



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Cálculo hidráulico del sistema de bombeo de agua
fresca para la planta minera Las Bambas Cuzco**

INFORME PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

Modalidad de Titulación M-4

AUTOR

Alonso Rodrigo FARFAN HERRERA

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Farfan, A. (2022). *Cálculo hidráulico del sistema de bombeo de agua fresca para la planta minera Las Bambas Cuzco*. [Informe profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Alonso Rodrigo Farfan Herrera
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	44920545
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-3944-232X
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Miguel Angel Ormeño Valeriano
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06532600
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Henry Manuel Pala Reyes
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	15860791
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Reuter Arturo Aliaga Díaz
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07229778
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.5.1. Energética
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Propia
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Cuzco Provincia: Cuzco Distrito: Challhuahuacho Latitud: -14° 05' 56" Longitud: -72° 19' 11"

Año o rango de años en que se realizó la investigación	2020
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería mecánica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01



**ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DEL INFORME PROFESIONAL PARA
OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS
POR LA MODALIDAD DE TITULACIÓN M-4 – POR EXPERIENCIA
PROFESIONAL**

Siendo las 20:00 horas del día viernes 1° de julio de 2022, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la presidencia del Dr. Ing. MIGUEL ÁNGEL ORMEÑO VALERIANO y con la asistencia de los miembros Ing. REUTER ARTURO ALIAGA DÍAZ y Mg. Ing. HENRY MANUEL PALA REYES, se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación del Informe Profesional para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad de Titulación M-4 – Por Experiencia Profesional, del Bachiller:

ALONSO RODRIGO FARFAN HERRERA

El Presidente del Jurado Examinador dio lectura del Resumen del Expediente, e invitó al Bachiller ALONSO RODRIGO FARFAN HERRERA, a realizar la Exposición del Informe Profesional titulado “CÁLCULO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA FRESCA PARA LA PLANTA MINERA LAS BAMBAS CUZCO”.

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado Examinador, el Presidente invitó al Bachiller abandonar momentáneamente la sala de sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la sala de sesión para dar lectura a la calificación final obtenida por el Bachiller, la misma que fue:

DIECISEIS 16

El Presidente del Jurado Dr. Ing. MIGUEL ÁNGEL ORMEÑO VALERIANO, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller ALONSO RODRIGO FARFAN HERRERA Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 21:00 horas, del mismo día, se levantó la sesión.

DR. ING. MIGUEL ÁNGEL ORMEÑO VALERIANO
Presidente del Jurado

ING. REUTER ARTURO ALIAGA DÍAZ
Miembro del Jurado

MG. ING. HENRY MANUEL PALA REYES
Miembro del Jurado



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS



UNMSM

Firmado digitalmente por LOZANO
BARTRA Whualkuer Enrique FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 14.07.2022 07:54:01 -05:00

DR. WHUALKUER ENRIQUE LOZANO BARTRA
VICEDECANO ACADÉMICO FCF

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

<https://us06web.zoom.us/j/81379036351?pwd=cVFiek9YbnlXQVEzZkIVVHM3UW5iUT09>

ID: ID de reunión: 813 7903 6351

Código de acceso: 274041

Grabación archivada en el siguiente enlace:

<https://www.facebook.com/FCFUNMSM/videos/401029572091146/>

Anexo 1

Informe de evaluación de Originalidad

1. Facultad de Ciencias Físicas
2. Escuela/Unidad de Posgrado
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos
3. Autoridad Académica que emite el informe de originalidad
El Director de la EPIMF
4. Apellidos y nombres de la autoridad académica
Sarango Julca Douglas Donal
5. Operador del programa Informático de similitudes
Dr. Ing. Douglas Sarango Julca
6. Documento evaluado (1)
"CÁLCULO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA FRESCA PARA LA PLANTA MINERA LAS BAMBAS CUZCO"
7. Autor del documento (2)
ALONSO RODRIGO FARFAN HERRERA
8. Fecha de recepción del documento 5/03/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes 5/03/22
10. Software utilizado
 - Turnitin (X)
 - Ithenticate
 - Otro (especificar)
11. Configuración del programa detector de similitudes
 - Excluye textos entrecomillados
 - Incluye Bibliografía
 - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes³
8%
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas⁴
Ver Anexo
14. Observaciones
Ninguna
15. Calificación de originalidad
 - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones (X)
 - Documento cumple criterios de originalidad, con observaciones
 - Documento no cumple criterios de originalidad
16. Fecha del Informe 12 /07 /22



