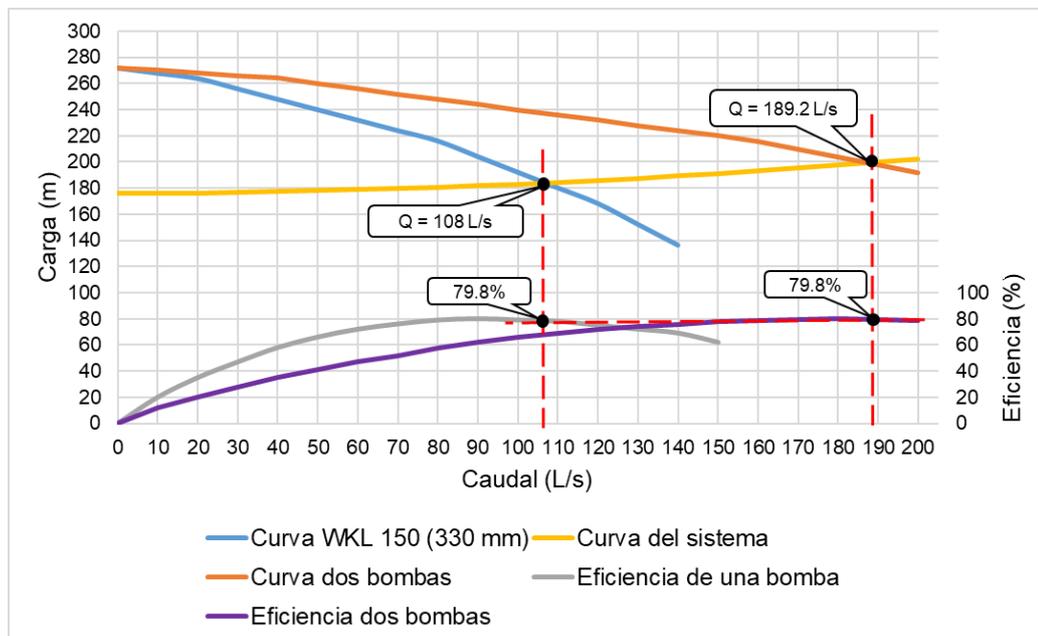


Figura 59. Curva del sistema vs. curva de la bomba (primer tramo)

En la modelación realizada en el software *Watercad*, de las mismas características del sistema de bombeo, se obtuvieron resultados similares,

los cálculos se realizaron utilizando la ecuación de Hazen Williams, los parámetros que se dieron son los mismos. En la figura 60 se muestra la curva del sistema, curva de una bomba en operación y curvas de dos bombas en operación con sus respectivas eficiencias (60).

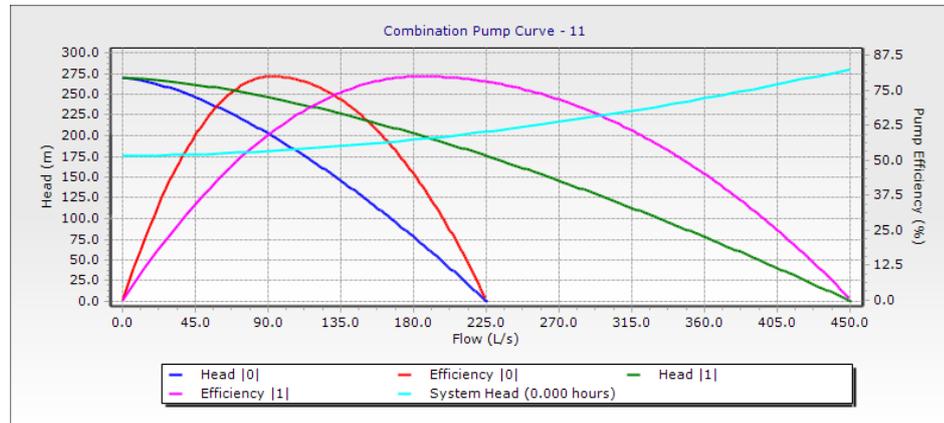


Figura 60. Curvas obtenidas de la modelación en Watercad (primer tramo)

Los resultados de la modelación se muestran en la figura 61, se muestran también los caudales que recorren por las tuberías y sus velocidades, una bomba en operación alcanza un caudal de 95.1 l/s y dos bombas en operación alcanzan un caudal total de 190.2 l/s.

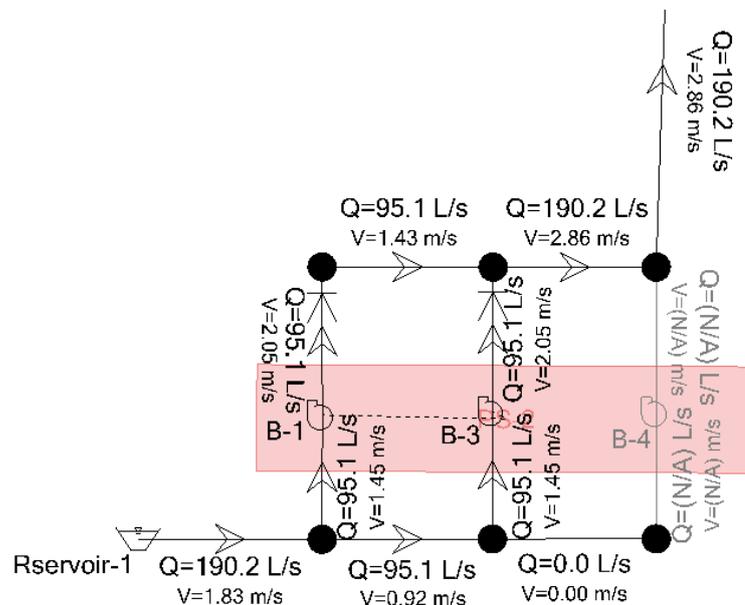


Figura 61. Resultados de la modelación en Watercad (primer tramo)

Nueva cámara estacionaria en el nivel 370

En este segundo tramo del nuevo sistema de bombeo, se realizó el cálculo de la curva característica del sistema de manera similar a la anterior, utilizando la ecuación de Darcy Weisbach para calcular pérdida de energía hidráulica, en la tabla 21 se pueden apreciar las cargas en succión, descarga y la carga total del sistema.

Tabla 21. Carga del sistema de tuberías y accesorios (segundo tramo)

CAUDA L (L/s)	SUCCIÓN				DESCARGA				CARGA TOTAL DEL SISTEMA
	Carga tubería de 16"	Carga tubería de 12"	Carga en paralelo 12"	Carga de 14"+10"P	Carga tubería de 10"	Carga en paralelo 10"	Carga tubería de 14"	Carga de 10"P+12"	
0	0	0	0	0	3	3	214	217	217
10	0.00	0.00	0.00	0.00	3.01	3.00	214.20	217.20	217.20
20	0.00	0.00	0.00	0.00	3.02	3.01	214.69	217.69	217.70
30	0.00	0.00	0.00	0.01	3.05	3.01	215.44	218.45	218.45
40	0.01	0.01	0.00	0.01	3.08	3.02	216.43	219.46	219.46
50	0.01	0.01	0.00	0.01	3.12	3.03	217.67	220.71	220.72
60	0.01	0.02	0.00	0.02	3.17	3.05	219.15	222.20	222.22
70	0.02	0.02	0.01	0.03	3.23	3.06	220.87	223.93	223.96
80	0.03	0.03	0.01	0.03	3.29	3.08	222.82	225.90	225.93
90	0.03	0.03	0.01	0.04	3.37	3.10	225.01	228.11	228.15
100	0.04	0.04	0.01	0.05	3.45	3.12	227.43	230.55	230.60
110	0.05	0.05	0.01	0.06	3.54	3.14	230.08	233.22	233.28
120	0.06	0.06	0.02	0.07	3.64	3.17	232.96	236.13	236.20
130	0.06	0.07	0.02	0.08	3.75	3.20	236.08	239.28	239.36
140	0.07	0.08	0.02	0.10	3.86	3.23	239.43	242.65	242.75
150	0.08	0.09	0.02	0.11	3.99	3.26	243.00	246.26	246.37
160	0.10	0.10	0.03	0.12	4.12	3.29	246.81	250.10	250.23
170	0.11	0.12	0.03	0.14	4.26	3.33	250.85	254.18	254.32
180	0.12	0.13	0.03	0.15	4.41	3.37	255.12	258.49	258.64
190	0.13	0.15	0.04	0.17	4.57	3.41	259.62	263.03	263.20
200	0.15	0.16	0.04	0.19	4.74	3.45	264.35	267.80	267.99

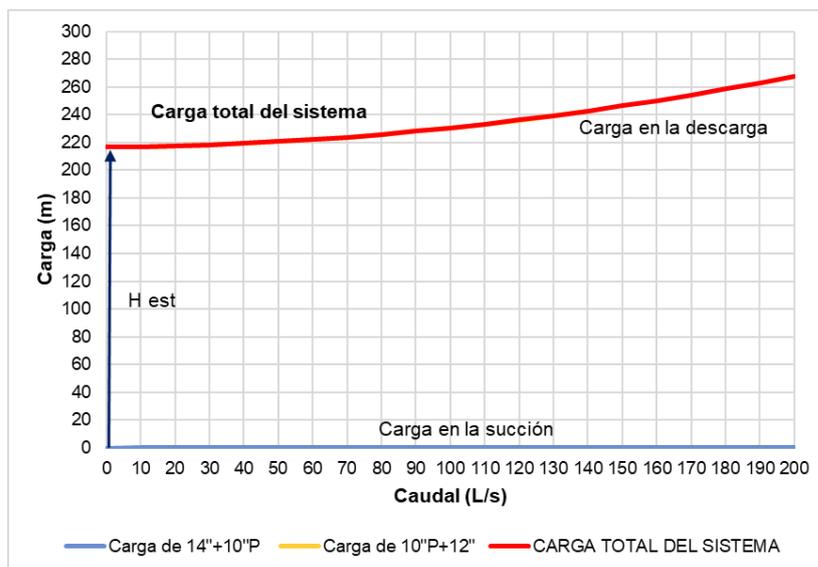


Figura 62. Cálculo de la curva del sistema (segundo tramo)

La bomba KSB WKL 150/4 con diámetro de impulsor de 360 milímetros a una velocidad de 1 750 rpm es la que más se ajusta a la curva del sistema calculado. En la figura 63 se observa que una bomba opera a un caudal de 113 l/s, con una eficiencia de 79%, mientras que dos bombas en funcionamiento alcanzan un caudal de 182 l/s con una eficiencia de 78%.

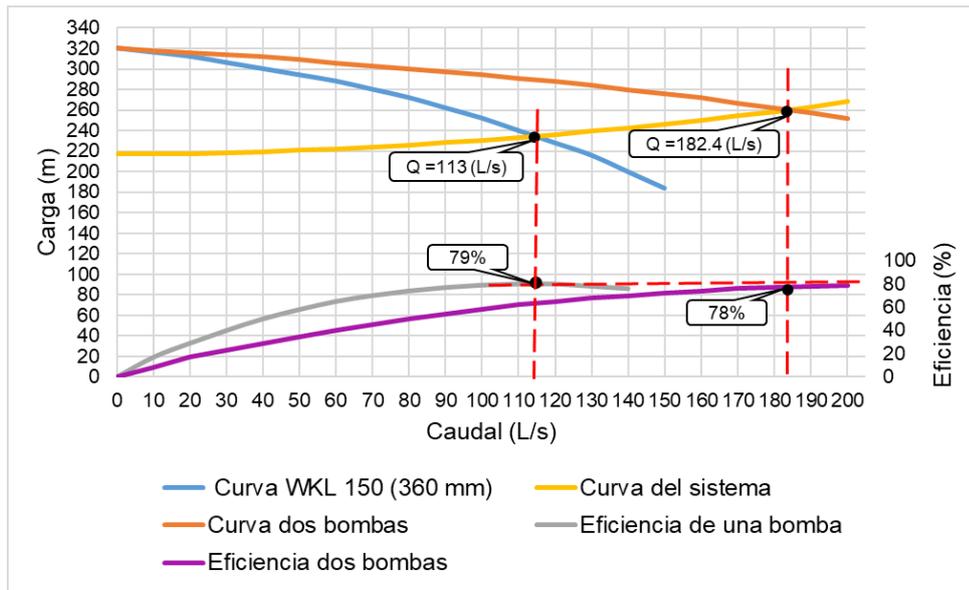


Figura 63. Curva del sistema vs. curva de la bomba (segundo tramo)

En la figura 64 se muestra la curva del sistema, curva de una bomba en operación y curvas de dos bombas en operación, con sus respectivas eficiencias, obtenidas de la modelación realizada en el software *Watercad*.

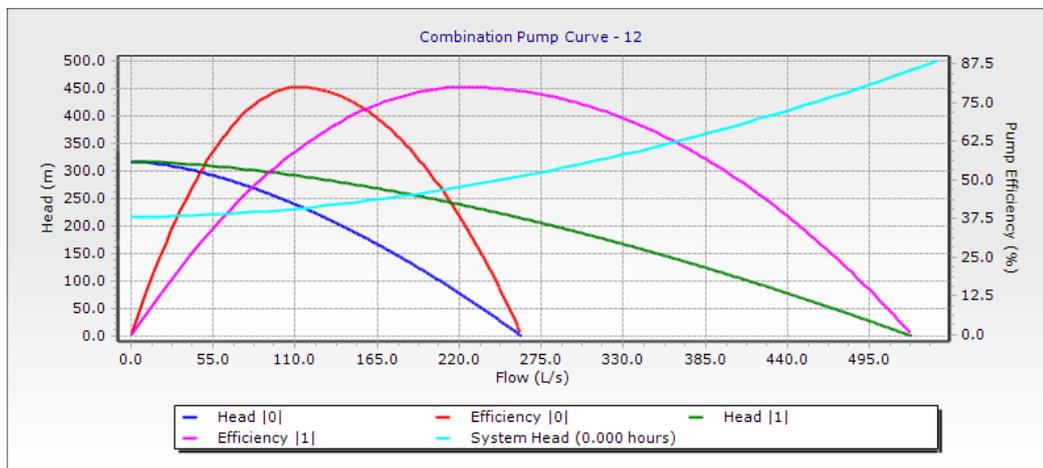


Figura 64. Curvas obtenidas de la modelación en Watercad (segundo tramo)

Los resultados de la modelación del segundo tramo se muestran en la figura 65, se muestran también los caudales que recorren por las tuberías y sus velocidades, una bomba en operación alcanza un caudal de 94.2 l/s y dos bombas en operación alcanzan un caudal total de 188.4 l/s.

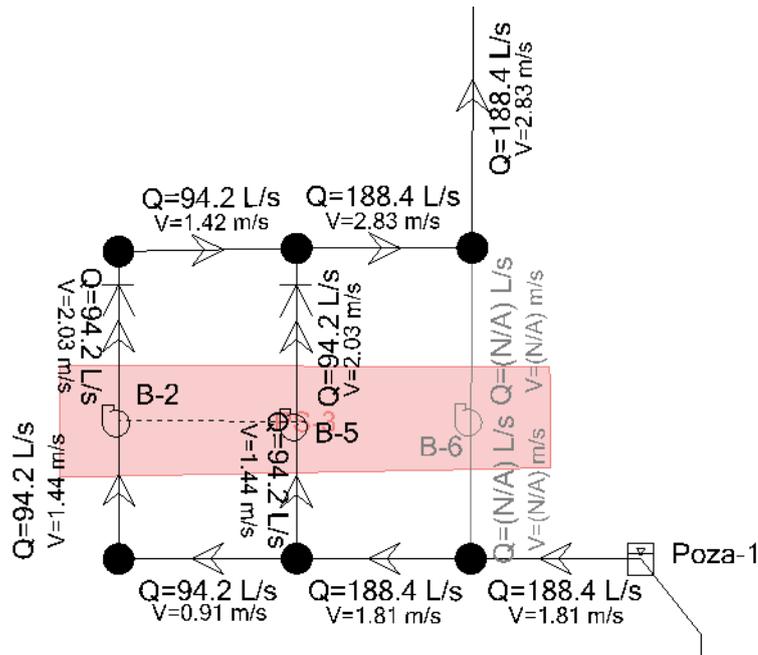


Figura 65. Resultados de la modelación en Watercad (segundo tramo)

En la tabla 22 se pueden apreciar que los caudales hallados manualmente son menores que los caudales de los resultados de la modelación en *Watercad*, se asumió que los caudales menores sean los resultados finales, debido a que, si por algún motivo el sistema bombea el caudal mayor, sería favorable, pero si bombea un menor caudal, sería un problema; entonces, se asigna un factor de seguridad de 10% al caudal menor que es 182.4 l/s, este nuevo sistema de bombas estacionarias alcanzaría un caudal de 164.16 l/s con dos bombas en operación.

Tabla 22. Caudales obtenidos de los cálculos

	CAUDALES OBTENIDOS (L/s)			
	Manualmente		Watercad	
	1 bomba	2 bombas	1 bomba	2 bombas
Camara estacionaria Nv. 190	108	189.2	95.1	190.2
Camara estacionaria Nv. 370	113	182.4	94.2	188.4

4.2.3. NPSH

Para saber si existe cavitación en el sistema, se calculó el NPSH, para que un sistema no cavite el NPSH disponible debe ser mayor que el NPSH requerido. La curva del NPSH requerido es el que nos proporciona el fabricante de la bomba (anexo 19), lo que se debe calcular es la curva NPSH disponible, a través de la siguiente ecuación.

$$NPSH_{disponible} = H_{atm} - H_{vap} \pm h_s - h_{ps}$$

$$NPSH_{disponible} = 5.78 - 0.125 + 3 - h_{ps}$$

Tabla 23. Cálculo del NPSH

Caudal (L/s)	Caudal (m ³ /s)	Pérdidas en succión (m)	NPSH disponible (m)	NPSH requerido (m)
0	0	0		
10	36	0.00		
20	72	0.00		
30	108	0.01		
40	144	0.01	8.65	3
50	180	0.01	8.64	3.2
60	216	0.02	8.64	3.5
70	252	0.03	8.63	3.75
80	288	0.03	8.62	4
90	324	0.04	8.61	4.4
100	360	0.05	8.60	4.8
110	396	0.06	8.59	5.3
120	432	0.07	8.58	6
130	468	0.08	8.57	7
140	504	0.10	8.56	8.5
150	540	0.11	8.55	10.2
160	576	0.12	8.53	

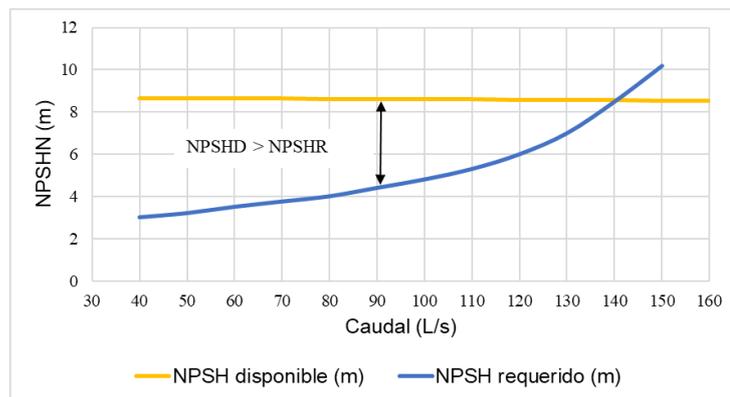


Figura 66. NPSH disponible vs. NPSH requerido

Los resultados fueron que la bomba no cavita porque tiene una diferencia de NPSH de cuatro metros aproximadamente, una diferencia bastante considerable, que evita la formación de burbujas en la succión.

4.3. Validación del rediseño

4.3.1. Evaluación operacional

Se realizó la evaluación operacional entre el sistema actual y el sistema propuesto de la red de bombas sumergibles de la mina Islay del nivel 190 al 583; la evaluación que se realizó tiene que ver la demanda volumétrica de agua, en la tabla 24 se puede apreciar la demanda volumétrica del sistema de bombas sumergibles.

Tabla 24. Caudal evacuado por la red de bombas sumergibles

Cámara o poza de bombeo	Bomba	Datos aforados		Caudal evacuado (L/s)	
		Tiempo de trabajo (h)	Caudal real (L/s)		Caudal efectivo (L/s)
Cámara de bombeo 02 (NV. 535)	B0	24	41.5	41.5	153.1
	B1	24	41.5	41.5	
	B2	24	40.2	40.2	
	B3	18	39.8	29.9	
Cámara de bombeo 03 (NV. 420)	B4	24	42.8	42.8	153.2
	B5	24	42.3	42.3	
	B6	24	42.2	42.2	
	B7	15	41.5	25.9	
Cámara de bombeo 04 (NV. 370)	B8	24	67.8	67.8	152.0
	B9	24	67.4	67.4	
	B10	6	67.1	16.8	
Cámara de bombeo 07 (NV. 270)	B11	24	54.2	54.2	153.2
	B12	24	52.1	52.1	
	B13	22	51.2	46.9	
	B14	0	50.2	0	
Poza de bombeo 21 (NV. 210)	B15	24	33.5	34	62.8
	B16	20	35.1	29	
	B17	0	26.3	0	
Poza de bombeo 24 (NV. 190)	B18	24	50.5	51	93.2
	B19	20	51.2	43	
	B20	24	30.1	30	

El caudal evacuado por la red de bombas sumergibles es aproximadamente 153 l/s, con un total de 21 bombas sumergibles en operación, algunos tramos están a su máxima capacidad de bombeo.

En la tabla 21 se pueden apreciar los caudales que proporciona el sistema de bombeo propuesto, en solo dos tramos, la cámara estacionaria en el nivel 190 y la cámara estacionaria en el nivel 370, cada cámara con dos bombas en operación evacua un caudal de 162 l/s y una bomba en *stand by* que proporciona un caudal de 81 l/s adicionales.

Tabla 25. Caudales del sistema de bombas propuestas

Cámara de bombeo	Bomba	Tiempo de trabajo (h)	Caudales (L/s)			
			Caudal nominal	Caudal real (L/s)	Caudal 2 bombas	Caudal Evacuado
Cámara estacionaria a Nv. 190	NBE - 13	24	95.1	85.6	189.2	170.28
	NBE - 14	24	95.1	85.6		
	NBE - 15	0	95.1	85.6	0	
Cámara estacionaria a Nv. 370	NBE - 16	24	94.2	84.9	182.4	164.16
	NBE - 17	24	94.2	84.9		
	NBE - 18	0	94.2	84.9	0	

El resultado de la implementación del sistema de bombas propuestas al sistema general de bombas de la mina Islay se muestra en la figura 67; un sistema con bombas sumergibles de gran capacidad que evacuan caudales mayores a grandes alturas, y con bombas *stand by* en caso de mantenimiento o cualquier emergencia que se pueda presentar, cabe precisar que no se quitará del todo las bombas sumergibles, ya que estas jugarán un papel importante al alimentar las pozas de bombeo estacionarias en las profundizaciones, su uso es imprescindible en el sistema.

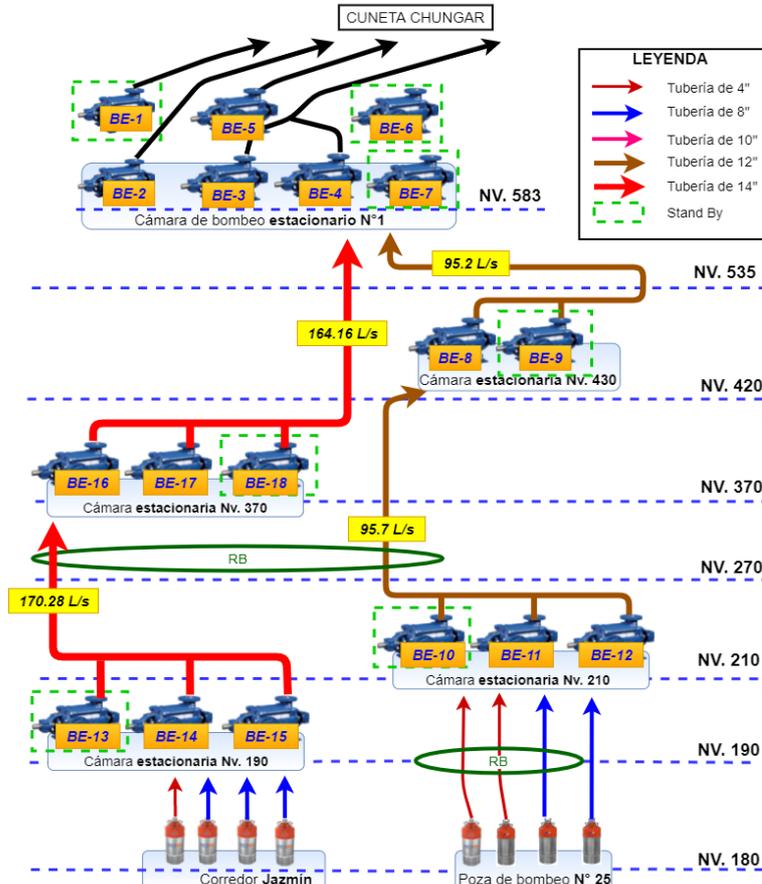


Figura 67. Resultado final del rediseño del sistema de bombeo en la mina Islay

4.3.2. Evaluación energética

En cuanto al consumo de energía eléctrica para las bombas, cabe mencionar que, Volcan Compañía Minera S. A. A. cuenta con 13 centrales hidroeléctricas y 26 subestaciones eléctricas, que proporcionan energía eléctrica a sus diversas actividades mineras (21), en el caso de la mina Islay, la energía eléctrica proviene de la central hidroeléctrica de Chungar con una capacidad de 22 MW, además, la mina Islay cuenta con su propia subestación eléctrica. Por lo tanto, el consumo de energía eléctrica no es un factor clave para el rediseño de las bombas, pero si es de vital importancia, ya que, si se logra disminuir el consumo de energía eléctrica con rediseño, se lograría una reducción de costo de producción, que beneficia a la unidad minera independientemente si tiene o no, una fuente de energía propia (13).