UNMSM

Firmado digitalmente por SARANGO
JULCA Douglas Donal FAU
20148092262 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 13.07.2022 19:58:40 -05:00

DR. ING. Douglas Sarango Julca

DIRECTOR (e) DE LA EPIMF

1 Otro (especificar) Informe Profesional Modalidad de Titulación M-4

2 Apellidos y Nombres completos

3 En letras y números

4 Indicarlas en orden decreciente y su respectivo porcentaje



DEDICATORIA

A mi padre Bernardino y a mi madre Susana como muestra de agradecimiento de su amor incomparable e incondicional hacia mi persona.

A mis hermanos Dino, Jorge y Claudia por brindarme valores que permiten mejorar día a día como persona.

Y a mis sobrinos Joaquín, Alejandra, Alessandra y Graciela como ejemplo de superación en su futura vida académica.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

AGRADECIMIENTOS

Al grupo Cumbra (Ex Graña y Montero), por brindarme el honor de pertenecer a su personal staff, compartiendo experiencia en cada proyecto de gran envergadura realizado en el Perú y en el exterior.

A los catedráticos de la escuela profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Por su apoyo académico y moral en la formación de los futuros profesionales mecánicos de fluidos en el Perú.

A mis amistades Julio Juárez, José Marcilla, Aldo Carrera, Martha Lazarte, Eloy Rodríguez, Frank Rodríguez, Guillermo Tataje, Jhean Melgar, Erwan Peña y Jan Calvo, por brindarme soporte a lo largo de la carrera profesional tanto en lo laboral y en lo personal, por compartir sus experiencias laborales y académicas hacia mi persona.



ÍNDICE DE CONTENIDO

1	Capítulo I-Condiciones Generales	10
1.1	Introducción	10
1.2	Procesos de producción de la mina Las Bambas.....	11
1.3	Antecedentes	13
1.4	Objetivos	14
1.4.1	Objetivo General.....	14
1.4.2	Objetivos Específicos.....	14
1.5	Motivación	14
1.6	Limitaciones del Tema	15
1.7	Códigos de Diseño	16
1.8	Sistema de Unidades	17
1.9	Definiciones y Abreviaciones	17
2	Capítulo II-Fundamentos Teóricos	19
2.1.	Teoría de Mecánica de Fluidos	19
2.2.	Sistema Internacional de Unidades	19
2.3.	Propiedades de los fluidos.....	21
2.3.1.	La densidad (ρ)	21
2.3.2.	El peso específico (γ).....	21
2.3.3.	La temperatura (T)	22

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

2.3.4.	La presión (p).....	22
2.3.5.	La viscosidad	23
2.4.	Ecuación de Bernoulli.....	24
2.5.	Ecuación general de la energía.....	26
2.6.	Caudal.....	27
2.7.	Número de Reynolds, Flujo Laminar y Flujo Turbulento.....	27
2.8.	Ecuación de Darcy y Weisbach y Colebrook- White.....	28
2.9.	Fluido Newtoniano y No Newtoniano	30
2.10.	Pérdidas de energía en un sistema de tuberías.....	31
2.11.	Gradiente Hidráulico (HGL), MAOH y TDH.....	31
2.12.	Altura Neta Positiva en la succión (NPSH).....	32
3	Capítulo III-Descripción del Problema.....	34
3.1.	Descripción del Pipeline.....	34
4	Capítulo IV-Bases y Criterio de Diseño	35
4.1.	Datos de entrada.....	35
4.2.	Escenarios de operación.....	38
4.3.	Perfiles.....	39
4.4.	Análisis de diámetro económico	41
4.4.1.	Bases de estimación	41
4.4.2.	Costo capital.....	43