Para los cálculos relacionados a consumo de energía eléctrica, se utilizó la fórmula de potencia eléctrica (ecuación 14), que es el producto de la corriente consumida; la tensión por raíz de 3, debido a que el tipo de corriente es trifásico; y un factor de potencia ($\cos\phi$), el valor que utiliza la empresa minera es de 0.85.

$$P = I * V * \sqrt{3} * \cos\phi \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

P: potencia (Watts)

I: corriente (Amperios)

V: tensión (Voltios)

En la tabla 22 se muestran las corrientes consumidas de cada una de las bombas sumergibles instaladas, las cuales fueron medidos en campo a través de una pinza amperimétrica, la tensión que se tiene en la mina Islay es de 460 voltios trifásicos, se utilizó un factor de potencia de 0.85 y un precio de US\$. 0.08 por kWh consumidos.

Tabla 26. Consumo y costo de energía eléctrica del sistema de bombas sumergibles

Cámara o poza de bombeo	Bomba	Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (KW)	Horas trabajadas	Consumo de energía (KW-H)	Costo de energía por día (US\$)
Cámara de bombeo 02 (NV. 535)	B1	49.6	462.0	33.74	24	809.68	64.77
	B2	50.5	460.9	34.27	24	822.41	65.79
	B3	51.4	460.2	34.82	24	835.8	66.86
Cámara de bombeo 03 (NV. 420)	B4	130.3	450.0	86.32	18	1 553.85	124.31
	B5	129.0	450.2	85.50	24	2 052.04	164.16
	B6	131.4	449.1	86.88	24	2 085.11	166.81
	B7	130.6	450.6	86.64	24	2 079.34	166.35
Cámara de bombeo 04 (NV. 370)	B8	77.1	474.6	53.87	15	808.08	64.65
	B9	78.0	470.2	54.00	24	1 295.89	103.67
	B10	80.0	467.0	55.00	24	1 320.07	105.61
Cámara de bombeo 07 (NV. 270)	B11	130.3	465.7	89.34	6	536.02	42.88
	B12	127.0	466.0	87.13	24	2 091.13	167.29
	B13	129.4	465.8	88.74	24	2 129.73	170.38
	B14	129.1	466.3	88.63	22	1 949.82	155.99
Poza de bombeo 21 (NV. 210)	B15	52.3	455.0	35.03	0	0.00	0.00
	B16	50.7	453.9	33.88	24	813.13	65.05
	B17	51.4	454.8	34.42	20	688.32	55.07
Poza de bombeo 24 (NV. 190)	B18	132.2	465.6	90.62	0	0.00	0.00
	B19	131.1	463.5	89.46	24	2 147.06	171.76
	B20	55.4	461.2	37.62	20	752.33	60.19
	B21	56.2	460.8	38.13	24	915.04	73.20
TOTAL						25 684.84	2 054.79

Nota: tomada y adaptada de la base de datos de la mina Islay

El consumo de energía eléctrica de la red actual de bombas sumergibles de la mina Islay es aproximadamente 25 684.84 kWh con un costo aproximado de US\$. 2 054.79 por día. De la misma manera, se calculó el consumo de energía eléctrica del sistema de bombeo propuesto, a través de la potencia de los motores de 400 y 300 HP, se utilizó un factor de potencia de 0.85, ver tabla 23.

Tabla 27. Consumo y costo de la energía eléctrica de sistema propuesto

Cámara o poza de bombeo	Bomba	Voltaje (V)	Potencia (HP)	Potencia (KW)	Corriente (A)	Horas trabajadas	Consumo de energía (KW-H)	Costo de energía por día (US\$)
Cámara estacionaria Nv. 190	NBE - 13	460	400	298.28	440.44	24	7 158.72	572.70
	NBE - 14	460	400	298.28	440.44	24	7 158.72	572.70
	NBE - 15	460	400	298.28	440.44	0	0	0
Cámara estacionaria Nv. 370	NBE - 16	460	300	223.71	330.33	24	5 369.04	429.52
	NBE - 17	460	300	223.71	330.33	24	5 369.04	429.52
	NBE - 18	460	300	223.71	330.33	0	0	0
TOTAL							25 055.52	2 004.44

El nuevo sistema de bombas propuesto consume aproximadamente 25 055.52 kWh en un día, con un costo aproximado de

US\$. 2 004.44 por día, por lo tanto, el sistema de bombeo propuesto consume aproximadamente 630 kWh menos que el sistema actual de bombas sumergibles, en cuanto a lo económico, ahorra un costo aproximado de US\$. 50 por día, un costo ligeramente bajo, pero a largo plazo reduce los costos a gran escala.

4.3.3. Evaluación económica

Para la evaluación económica, se detallan los costos de alquiler de las bombas sumergibles de parte del consorcio Geohidráulica a Volcan Compañía Minera S. A. A. esto se detalla en la tabla 22. Los datos se obtuvieron del contrato realizado por ambas empresas (anexo 35).

Tabla 28. Costo de alquiler de bombas sumergibles

Cámara o poza de bombeo	Código de bomba	Potencia (HP)	Costo alquiler (US\$/mes)	Costo alquiler por poza (US\$/mes)
Cámara de bombeo 02 (NV. 535)	B0	150	3 150	6 600
	B1	58	1 150	
	B2	58	1 150	
	B3	58	1 150	
Cámara de bombeo 03 (NV. 420)	B4	150	3 150	12 600
	B5	150	3 150	
	B6	150	3 150	
	B7	150	3 150	
Cámara de bombeo 04 (NV. 370)	B8	150	3 150	9 450
	B9	150	3 150	
	B10	150	3 150	
Cámara de bombeo 07 (NV. 270)	B11	150	3 150	12 600
	B12	150	3 150	
	B13	150	3 150	
	B14	150	3 150	
Poza de bombeo 21 (NV. 210)	B15	58	1 150	3 450
	B16	58	1 150	
	B17	58	1 150	
Poza de bombeo 24 (NV. 190)	B18	150	3 150	8 600
	B19	150	3 150	
	B20	58	1 150	
	B21	58	1 150	
TOTAL				53 300

La operación de la red de bombas sumergibles del nivel 190 al 538, tiene un costo total de US\$. 53 300 mensuales, este costo incluye las bombas en *stand by* que se encuentran en almacén o previamente

instaladas que no se valoriza, ya que es responsabilidad del consorcio Geohidráulica dar confiabilidad al sistema de bombeo, es por lo que valoriza las bombas desde que comienza a operar. Cabe mencionar que el alquiler de bombas también incluye el cable de la bomba y los tableros eléctricos para su funcionamiento.

Por otro lado, el costo de las bombas KSB WKL 150/4, costo de los motores, costo de los tableros eléctricos y demás accesorios para su instalación del sistema de bombeo propuesto se detallan en la tabla 25.

Tabla 29. Costo del sistema de bombeo propuesto

Cámara de bombeo	Bomba	Tipo de bomba	Diámetro del impulsor (mm)	Potencia requerida (HP)	Costo de la bomba (US\$)	Costo del motor (US\$)	Costo de tablero (US\$)	Costo accesorios (US\$)	Costo Total (US\$)
Cámara estacionaria Nv. 190	NBE - 13	WKL 150/4	330	300	25 000	4 000	2 500	1 500	33 000
	NBE - 14	WKL 150/4	330	300	25 000	4 000	2 500	1 500	33 000
	NBE - 15	WKL 150/4	330	300	25 000	4 000	2 500	1 500	33 000
Cámara estacionaria Nv. 370	NBE - 16	WKL 150/4	360	400	28 000	5 000	2 500	1 500	37 000
	NBE - 17	WKL 150/4	360	400	28 000	5 000	2 500	1 500	37 000
	NBE - 18	WKL 150/4	360	400	28 000	5 000	2 500	1 500	37 000
TOTAL					159 000	27 000	15 000	9 000	210 000

El costo aproximado de la adquisición del nuevo sistema de bombeo propuesto es de US\$. 210 000, otro factor que se debe considerar en los costos es la habilitación de las cámaras estacionarias, normalmente esto lo realiza el área de proyectos de mina, es un análisis que se enfoca más en la implementación, pero tiene un costo aproximado, con fuentes de las pozas estacionarias ya existentes, de US\$. 30 000 por cámara de bombeo.

El nuevo sistema de bombas sumergibles requiere de la implementación de 3 240 metros de tubería HDPE de 14 pulgadas, el costo de una tubería de 6.1 metros es de US\$. 50, por lo tanto, se requiere una inversión aproximada de US\$. 26 560, el método para unir las tuberías se realiza mediante electrofusión, realizar el procedimiento de este método y todos los materiales requiere una inversión adicional de US\$. 30 000.

Tabla 30. Costo general de la implementación del sistema de bombeo propuesto

Descripción	Cámara	Cámara	Costo Total (US\$)
	estacionaria Nv. 190 (US\$)	estacionaria Nv. 370 (US\$)	
Adquisición de bombas y demas accesorios	99 000	111 000	210 000
Habilitación de cámaras de bombeo	30 000	30 000	60 000
Implementación de tuberías	24 020	32 540	56 560
TOTAL	153 020	173 540	326 560

Por lo tanto, el sistema de bombeo propuesto tiene un costo aproximado de US\$. 326 560, una inversión que se realiza hasta la puesta en marcha de las bombas; cabe mencionar, que como las bombas van a pertenecer a la compañía minera, los mantenimientos respectivos lo deben realizar la compañía.

Para el tema de costo de mantenimiento del sistema de bombeo propuesto, se muestra la tabla 25, donde se pueden apreciar los costos de cada uno de los repuestos que se utilizaron en las intervenciones a las bombas, estos repuestos se deberían tener en stock en almacén, ya que son de uso constante.

Tabla 31. Costo de repuestos de la bomba WKL 150/4

Descripcion	Moneda	P. Unitario	Cant.	P. Total
DIFUSOR WKL 150 ULT.EST	USD	1,922.20	1	1,922.20
DIFUSOR WKL 150	USD	2,272.89	3	6,818.67
EJE WKL 150/04/LS	USD	837.00	1	837.00
IMPELLER WKL150	USD	1,299.14	4	5,196.56
ANILLO ROZANTE 200/220X15	USD	1,085.83	8	8,686.64
CASQU PROTEC EJE WKL150L/S	USD	987.18	1	987.18
CASQU PROTEC EJEWKL150L/R - MANGA LADO LIBRE	USD	985.90	1	985.90
CASQU PROTECEJE WKL150 MTERM.	USD	499.14	1	499.14
CASQUILLO DISTAN WKL150 - MANGA	USD	909.39	2	1,818.78
TUERCA DE 2 PLANAS WKL150 M52X1,5	USD	48.22	1	48.22
ANILLO DE SEGURIDAD 60X2	USD	3.15	2	6.30
PRENSA ESTOPAS DN78 FORMAC	USD	81.92	2	163.84
CASQUILLO DE APRIETE H213 - MANGUITO FIJACION	USD	23.63	1	23.63
CASQUILLO ESCALÓ WKL 150 - MANGA ESPACIADOR	USD	222.92	3	668.76
ANILLO DISTANCIA WKL150 2199533	USD	29.18	2	58.36
RODAM BOLA OB 3312 C3 321 REF 0300353	USD	255.31	1	255.31
RODAM ROD CILIND NU213K/C3 REF 02140503	USD	87.53	1	87.53
				29,064.02

Nota: tomada de la base de datos de la mina Islay

Según el costo de los repuestos y la cantidad de bombas que se plantea implementar, la compañía debe disponer de un centro de costos

de US\$. 30 000 mensuales en temas de mantenimiento y todo lo que se requiera para mantener las bombas operativas. Este presupuesto puede variar, en algunos casos, puede ser menos y en otros más, pero siempre debe mantener el centro de costos en positivo.

Tabla 32. Costos generales del sistema de bombeo

Ítem	Valor
Alquiler mensual de bombas sumergibles	\$. 53 300
Alquiler anual de bombas sumergibles	\$. 639 600
Inversión del proyecto	\$. 326 560
Año de la implementación del proyecto (2 meses)	\$. 733 160
Presupuesto mensual mantenimiento WKL 150/4	\$. 30 000
Presupuesto anual mantenimiento WKL 150/4	\$. 360 000
Ahorro mensual	\$. 23 300

En la tabla 30 se muestran los costos generales que se realizan en el sistema de bombeo, los costos de la implementación del proyecto y los costos después de la implementación del proyecto, En efecto, como se observa en la figura 68, se logró una reducción de costos considerablemente, un ahorro mensual de US\$. 23 300 después de implementar el proyecto.

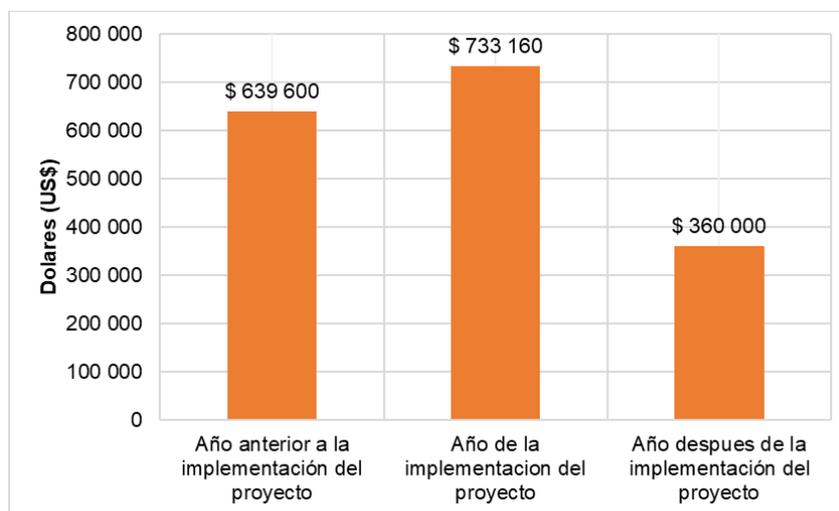


Figura 68. Variación de los costos con la implementación del proyecto

El tiempo de la recuperación de la inversión se calculó a través de la fórmula conocida como PRI (Periodo de la Recuperación de la Inversión), en donde se tiene una inversión inicial y los ingresos anuales después de la inversión, en este caso los ingresos son los ahorros que se

obtienen después de la implementación del proyecto, si se ahorra un total de US\$. 23 000 por mes, en un año se ahorrará US\$. 27600.

Tabla 33. Tiempo de recuperación de la inversión

Concepto	Costo (US\$)	Flujo de costo (US\$)
Inversión Inicial	326 560	
Ahorro primer año	276 000	276 000
Ahorro segundo año	276 000	552 000
Ahorro tercer año	276 000	828 000

$$PRI = A + \left(\frac{B - C}{D} \right)$$

Donde:

A: periodo anterior al que se recupera la inversión

B: inversión inicial

C: flujo de caja acumulado del periodo A

D: flujo de caja acumulado del periodo donde se recupera la inversión

$$PRI = A + \left(\frac{B - C}{D} \right)$$

$$PRI = 1 + \left(\frac{326\,560 - 276\,000}{552\,000} \right)$$

$$PRI = 1.0915942 \text{ años}$$

$$0.0915942 * 12 = 1.0991304 \text{ meses}$$

$$0.0991304 * 365 = 2.97 \text{ días}$$

Por lo tanto, el tiempo de la recuperación de la inversión es de 1 año, 1 mes y 3 días.

4.3.4. Evaluación del ciclo de vida

La norma API 610 establece que el tiempo de vida útil de las bombas centrífugas es aproximadamente 20 años, donde, los primeros tres años puede operar sin ninguna dificultad y a condiciones de operación severas, la norma también menciona que es un tiempo que varía de

acuerdo al uso que se les dé a las bombas, y los mantenimientos realizados oportuna y adecuadamente.



Figura 69. Costo del ciclo de vida de una bomba centrífuga. Tomada de PumpsBombas (11)

CONCLUSIONES

- Se evaluaron las condiciones de operación de la red de bombas sumergibles del nivel 190 al 583 de la mina Islay, se identificaron los puntos de operación y eficiencia de cada una de las bombas, encontrando que el 50% de las bombas operan lejos de su punto de máxima eficiencia. Además, solo la cámara de bombeo 7 y la cámara de bombeo 4, tienen bombas en *stand by*, que permiten el cambio de bombas; las demás pozas no lo tienen y tampoco tienen líneas de tuberías habilitadas para instalar una, de manera que la red de bombas sumergibles actualmente instaladas opera a su máxima capacidad.
- Se rediseñó la red de bombas sumergibles del nivel 190 al 583 de la mina Islay, con un nueva red de bombas estacionarias que utilizan motores de 400 HP, el nuevo sistema está dividido en dos cámaras de bombeo: la primera cámara estacionaria del nivel 190 tiene tres bombas WKL 150/4 con un diámetro de impulsor de 330 mm y la segunda cámara estacionaria del nivel 370 tiene tres bombas WKL150/4 con un diámetro de impulsor de 360 mm, este nuevo sistema evacua un caudal aproximado de 164.16 l/s más una bomba en *stand by* en cada cámara, con capacidad adicional de 84.9 l/s, para el nuevo sistema se utilizarán 3240 metros de tuberías HDPE de 14 pulgadas.
- Se validó el rediseño mediante valoraciones como la evaluación operacional, donde la nueva red de bombas alcanza 11 l/s más que la red de bombas sumergibles; además, cuenta con una línea de bombas en *stand by* con capacidad adicional de 84.9 l/s, que se utilizará para intercambiar el uso de las bombas o cuando se requiera mantenimiento; en la evaluación económica se determinó que el alquiler de la red de bombas sumergibles tiene un costo aproximado de US\$. 53 000 mensuales, mientras que el costo para implementar el nuevo sistema de bombas estacionarias es de US\$. 326 560, de ahí los costos se reducen a US\$. 30 000 mensuales aproximadamente para los repuestos y mantenimientos de las bombas; en la evaluación energética, se ha determinado que el nuevo diseño consumirá 630 kWh

menos al día que el sistema actual, ahorra un costo aproximado de US\$. 50 por día.

RECOMENDACIONES

- Para determinar las condiciones de operación de las bombas sumergibles, los datos que se utilizaron fueron la base de datos existente de la mina Islay, con eso fue suficiente para saber los puntos de operación de las bombas y compararlos con los caudales reales que se mide en las misma tuberías, existe una ligera variación por diversos factores que no se tuvo en cuenta, como es el caso de las curvaturas en los recorridos de las tuberías, para un próximo proyecto, se recomienda que los análisis de las condiciones de operación se realice en campo, detectando las curvaturas que generan pérdidas menores pero importantes para un mejor análisis.
- Para la implementación del rediseño del sistema de bombas, el proyecto debe ser evaluado por un personal experimentado en temas de proyectos de la unidad minera, para ver algunos detalles de los procesos de implementación, que van desde la comunicación con los proveedores, logística de los productos y la ejecución del proyecto mismo.
- Los costos involucrados para la implementación del nuevo sistema de bombas estacionarias del nivel 190 al 583 de la mina Islay, deberá ser evaluada y trabajada con un miembro de Volcan Compañía Minera S. A. A. – unidad Chungar, para tener las cifras más exactas de los costos involucrados en la implementación del proyecto.

LISTA DE REFERENCIAS

1. **AMBIENTUM.** Aguas subterráneas. *Enciclopedia Medioambiental*. [En línea] [Citado el: 29 de 1 de 2020.]
https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/agua_subterranea.
2. **ALJOP S. A.** *Análisis de costo de tenencia (Cost of Ownership)*. 4, Lima : s.n., 2003.
3. **RODRÍGUEZ AYALA, Yover Michel y HUATUCO GONZÁLES, Mario Miguel.** *Mejoramiento del sistema de bombeo para evacuación eficiente de aguas subterráneas en Volcan Compañía Minera S. A. A. - unidad San Cristóbal*. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo : s.n., 2014.
4. **FRANCO SULLCA, Jorge Luis y MUÑICO CASAS, Edmundo.** *Optimización del sistema de bombeo de agua subterránea, para satisfacer su demanda volumétrica, en Volcan Compañía Minera S. A. A.-unidad Chungar*. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Centro del Perú. Huancayo : s.n., 2015.
5. **RAFAEL BARZOLA, Jose Erik y CALVEZ CHOQUE, Gaudencio.** *Implementación de un sistema de bombeo integral para la evacuación de aguas subterráneas en la minera Kolpa S. A.* Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Centro del Perú. Huancayo : s.n., 2019.
6. **SUMARIA MONTES, Rosario Guisell y SUÁREZ ENCISO, Christopher.** *Análisis técnico-económico para la ampliación de un sistema de dos etapas de una mina subterránea*. Lima : s.n., 2019.
7. **ORTIZ VIDAL, Luis Enrique, CABANILLAS MAURY, Danny Eugenio y FIERRO CHIPANA, Roger Abel.** *Equilibrio hidráulico en sistemas de bombeo minero: estudio de caso*. 3, Santiago de Chile : s.n., 2010, Ingeniare, Vol. 18, págs. 335-342.
8. **INGERSOLL - Dresse Pumps.** *Cameron Hydraulic Data*. New Jersey : C. C. Heald.
9. **FRANCO GARCÍA, Ángel.** *Curso interactivo de Física en Internet*. 2015.
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/index.html>.

10. **WEBBOOK.NIST.GOV.** *Libro Web de Química del NIST, SRD 69.*
<https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
11. **HIDROPUMP.** Hidropump Geohidráulica. [En línea] [Citado el: 31 de Enero de 2021.] <https://hidropump.com/>.
12. **ORTIZ VIDAL, Luis Enrique, CABANILLAS MAURY, Danny Eugenio y FIERRO CHIPANA, Roger Abel.** *Equilibrio hidráulico en sistemas de bombeo minero: estudio de caso.* 3, Santiago de Chile : s.n., 2010, Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, Vol. 18, págs. 339-349.
13. **FRIEDRICH GULICH, Johann.** *Centrifugal Pumps.* Segunda Edición. London New York : Springer Heidelberg Dordrecht, 2008. ISBN: 978-3-642-12823-3.
14. **DE LAS HERAS, Salvador.** *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas.* Barcelona : Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC, 2011. ISBN: 978-84-7653-893-7.
15. **SINACYT.** Reglamento de calificaciones y registro de investigadores en ciencia y tecnología del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica. *El Peruano.* 5 de diciembre de 2015.
16. **CASTILLÓN SEDANO, Cleber Víctor.** *Influencia de la automatización por telemetría en el sistema de bombeo de agua potable en la minera IRL - Corihuarmi, Yauyos - Lima 2018.* Universidad Continental. Huancayo : s.n., 2020.
17. **VIENTO, Jorge.** Bomba centrífuga vs. bomba periférica. *Hidroteco.* [En línea] 15 de Noviembre de 2019. [Citado el: 27 de Enero de 2021.]
18. **HITPASS HEYL, Bernhard.** *¿Reingeniería, rediseño o mejora de procesos de negocio?* 37, Chile : Gerencia, 2011.
19. **UNATSABAR.** *Guías para el diseño de estaciones de bombeo.* Lima : s.n., 2005.
20. **CONDEZO ACOSTA, Huston Aysen.** *Mejoramiento del sistema de bombeo y drenaje de aguas subterráneas, unidad de producción Uchucchacua- Cía de minas Buenaventura S. A .A.* Cerro de Pasco : Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2019.
21. **VOLCAN.** Unidad Miner Chungar - Volcan. [En línea] [Citado el: 25 de 03 de 2021.] <https://www.volcan.com.pe/operaciones/mineria/chungar/>.

22. **LEXICO - Oxford.** Diccionario en línea. *Significado de Stand by.* [En línea] 23 de Julio de 2021. https://www.lexico.com/definition/stand_by.
23. **SINACYT.** Reglamento de calificaciones y registro de investigadores en ciencia y tecnología del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica. *El Peruano.* 05 de diciembre de 2015, 567978.
24. **CARRASCO DÍAZ, SERGIO.** *Metodología de la investigación científica.* Lima : San Marcos, 2005.
25. **MINAS, MINISTERIO DE ENERGÍA Y.** Ministerio de energía y minas . [En línea] [Citado el: 26 de enero de 2021.] http://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu=sub149&idCateg=159.

ANEXOS

Anexo 1

Inundaciones en profundización de la mina Islay afectando las labores



Anexo 2

Cambio de bombas sumergibles de la mina Islay en la poza 21



Anexo 3

Cámara de bombeo estacionario 1 (nivel 583)



Cámara de bombeo 2 (nivel 535)



Anexo 4

Cámara de bombeo 3 (nivel 420)



Anexo 5

Cámara de bombeo 4 (nivel 370)



Anexo 6

Cámara de bombeo 7 (nivel 270)



Anexo 7

Poza de bombeo 21 (nivel 210)



Anexo 8

Poza de bombeo 24 (nivel 190)



Anexo 9

Poza de bombeo 25 (nivel 180)



Anexo 10

Cámara de bombeo estacionario nivel 210



Anexo 11

Bomba KSB WKL 150/4 en almacén de la mina Islay



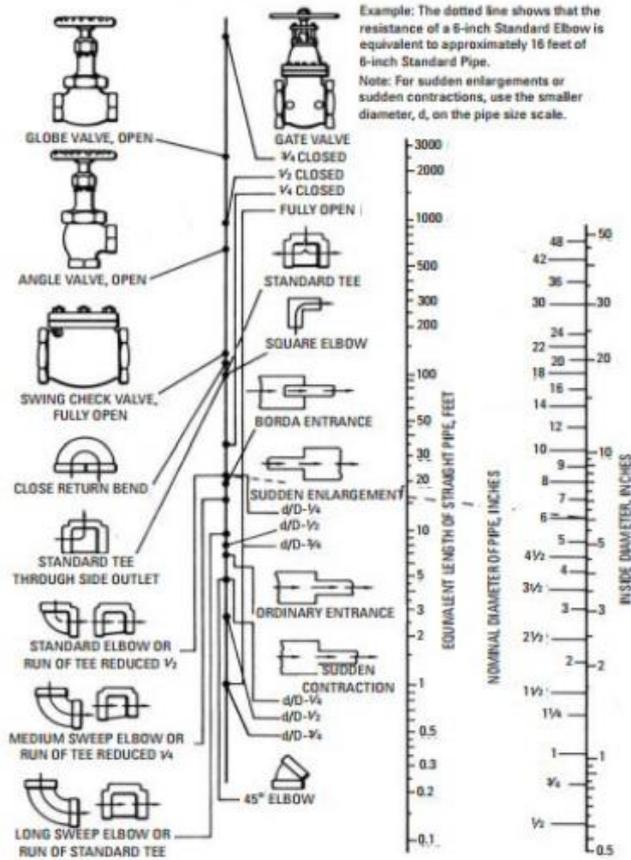
Anexo 12

Bomba sumergible de 58 HP en almacén de la mina Islay



Anexo 13

Gráfica para determinar la longitud equivalente de los accesorios principales



Anexo 14

Datos tabulados de longitudes equivalentes principales

DIAMETRO D	Radio largo	Radio medio	Radio corto	Codo 45°	Curva 90° R/D=1	Curva 90° R/D=1	Curva 45°	Entrada normal	Entrada de Borda	Válvula de compuerta abierta	Válvula tipo globo abierta	Válvula de ángulo abierta	Té paso directo	Té salida lateral	Té salida bilateral	Válvula de pie	Salida de Tubería	Válvula de retención tipo liviana	Válvula de retención tipo pesado
13	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	2,1	2,8	3,4	1,5	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

* Los valores indicados para válvulas tipo globo se aplican también a llaves para regaderas y válvulas o llaves de descarga.