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

4.4.3.	Costo operativo	43
4.4.4.	Costos no incluidos	44
4.4.5.	Metodología	44
4.4.6.	Análisis de diámetro económico: Tubería de acero desnudo.....	45
4.4.7.	Análisis de diámetro económico: Tubería de acero desnudo / HDPE	49
4.4.8.	Análisis de diámetro económico: Tubería de acero desnudo / PEX.....	53
4.5.	Comparativo de análisis de rentabilidad	57
5	Capítulo V-Diseño hidráulico	59
5.1.	Estación de bombeo de agua fresca.....	59
5.1.1.	Selección de diámetro	59
5.1.2.	Parámetros hidráulicos del pipeline	59
5.1.3.	Perfil hidráulico	60
5.1.1.	Cálculo del TDH sistema crítico (eventual).....	62
5.1.2.	Cálculo de la potencia útil (sistema eventual)	72
5.1.3.	Cálculo de la potencia útil (sistema nominal).....	72
5.1.4.	Cálculo del NPSH.....	73
5.1.5.	Requerimientos de bombeo.....	74
5.2.	Tubería de descarga – camión cisterna	76
6	Conclusiones	79
7	Recomendaciones y aportes	80

8	Bibliografía	81
9	Anexos.	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Ubicación geográfica del proyecto Las Bambas.	10
Figura 1-2:	Diagrama de flujo del proceso de producción de cobre	12
Figura 2-1:	Línea de nivel de energía y línea de altura motriz y constante Bernoulli.....	25
Figura 2-2:	Sistema de flujo para la ecuación general de la energía.	27
Figura 2-3:	Diagrama de Moody para flujos en sección circular.	30
Figura 2-4:	Esquema para el cálculo del NPSHa.	32
Figura 4-1:	Esquema de operación normal.....	38
Figura 4-2:	Esquema de operación eventual (llenado de tanque SCI).....	39
Figura 4-3:	Perfil – Agua fresca reservorio Chuspipi a tanque del SCI.....	40
Figura 4-4:	Perfil de la tubería de alimentación a cisternas para supresión de polvo	41
Figura 4-5:	Diámetro económico tubería de acero desnudo.	47
Figura 4-6:	HGL – Tubería de acero desnudo NPS 4” (año 20).	48
Figura 4-7:	Diámetro económico tubería acero desnudo / HDPE	51
Figura 4-8:	HGL – Tubería de acero desnudo NPS 4” / HDPE PE4710 6” SDR7 (año 20).	52
Figura 4-9:	Diámetro económico tubería de acero desnudo / PEX.	55
Figura 4-10:	HGL – Tubería de acero desnudo NPS 4” / PEX 160mm Clase 30 (año 20).	56

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 4-11: Comparativo de rentabilidad.....	58
Figura 5-1: HGL-Tubería de acero desnudo NPS 4” / PEX 160 mm Clase 30 – Operación nominal (20 años).	61
Figura 5-2: HGL – Tubería de acero desnudo NPS 4” / PEX 160 mm Clase 30 – Operación eventual (20 años).	62
Figura 5-3: Esquema del sistema eventual.	70
Figura 5-4: Resultados del modelamiento.	71
Figura 5-5: Condiciones de operación.	75
Figura 5-6: Tubería de descarga hacia tanque cisterna.	77
Figura 5-7: HGL – Análisis de tiempo extendido del tanque de almacenamiento de agua fresca.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Tabla del Sistema internacional de Unidades.	19
Tabla 2-2: Pesos específicos de algunos fluidos comunes.....	22
Tabla 2-3: Viscosidad dinámica de fluidos.....	24
Tabla 2-4: Valores de coeficiente de rugosidad para conductos nuevos y limpios.	29
Tabla 4-1: Condiciones del sitio para el sistema.	35
Tabla 4-2: Consideraciones hidráulicas para el sistema.	35
Tabla 4-3: Propiedades de transporte de agua fresca para el sistema.	36
Tabla 4-4: Caudal requerido para camiones cisterna.	36
Tabla 4-5: Caudal mínimo, tanque de sistema contra incendios.	37
Tabla 4-6: Requerimientos de caudal nominal y eventual.....	38