Anexo 15

Presión atmosférica vs. altura sobre el nivel del mar

Altura sobre el nivel del mar		Presión atmosférica (Pa)	
m	ft	m	Pa
0	0	10.33	14.69
250	820	10.03	14.26
500	1640	9.73	13.83
750	2640	9.43	13.41
1000	3280	9.13	12.98
1250	4101	8.83	12.55
1500	4291	8.53	12.13
1750	5741	8.25	11.73
2000	6561	8.00	11.38
2250	73.81	7.75	11.02
2500	8202	7.57	10.68
2750	9022	7.28	10.35
3000	9842	7.05	10.02
3250	10662	6.83	9.71
3500	11483	6.62	9.42
3750	12303	6.41	9.12
4000	13123	6.20	8.82
4250	13943	5.98	8.52
4500	14764	5.78	8.22

Nota: tomada de Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua

Anexo 16

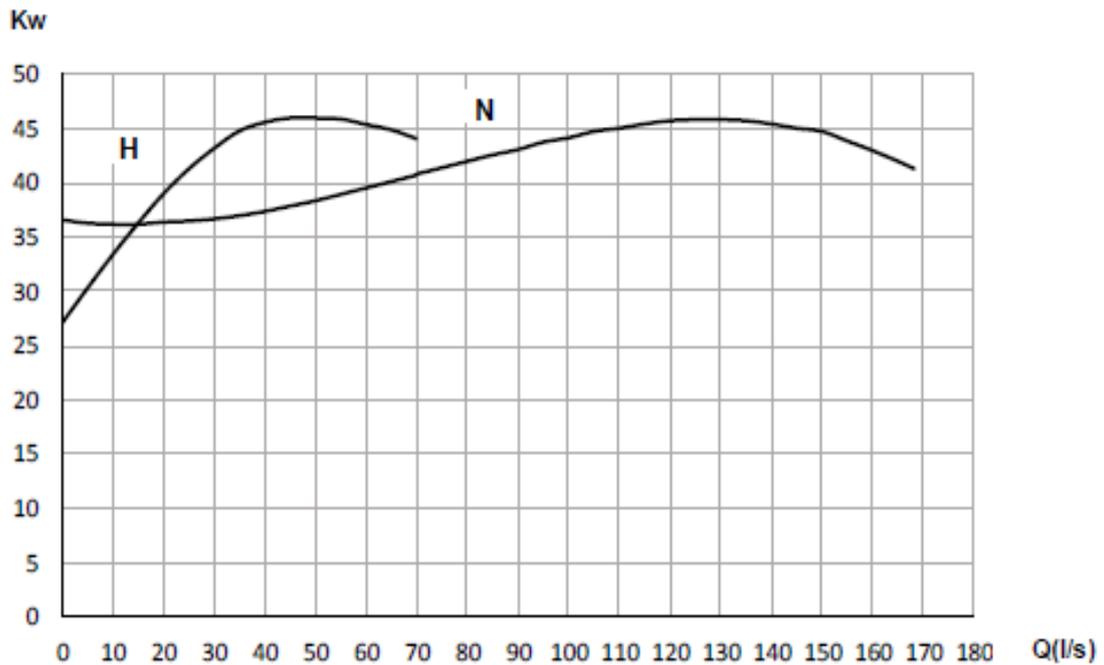
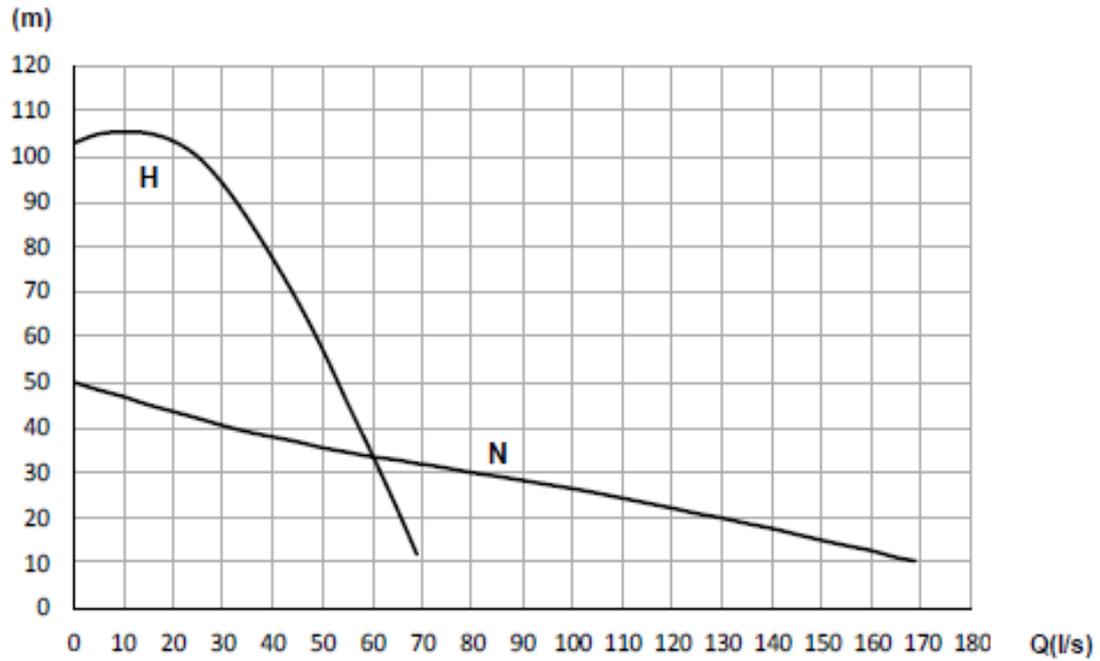
Presión de vapor vs. temperatura

Temperatura		Peso específico Kg/dm ³	Presión de vapor (P.V.P)	
C°	F°		M. Abs.	P.SI.Abs
0	32	0.9998	0.062	0.088
5	41	1.000	0.089	0.127
10	50	0.9996	0.125	0.1781
5	59	0.9990	0.174	0.247
20	68	0.9982	0.238	0.338
25	77	0.9970	0.323	0.459
30	86	0.9955	0.432	0.614
35	95	0.9939	0.573	0.815
40	104	0.9921	0.752	1.070
45	113	0.9900	0.977	1.389
50	122	0.9880	1.258	1.789
55	131	0.9857	1.605	2.283
60	140	0.9831	2.031	2.889
70	158	0.977	3.177	4.519
75	167	0.9748	3.931	5.591
80	179	0.9718	4.829	6.869
85	185	0.9687	5.894	8.383
90	194	0.9653	7.149	10.168
95	203	0.9619	8.619	12.259
100	212	0.9583	10.332	14.696

Nota: tomada de Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua

Anexo 17

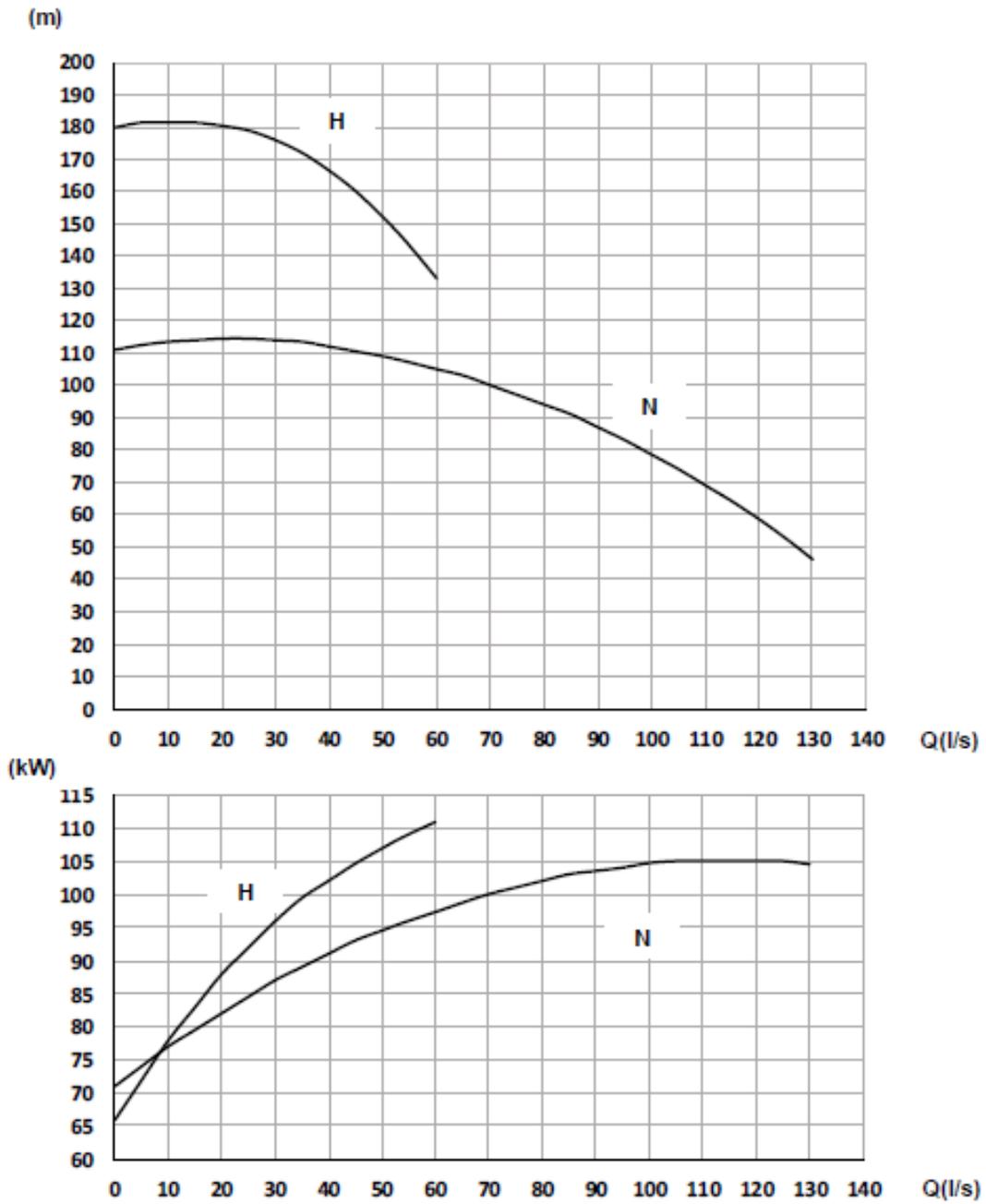
Curvas características de la bomba Gallardo (58 HP) Hidropump



Nota: tomada de ficha técnica de bombas - Hidropump

Anexo 18

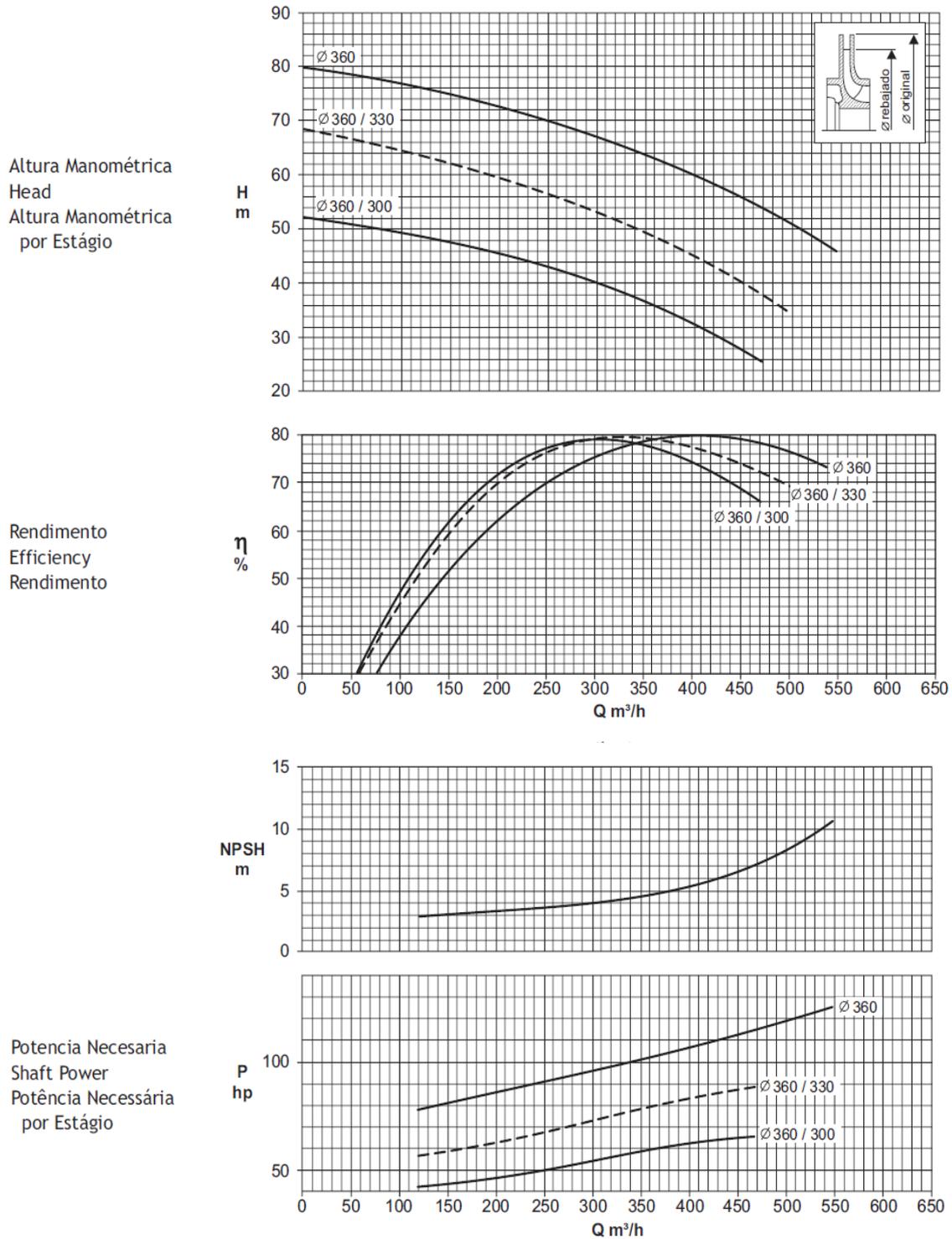
Curvas características de la bomba Reventón (150 HP) Hidropump



Nota: tomada de ficha técnica de bombas - Hidropump

Anexo 19

Curvas características de la bomba KSB WKL 150



Anexo 20

Dimensiones ASTM F714 para tuberías HDPE

DIMENSIONES ASTM F714

Diámetro Nominal (pulg.)	Diámetro prom. externo (mm)	Espesor mínimo de pared (mm)																								
		SDR -41		SDR -32.5		SDR -26		SDR -21		SDR -17		SDR -15.5		SDR -13.5		SDR -11		SDR -9.3		SDR -9		SDR -8.3		SDR -7.3		
		e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	e (mm)	Diá. interior (mm)	
1/2	21.34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.58	18.18	1.94	17.46	2.29	16.76	2.37	16.60	2.57	16.20	2.92	—
3/4	26.70	—	—	—	—	—	—	—	—	1.57	23.56	1.72	23.26	1.98	22.74	2.43	21.84	2.87	20.96	2.97	20.76	3.22	20.26	3.66	—	
1	33.40	—	—	—	—	—	—	1.59	30.22	1.96	29.48	2.15	29.10	2.47	28.46	3.04	27.32	3.59	26.22	3.71	25.98	4.02	25.36	4.58	24.24	
1 1/4	42.20	—	—	—	—	1.62	38.96	2.01	38.18	2.48	37.24	2.72	36.76	3.13	35.94	3.84	34.52	4.54	33.12	4.69	32.82	5.08	32.04	5.78	30.64	
1 1/2	48.30	—	—	—	—	1.86	44.58	2.30	43.70	2.84	42.62	3.12	42.06	3.58	41.14	4.39	39.52	5.19	37.92	5.37	37.56	5.82	36.66	6.62	35.06	
2	60.30	—	—	1.86	56.58	2.32	55.66	2.87	54.56	3.55	53.20	3.89	52.52	4.47	51.36	5.48	49.34	6.48	47.34	6.70	46.90	7.27	45.76	8.26	43.78	
2 1/2	73.03	1.78	69.47	2.25	68.53	2.81	67.41	3.48	66.07	4.30	64.43	4.71	63.61	5.41	62.21	6.64	59.75	7.85	57.33	8.11	56.81	8.80	55.43	10.00	53.03	
3	88.90	2.16	84.58	2.74	83.42	3.43	82.04	4.24	80.42	5.23	78.44	5.74	77.42	6.58	75.74	8.08	72.74	9.55	69.80	9.88	69.14	10.72	67.46	12.17	64.56	
4	114.30	2.79	108.72	3.51	107.28	4.39	105.52	5.44	103.42	6.73	100.84	7.37	99.56	8.46	97.38	10.39	93.52	12.29	89.72	12.70	88.90	13.77	86.76	15.65	83.00	
6	168.28	4.11	160.06	5.18	157.92	6.48	155.52	8.01	152.26	9.91	148.46	10.85	146.58	12.47	143.34	15.29	137.70	18.08	132.12	18.69	130.90	20.27	127.74	23.06	122.16	
7	181.00	4.42	172.16	5.56	169.88	6.96	167.08	8.64	163.72	10.67	159.66	11.68	157.64	13.41	154.18	16.46	148.08	19.46	142.08	20.12	140.76	21.79	137.42	24.79	131.42	
8	219.08	5.33	208.42	6.73	205.62	8.43	202.22	10.44	198.20	12.88	193.32	14.12	190.84	16.23	186.62	19.91	179.26	23.55	171.98	24.33	170.42	26.40	166.28	30.02	159.04	
10	273.05	6.65	259.75	8.41	256.23	10.49	252.07	13.00	247.05	16.05	240.95	17.63	237.79	20.22	232.66	24.82	223.41	29.36	214.33	30.33	212.39	32.89	207.27	37.41	198.23	
12	323.85	7.87	308.11	9.96	303.93	12.45	298.95	15.42	293.01	19.05	285.75	20.89	282.07	23.98	275.89	29.44	264.97	34.82	254.21	35.99	251.87	39.01	245.83	44.37	235.11	
14	355.60	8.66	338.28	10.95	333.70	13.67	328.26	16.94	321.72	20.93	313.74	22.94	309.72	26.34	302.92	32.33	290.94	38.23	279.14	39.52	276.56	42.85	269.90	48.72	258.16	
16	406.40	9.91	386.58	12.50	381.40	15.62	375.16	19.35	367.70	23.90	358.60	26.21	353.98	30.10	346.20	36.96	332.48	43.69	319.02	45.16	316.08	48.97	308.46	55.68	295.04	
18	457.20	—	—	14.07	429.06	17.58	422.04	21.77	413.66	26.90	403.40	29.49	398.22	33.86	389.48	41.55	374.10	49.15	358.90	50.80	355.60	—	—	62.64	331.92	
20	508.00	—	—	15.62	476.76	19.53	468.94	24.18	459.64	29.87	448.26	32.77	442.46	37.62	432.76	46.18	415.64	54.34	398.72	56.44	395.12	—	—	69.60	368.80	
24	609.60	—	—	18.77	572.10	23.44	562.72	29.03	551.54	35.76	537.88	39.32	530.96	45.16	519.28	55.42	498.76	75.56	458.48	—	—	—	—	—	—	
Presión Nominal																										

Anexo 21

Dimensiones ASTM A53 para tuberías de acero

Diámetro Nominal	Dimen. Exterior	STD		SCH-40		XS		SCH-80		SCH-160	
		Espesor Nominal	Peso								
		Pulg.	mm	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m
1/4	13.7	2.24	0.63	2.24	0.63	3.02	0.80	3.02	0.80	-	-
3/8	17.1	2.31	0.84	2.31	0.84	3.20	1.10	3.20	1.10	-	-
1/2	21.3	2.77	1.27	2.77	1.27	3.73	1.62	3.73	1.62	4.78	1.95
3/4	26.7	2.87	1.69	2.87	1.69	3.91	2.20	3.91	2.20	5.56	2.90
1	33.4	3.38	2.50	3.38	2.50	4.55	3.24	4.55	3.24	6.35	4.24
1 1/4	42.2	3.56	3.39	3.56	3.39	4.85	4.47	4.85	4.47	6.35	5.61
1 1/2	48.3	3.68	4.05	3.68	4.05	5.08	5.41	5.08	5.41	7.14	7.25
2	60.3	3.91	5.44	3.91	5.44	5.54	7.48	5.54	7.48	8.74	11.11
2 1/2	73.0	5.16	8.63	5.16	8.63	7.01	11.41	7.01	11.41	9.53	14.92
3	88.9	5.49	11.29	5.49	11.29	7.62	15.27	7.62	15.27	11.13	21.35
4	114.3	6.02	16.07	6.02	16.07	8.56	22.32	8.56	22.32	13.49	33.54
5	141.3	6.55	21.77	6.55	21.77	9.53	30.97	9.53	30.97	15.88	49.12
6	168.3	7.11	28.26	7.11	28.26	10.97	42.56	10.97	42.56	18.26	67.57
8	219.1	8.18	42.55	8.18	42.55	12.70	64.64	12.70	64.64	23.01	111.27
10	273.0	9.27	60.29	9.27	60.29	12.70	81.55	15.09	95.98	28.58	172.27
12	323.8	9.53	73.88	10.31	79.71	12.70	97.46	17.48	132.05	33.32	238.69
14	355.6	9.53	81.33	11.13	94.55	12.70	107.39	19.05	158.11	35.71	281.72
16	406.4	9.53	93.27	12.70	123.31	12.70	123.30	21.44	203.54	40.49	365.38
18	457	9.53	105.16	14.27	155.81	12.70	139.15	23.83	254.57	45.24	459.39
20	508	9.53	117.15	15.09	183.43	12.70	155.12	26.19	311.19	50.01	564.85
22	559	9.53	129.13	-	-	12.70	171.09	28.58	373.85	53.98	672.30
24	610	9.53	141.12	17.48	255.43	12.70	187.06	30.96	442.11	59.54	808.27

Anexo 22

Factor de fricción para tuberías HDPE

Factor fricción

Material	Hierro fundido	Acero	PVC	HDPE	Concreto	Manguera
ε nuevo (mm)	0,25	0,10	0,05	0,05	0,50	0,25
ε used (mm)	1,00	0,25	0,25	0,25	3,00	1,00

Anexo 23

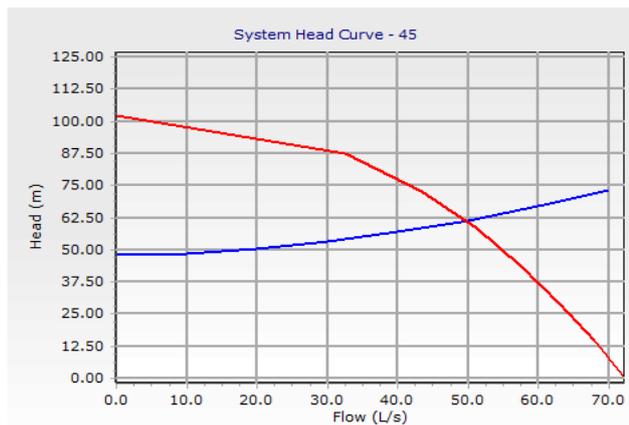
Reporte Watercad de la curva del sistema en el tramo 1

System Head Curve Detailed Report - System Head Curve - 45

Element Details			
Label	System Head Curve - 45	Maximum Flow	70.0 L/s
Pump	B-3	Number of Intervals	7

Time (hours)
0.000

0.000 hours Flow (L/s)	0.000 hours Head (m)	BOMBA DE 58 HP Flow (L/s)	BOMBA DE 58 HP Head (m)
0.0	48.00	72.3	0.00
10.0	48.68	67.9	14.57
20.0	50.46	63.0	29.14
30.0	53.22	57.5	43.71
40.0	56.90	51.1	58.29
50.0	61.45	43.3	72.86
60.0	66.86	32.6	87.43
70.0	73.09	0.0	102.00



Anexo 24

Reporte Watercad de la curva del sistema en el tramo 2

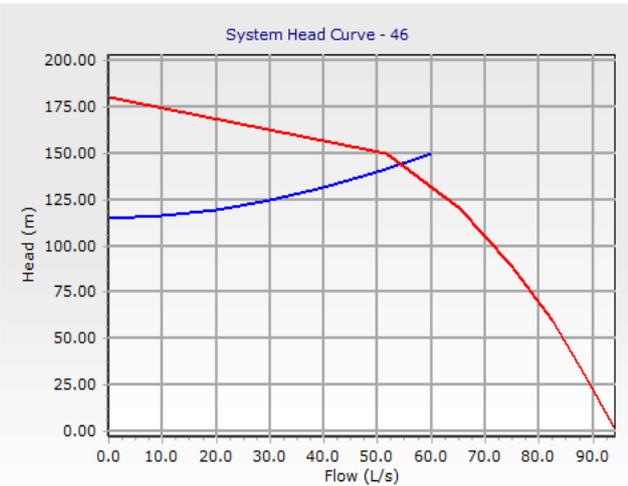
System Head Curve Detailed Report - System Head Curve - 46