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Tabla 4-7: Resumen de costos de material instalado.	43
Tabla 4-8: Requerimientos hidráulicos y dimensionamiento tubería de acero desnudo. .	45
Tabla 4-9: Análisis de diámetro económico – Tubería de acero desnudo.	46
Tabla 4-10: Requerimientos hidráulicos y dimensionamiento tubería de acero desnudo.	49
Tabla 4-11: Análisis de diámetro económico – tubería de acero desnudo / HDPE.....	50
Tabla 4-12: Requerimientos hidráulicos y dimensionamiento tubería acero desnudo.	53
Tabla 4-13: Análisis de diámetro económico – Tubería de acero desnudo / PEX.....	54
Tabla 4-14: Costos de los más rentables de los 03 sistemas propuestos.	57
Tabla 5-1: Parámetros hidráulicos del pipeline.....	60
Tabla 5-2: Valores de ingreso del sistema nominal.	63
Tabla 5-3: Valores de f para cada tramo.	68
Tabla 5-4: Parámetros para hallar el NPSH.....	73
Tabla 5-5: Requerimientos de bombeo.....	74

ANEXOS

Anexo 1: Energía teórica en kilowatts.....	83
Anexo 2: Dimensiones de la tubería de acero al carbono.....	84
Anexo 3: Propiedades del aire.	85
Anexo 4: Rugosidad de diversos materiales (1/2).	86
Anexo 5: Rugosidad de diversos materiales (2/2).	87
Anexo 6: Tipo de válvulas (1/2).	88
Anexo 7: Tipo de válvulas (2/2).	89

Palabras claves: Piping, tuberías, Pipeline, cálculo, diseño.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Capítulo I-Condicionales Generales

1.1 Introducción

MMG Limited (MMG) opera la mina Las Bambas, una operación de Cobre y Molibdeno de clase mundial ubicada en los Andes al sur de Perú, aproximadamente a 75km S – SO de Cusco y a alrededor de 300km N – NO de Arequipa y aproximadamente a 150km al NO de Espinar (Ver Figura 1-1). Las Bambas es una sociedad conformada por 3 empresas: la operadora MMG (62.5%), una subsidiaria de Guoxin International Investment Co. Ltd (22.5%) y CITIC Metal Co. Ltd (15.0%).

Figura 1-1: Ubicación geográfica del proyecto Las Bambas.



Nota: Adaptado de Google Earth (<https://earth.google.com/web>)

La mina Las Bambas entró en producción comercial en julio de 2016 y se espera que tenga una vida del activo (Life-of-asset – LoA) planeada sobre los 20 años, teniendo en cuenta los depósitos Ferrobamba (FB), Chalcobamba (CB) y Sulfobamba (SB).

Dentro del límite final de la fosa Chalcobamba se encuentran diversas infraestructuras críticas para la continuidad de las operaciones de la mina Las Bambas,

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

las mismas que necesitan ser proyectadas para dar viabilidad al crecimiento del volumen de extracción de los depósitos Chalcobamba manteniendo la operación eficiente de las bombas.