Element Details

Label	System Head Curve - 46	Maximum Flow	60.0 L/s
Pump	B-27	Number of Intervals	6

Time (hours)	
0.000	0.000

0.000 hours Flow (L/s)	0.000 hours Head (m)	BOMBA DE 150 HP Flow (L/s)	BOMBA DE 150 HP Head (m)
0.0	115.00	94.3	0.00
10.0	116.25	88.7	30.00
20.0	119.51	82.3	60.00
30.0	124.55	74.7	90.00
40.0	131.27	65.1	120.00
50.0	139.60	51.6	150.00
60.0	149.48	0.0	180.00



Anexo 25

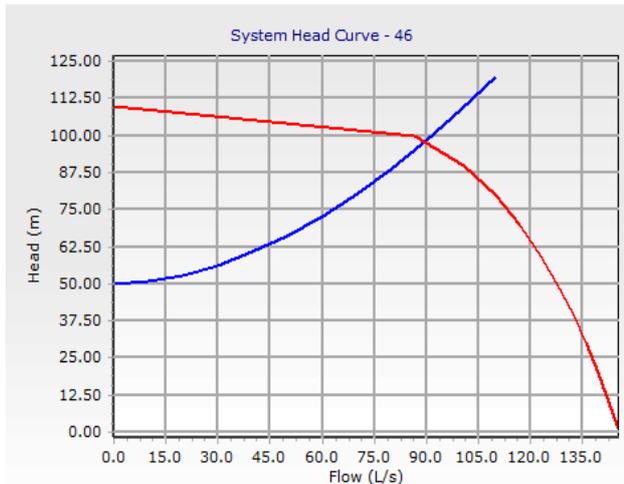
Reporte Watercad de la curva del sistema en el tramo 3 – tubería de 8”

System Head Curve Detailed Report - System Head Curve - 46

Element Details			
Label	System Head Curve - 46	Maximum Flow	110.0 L/s
Pump	B-22	Number of Intervals	11

Time (hours)
0.000

0.000 hours Flow (L/s)	0.000 hours Head (m)	BOMBE DE 150 HP N Flow (L/s)	BOMBE DE 150 HP N Head (m)
0.0	50.00	145.6	0.00
10.0	50.82	142.7	10.00
20.0	52.98	139.5	20.00
30.0	56.31	136.0	30.00
40.0	60.74	132.1	40.00
50.0	66.24	127.8	50.00
60.0	72.76	122.8	60.00
70.0	80.28	117.1	70.00
80.0	88.78	110.0	80.00
90.0	98.23	100.8	90.00
100.0	108.62	86.8	100.00
110.0	119.94	0.0	110.00



Anexo 26

Reporte Watercad de la curva del sistema en el tramo 3 – tubería de 6" paralelo

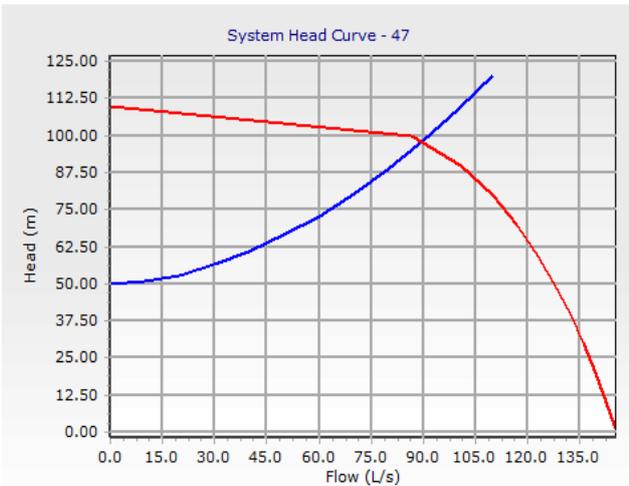
System Head Curve Detailed Report - System Head Curve - 47

Element Details

Label	System Head Curve - 47	Maximum Flow	110.0 L/s
Pump	B-23	Number of Intervals	11

Time (hours)
0.000

0.000 hours Flow (L/s)	0.000 hours Head (m)	BOMBE DE 150 HP N Flow (L/s)	BOMBE DE 150 HP N Head (m)
0.0	50.00	145.6	0.00
10.0	50.83	142.7	10.00
20.0	52.99	139.5	20.00
30.0	56.34	136.0	30.00
40.0	60.80	132.1	40.00
50.0	66.32	127.8	50.00
60.0	72.87	122.8	60.00
70.0	80.43	117.1	70.00
80.0	88.97	110.0	80.00
90.0	98.47	100.8	90.00
100.0	108.91	86.8	100.00
110.0	120.29	0.0	110.00



Reporte Watercad de la curva del sistema en el tramo 4

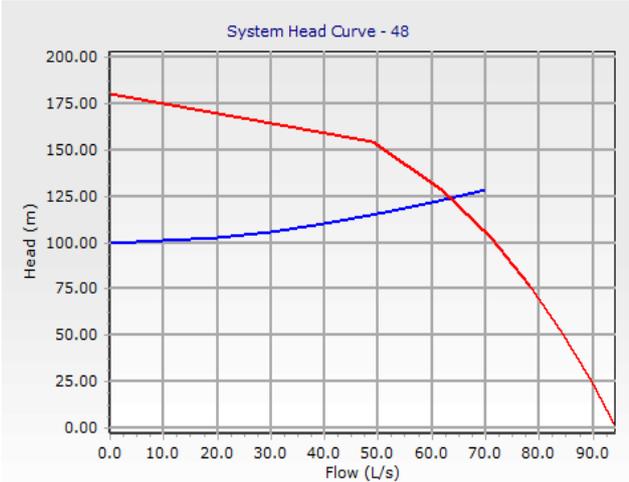
System Head Curve Detailed Report - System Head Curve - 48

Element Details

Label	System Head Curve - 48	Maximum Flow	70.0 L/s
Pump	B-32	Number of Intervals	7

Time (hours)
0.000

0.000 hours Flow (L/s)	0.000 hours Head (m)	BOMBA DE 150 HP Flow (L/s)	BOMBA DE 150 HP Head (m)
0.0	100.00	94.3	0.00
10.0	100.77	89.5	25.71
20.0	102.79	84.2	51.43
30.0	105.91	78.1	77.14
40.0	110.07	70.9	102.86
50.0	115.23	61.8	128.57
60.0	121.34	49.0	154.29
70.0	128.39	0.0	180.00



Anexo 27

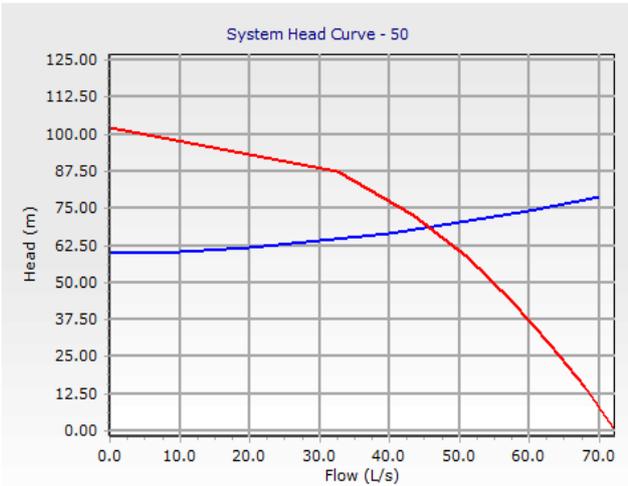
Reporte Watercad de la curva del sistema en el tramo 5 – Tubería de 8”

System Head Curve Detailed Report - System Head Curve - 50

Element Details			
Label	System Head Curve - 50	Maximum Flow	70.0 L/s
Pump	B-16	Number of Intervals	7

Time (hours)
0.000

0.000 hours Flow (L/s)	0.000 hours Head (m)	BOMBA DE 58 HP Flow (L/s)	BOMBA DE 58 HP Head (m)
0.0	60.00	72.3	0.00
10.0	60.52	67.9	14.57
20.0	61.86	63.0	29.14
30.0	63.94	57.5	43.71
40.0	66.72	51.1	58.29
50.0	70.16	43.3	72.86
60.0	74.24	32.6	87.43
70.0	78.94	0.0	102.00



Anexo 28

Reporte Watercad de la curva del sistema en el tramo 5 – tubería de 4" paralelo

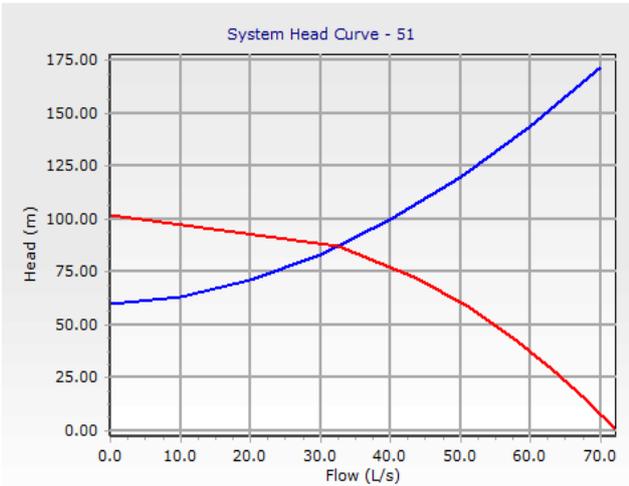
System Head Curve Detailed Report - System Head Curve - 51

Element Details

Label	System Head Curve - 51	Maximum Flow	70.0 L/s
Pump	B-42	Number of Intervals	7

Time (hours)
0.000

0.000 hours Flow (L/s)	0.000 hours Head (m)	BOMBA DE 58 HP Flow (L/s)	BOMBA DE 58 HP Head (m)
0.0	60.00	72.3	0.00
10.0	63.04	67.9	14.57
20.0	70.96	63.0	29.14
30.0	83.22	57.5	43.71
40.0	99.55	51.1	58.29
50.0	119.80	43.3	72.86
60.0	143.81	32.6	87.43
70.0	171.51	0.0	102.00



Anexo 29

Reporte Watercad de la curva del sistema en el tramo 6 – tubería de 8”

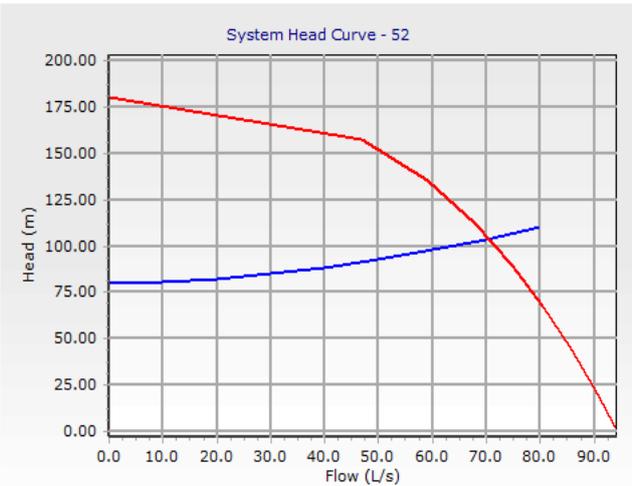
System Head Curve Detailed Report - System Head Curve - 52

Element Details

Label	System Head Curve - 52	Maximum Flow	80.0 L/s
Pump	B-13	Number of Intervals	8

Time (hours)	
	0.000

0.000 hours Flow (L/s)	0.000 hours Head (m)	BOMBA DE 150 HP Flow (L/s)	BOMBA DE 150 HP Head (m)
0.0	80.00	94.3	0.00
10.0	80.64	90.2	22.50
20.0	82.33	85.6	45.00
30.0	84.93	80.5	67.50
40.0	88.40	74.7	90.00
50.0	92.69	67.8	112.50
60.0	97.79	59.1	135.00
70.0	103.67	46.8	157.50
80.0	110.31	0.0	180.00



Anexo 30

Reporte Watercad de la curva del sistema en el tramo 6 – tubería de 4”

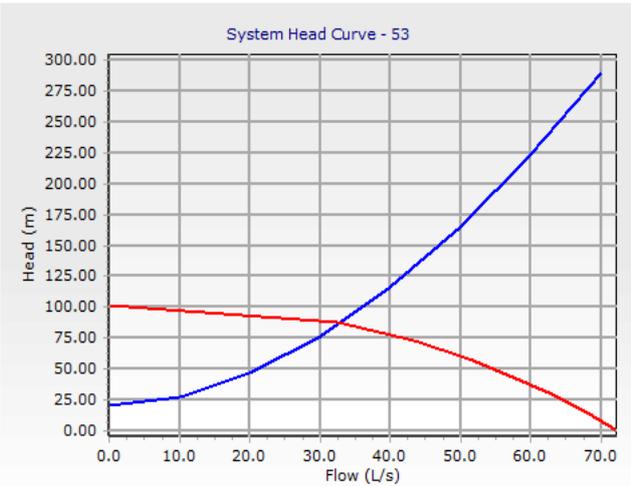
System Head Curve Detailed Report - System Head Curve - 53

Element Details

Label	System Head Curve - 53	Maximum Flow	70.0 L/s
Pump	B-14	Number of Intervals	7

Time (hours)	
	0.000

0.000 hours Flow (L/s)	0.000 hours Head (m)	BOMBA DE 58 HP Flow (L/s)	BOMBA DE 58 HP Head (m)
0.0	20.00	72.3	0.00
10.0	27.35	67.9	14.57
20.0	46.54	63.0	29.14
30.0	76.24	57.5	43.71
40.0	115.81	51.1	58.29
50.0	164.84	43.3	72.86
60.0	223.02	32.6	87.43
70.0	290.10	0.0	102.00



Anexo 31

Reporte Watercad de la curva del sistema en el tramo 6 – tubería de 8”

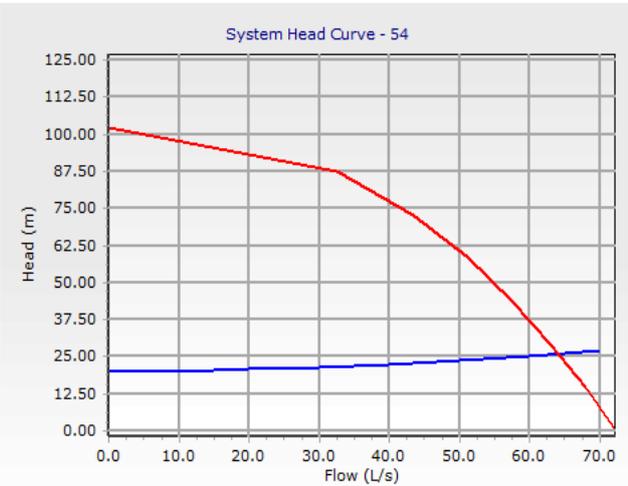
System Head Curve Detailed Report - System Head Curve - 54

Element Details

Label	System Head Curve - 54	Maximum Flow	70.0 L/s
Pump	B-43	Number of Intervals	7

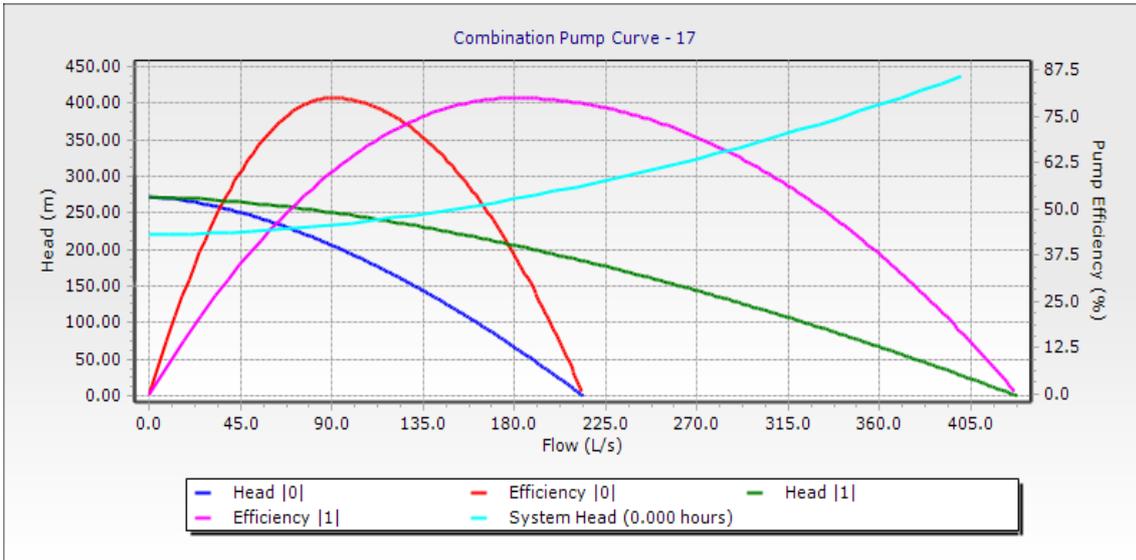
Time (hours)
0.000

0.000 hours Flow (L/s)	0.000 hours Head (m)	BOMBA DE 58 HP Flow (L/s)	BOMBA DE 58 HP Head (m)
0.0	20.00	72.3	0.00
10.0	20.19	67.9	14.57
20.0	20.70	63.0	29.14
30.0	21.49	57.5	43.71
40.0	22.53	51.1	58.29
50.0	23.83	43.3	72.86
60.0	25.36	32.6	87.43
70.0	27.13	0.0	102.00



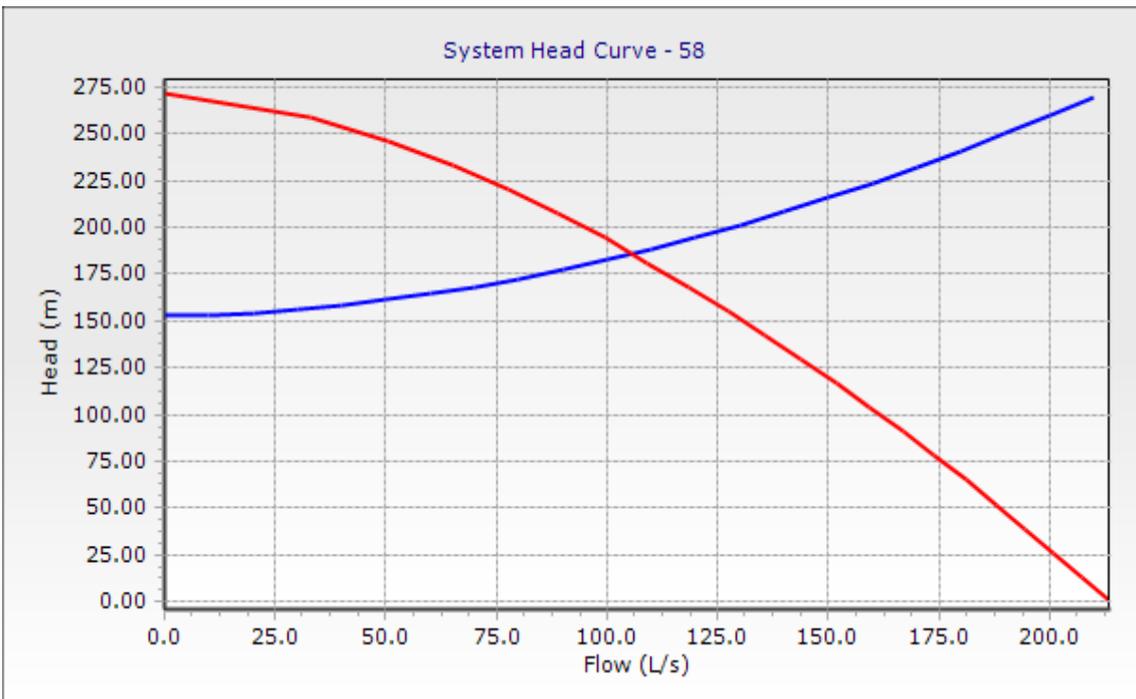
Anexo 32

Gráfico Watercad de la cámara de bombeo en el nivel 210



Anexo 33

Gráfico Watercad de la cámara de bombeo en el nivel 430



Anexo 34

Contrato de alquiler de bombas sumergibles

ANEXO 1:

PROPUESTA ECONOMICA

CIA MINERA CHUNGAR S.A. pagará a EL ARRENDADOR una tarifa mensual de acuerdo con lo estipulado en el presente Anexo 01. Las bombas sumergibles están dotadas de cables eléctricos de fuerza y control con un mínimo de 20 metros y un máximo de 50 metros.

El costo de alquiler de las bombas sumergibles incluye tableros eléctricos y campanas de descarga. Los accesorios son proporcionados por CIA MINERA CHUNGAR S.A.

El transporte de los equipos de bombeo a los almacenes de CIA MINERA CHUNGAR S.A. en Lima será a cuenta de EL ARRENDADOR.

BOMBAS CON TABLERO + SERVICIO DE MONITOREO PERMANENTE						
ITEM	EQUIPO	TIPO	POTENCIA HP	CANTIDAD	P.U. US\$/MENSUAL	TOTAL MENSUAL
1	BOMBA DE AGUA	H/N	15	3	\$865.00	\$1,995.00
2	BOMBA DE AGUA	H/N	30	4	\$1,000.00	\$4,000.00
3	BOMBA DE AGUA	H/N	58	10	\$1,150.00	\$11,500.00
4	BOMBA DE AGUA	H/N	150	15	\$3,150.00	\$47,250.00
TOTAL						US\$ 64,754.00
1	BOMBA DE LODO		10	2	821.42	\$1,642.84
TOTAL						US\$ 1,642.42

BOMBAS STAND BY						
ITEM	EQUIPO	TIPO	POTENCIA HP	CANTIDAD	P.U. US\$/MENSUAL	TOTAL MENSUAL
1	BOMBA DE AGUA	H/N	15	2	\$0.00	\$0.00
2	BOMBA DE AGUA	H/N	30	2	\$0.00	\$0.00
3	BOMBA DE AGUA	H/N	58	3	\$0.00	\$0.00
4	BOMBA DE AGUA	H/N	150	4	\$0.00	\$0.00
TOTAL						

Las bombas consideradas como stand by (20% del total de bombas en arrendamiento), son instaladas en las pozas de bombeo, sin valorizar hasta que ingresen a trabajar, con el objetivo de dar confiabilidad al sistema de bombeo.

Anexo 35

Costo de repuestos de la bomba WKL

Cotización: 003038						
Fecha 16/01/2019		Responsable: Israel De la Cruz Perez				
KSB PERU S.A.		Telf. : +51 1 422-8303				
Av. Los Eucaliptos N° 371 Int. 40		Fax : +51 1 422-2350				
Santa Genoveva - Lurin Lima - Perú		E_Mail: israeldelacruz@ksb.pe				
www.ksb.com/ksb-pe						
<p>Señores</p> <p>Cia. Minera Chungar S.A.</p> <p>RUC N°: 20514608041</p> <p>Responsable: Carlos Barturen</p> <p>Email: cbarturen@volcan.com.pe</p>						
PROPUESTA TECNICO-COMERCIAL						
#	Cant.	Código	Material	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	1.00	01802124	A743 GR CA6NM	DIFUSOR WKL150 ULT.EST	USD 1,922.20	USD 1,922.20
2	3.00	01802122	A743 GR CA6NM	DIFUSOR WKL150	USD 2,272.89	USD 6,818.67
3	1.00	02199646	SAE 1045	EJE WKL 150/04/LS	USD 837.00	USD 837.00
4	4.00	02200161	A743 GR CA6NM	IMPELLER WKL150 - A743 GR CA6NM	USD 1,299.14	USD 5,196.56
5	8.00	02300168	A743 GR CA6NM	ANILLO ROZANTE 200/220X15	USD 1,085.83	USD 8,686.64
6	1.00	02250953	AISI 420	CASQU PROTEC EJE WKL150L/S	USD 987.18	USD 987.18
7	1.00	02250954	AISI 420	CASQU PROTEC EJE WKL150L/R	USD 985.90	USD 985.90
8	1.00	02250801	AISI 420	CASQU PROTEC EJE WKL150 MTERM.	USD 499.14	USD 499.14
9	1.00	02200124	AISI316	CASQUILLO DISTAN WKL150	USD 909.39	USD 909.39
10	1.00	02200124	AISI316	CASQUILLO DISTAN WKL150	USD 909.39	USD 909.39
11	1.00	02199540	SAE 1045	TUERCA DE 2 PLANAS WKL150 M52X1,5	USD 48.22	USD 48.22
12	2.00	02134156	FST+GAL ZN	ANILLO DE SEGURIDAD 60 X 2	USD 3.15	USD 6.30
13	2.00	02199578	A48 CL 30B	PRENSAESTOPAS DN78 FORMA C	USD 81.92	USD 163.84
14	1.00	02134155	A48 CL 30B	CASQUILLO DE APRIETEH213	USD 23.63	USD 23.63
15	3.00	02199806	AISI 420	CASQUILLO ESCALÓ WKL150	USD 222.92	USD 668.76
Total General						USD 28,662.62

Anexo 36

Certificado de prácticas preprofesionales realizadas en Volcan Compañía
Minera S. A. A. – Unidad Chungar



Certificado de Prácticas Pre Profesionales

Por el presente documento, certificamos que el Sr. **CLEO ALEX ALARCON VASQUEZ** realizó Prácticas Pre Profesionales en **COMPAÑINA MINERA CHUNGAR S.A.C.** desde el **07 de enero de 2020** hasta el **31 de marzo de 2020**, en la **SUPERINTENDENCIA DE MANTENIMIENTO**.

Se expide la presente Constancia de Prácticas Pre Profesionales a su solicitud y para los fines que estime conveniente.

Lima, 31 de marzo de 2020.



RENZO MUENTE BARZOTTI
GERENTE CORPORATIVO DE GESTION HUMANA

Av. Manuel Olguín 373
Santiago de Surco
Telf. (511) 416-7000
atremolada@volcan.com.pe
www.volcan.com.pe