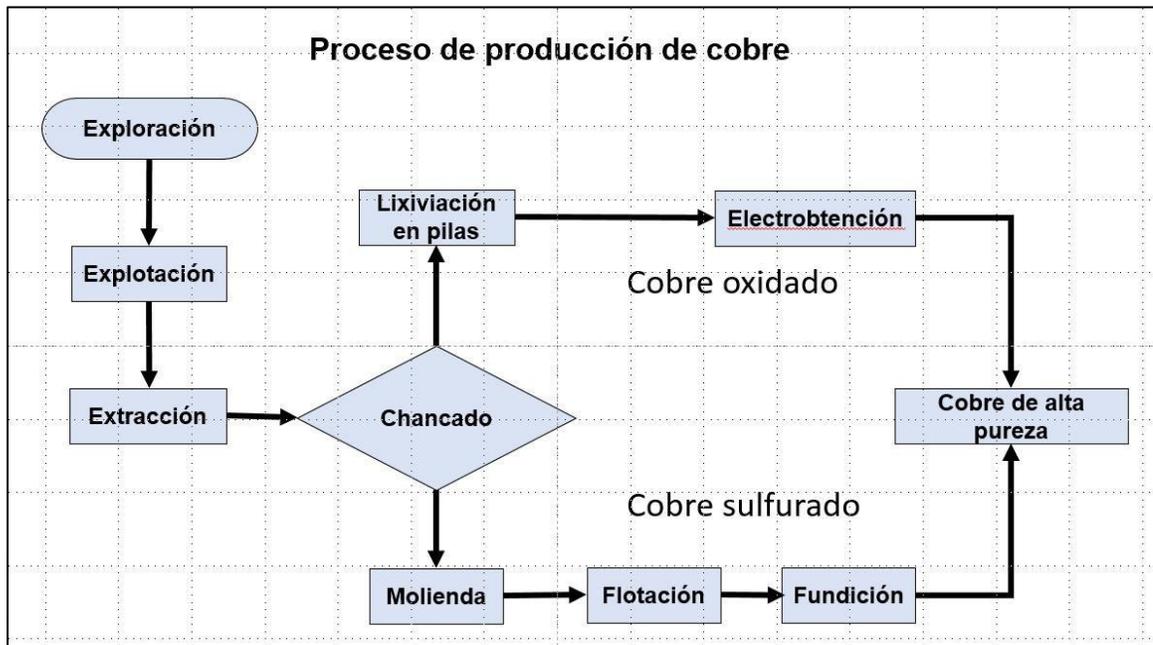
El presente documento muestra los cálculos hidráulicos para el dimensionamiento del sistema de bombeo de agua fresca proveniente de la presa Chuspiri hacia dos tanques de los cuales de uno suministra agua al sistema contra incendios y el otro para la alimentación de agua a los caminos cisterna para la eliminación del polvo del camino de acarreo. - Ver figuras N°4.1, N 4.2, N° 4.3, N° 4.4.

1.2 Procesos de producción de la mina Las Bambas

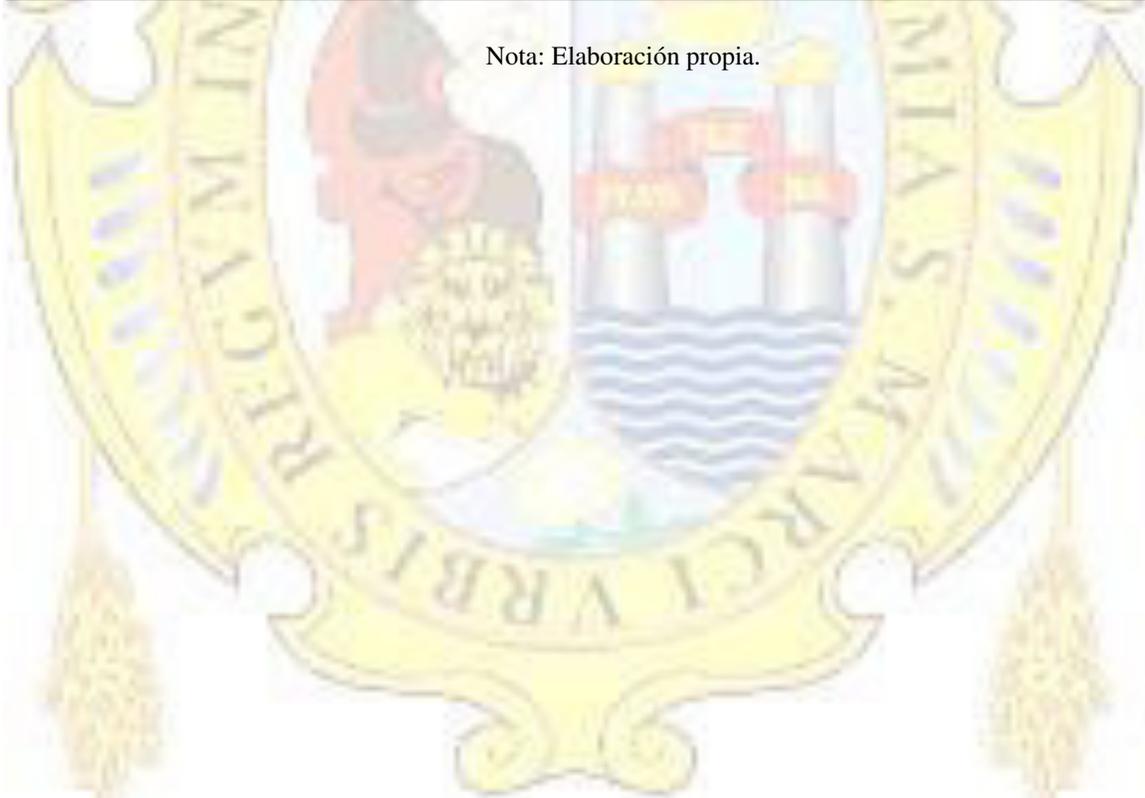
En la mina Las Bambas tiene como principal metal de producción el cobre siguiendo los siguientes procesos se logra extraer y procesar dicho metal:

- Exploración y voladura.
- Chancado o trituración ($\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{8}$ de diámetro de partícula) primario y secundario.
- Molienda para cobre sulfurado (Molinos de bola que reducen más el diámetro a través de impacto y abrasión de partículas las partículas).
- Flotación (Contiene la pulpa de cobre sulfurado).
- Fundición del cobre sulfatado.

Figura 1-2: Diagrama de flujo del proceso de producción de cobre



Nota: Elaboración propia.



CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

1.3 Antecedentes

Marcilla Tello, José Audaz (2019), realizó un informe profesional para obtener el grado académico profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos de la Escuela Profesional Ingeniería Mecánica de Fluidos, titulado Cálculo Hidráulico de una Red de Agua para La Planta Minera Inmaculada Ayacucho. Donde se concluye los parámetros de diseño hidráulico tanto como la selección de diámetro de las tuberías y la potencia hidráulica de la bomba, basado en las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos como la ecuación de Bernoulli y aplicando un proceso iterativo con la ecuación Colebrook-White.

Orrego Lepe, Guillermo Andrés (2015), realizó una tesis para obtener el título de Ingeniero Civil Mecánico de La Pontificia Universidad Católica de Valparaíso titulado Proyecto Impulsión de Agua Estero Colina. Entre las conclusiones más importantes tenemos el cálculo hidráulico de un pipeline de 3800 metros de longitud tanto en régimen estable como en transitorio transportando agua recuperada desde una poza para el proceso de la planta Las Tórtolas. El pipeline está compuesta por Acero al Carbono ASTM A 53 Gr.B y HDPE PE 100 norma ISO 4427 PN16.

Porras Chávez, Ángel (2018), realizó una tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional del Centro del Perú titulado Análisis de un Sistema de Tuberías para la Extracción de Aguas Subterráneas en la Compañía Minera Chungar, este estudio está basado en el cálculo de las pérdidas tanto primaria como secundarias de la tubería de extracción de agua y contrastar dichas pérdidas con lo proyectado inicialmente.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo General*

El objetivo general del presente informe profesional es el suministro de agua fresca a través de un sistema de bombeo, para dar viabilidad al crecimiento de la poza Chalcobamba, manteniendo la operación eficiente de la Minera Las Bambas.

1.4.2 *Objetivos Específicos*

- a. Analizar y seleccionar el diámetro económico de la tubería principal que abastecerá el sistema con incendios teniendo en consideración el material de la tubería, espesores de tubería.
- b. Analizar y calcular los parámetros hidráulicos del sistema de la tubería principal tanto la altura dinámica total (ADT) como la potencia de la bomba.
- c. Analizar el enfriamiento y congelamiento de tuberías expuestas en condiciones ambientales adversas.

1.5 Motivación

La mecánica de fluidos consta de 2 estados tanto líquido como gaseoso de los cuales la forma más usada para su transporte es mediante tuberías, ductos o canales. Para el presente informe profesional se transportará líquido mediante tuberías (sección transversal circular) que es ideal evitando pérdidas de energía causadas por la fricción de moléculas del fluido en movimiento.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Realizar un análisis hidráulico de un pipeline nos conlleva a utilizar ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos como Bernoulli, Darcy Weisbach y Coolebroke-White y el diagrama de Moody.

Actualmente la ingeniería utilizada en diversos proyectos para el diseño de un pipeline se utilizan softwares como el Fathom, Impulse, Hammer, Epanet, entre otros, los cuales están basados en las ecuaciones descritas anteriormente que mediante iteraciones logran resultados requeridos para el diseño del sistema en estudio.

En el presente informe basado en mi experiencia laboral, utilicé todos los conocimientos académicos adquiridos en el pregrado para la resolución de problemas de mecánicas de fluidos empleando como soporte una hoja de cálculo para la optimización de tiempo en la resolución de los cálculos.

1.6 Limitaciones del Tema

En el presente informe se realiza el análisis hidráulico y económico del sistema de la tubería principal (costo capital y costo operativo) para el determinar el diámetro económico, no se considera el CAPEX y OPEX. No se considera aspectos medioambientales y sociales. El análisis se realiza en régimen permanente y estado estable.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

1.7 Códigos de Diseño

El sistema de impulsión de agua fresca ha sido diseñado bajo los siguientes códigos:

- ANSI/HI 9.6.1 / 2017: Rotodynamic Pumps Guideline for NPS Margin.
- ANSI/HI 9.6.3 / 2017: Rotodynamic (Centrifugal and Vertical) Pumps Guideline for Allowable Operating Region.
- ANSI/HI 9.8 / 2018: Rotodynamic Pumps for Pump Intake Design.
- ASME B31.3 / 2016: Process Piping.
- ASME B31.4 / 2016: Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and other Liquids.
- ASME MFC-3M / 2004: Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle, and Venturi.
- ASTM A53 / 2018: Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless.
- ASTM F714 / 2013: Standard Specification for Polyethylene (PE) Plastic Pipe (DR-PR) Based on Outside Diameter.
- DIN 16892 / 2000: Crosslinked polyethylene (PE-X) pipes – General requirements, testing.
- DIN 16893 / 2000: Crosslinked polyethylene (PE-X) pipes – Dimensions.
- ISO 2533 / 1975: Standard Atmosphere.
- ISO 12241 / 2008: Thermal for building equipment and industrial installations – Calculation rules.
- NFPA 20 / 2019: Standard for the Installation of Stationary Pumps for Fire Protection.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

- NFPA 22 / 2018: Standard for Water Tanks for Private Fire Protection.

1.8 Sistema de Unidades

Las unidades a utilizar en el informe serán las del Sistema Internacional de unidades (SI). Se utilizará el punto (.) para indicar los decimales y la coma (,) para indicar miles. Los diámetros y espesores de las tuberías serán especificados en unidades inglesas (pulgadas). Las presiones podrán ser expresadas también expresadas en unidades inglesas (psi).

1.9 Definiciones y Abreviaciones

El presente documento, considera las siguientes definiciones y abreviaciones a ser utilizadas:

ADT Altura dinámica total requerida por un sistema de bombeo para impulsar un flujo determinado.

ANSI American National Standard Institute (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares).

ASME American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).

ASTM American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para el Ensayo y Materiales).

BCL Bottom Capacity Level (Nivel de capacidad mínima).

CS Carbon Steel (Tubería de acero al carbono).

DIN Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemán de Normalización).

EB Estación de Bombas

HDPE High Density Polyethylene (Polietileno de alta densidad).

HGL Hydraulic Grade Line (Línea de Gradiente Hidráulico).

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO



HI	Hydraulic Institute (Instituto Hidráulico).
hp	Horse power (Caballos de fuerza).
ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización).
km	Kilómetros.
NFPA	National Fire Protection Association (Asociación Nacional de Protección contra el Fuego).
NPS	Nominal Pipe Size (Diámetro nominal de tubería).
NPSHa	Net positive suction head available (Carga Neta de Succión Positiva Disponible).
NPSHr	Net positive suction head required (Carga Neta de Succión Positiva Requerida).
MAOH	Maximum Allowable Working Head (Cabeza Máxima Permitida de Trabajo).
mca	Metros Columna de Agua.
mm	Milímetros.
msnm	Metros Sobre Nivel del Mar.
mpy	Mils per year (Milésimos de pulgadas por año).
Patm	Presión atmosférica.
PEX	Crosslinked polyethylene (Polietileno reticulado).
psi	Pounds per square inch (Libras por pulgada cuadrada).
Pvap	Presión de vapor.
SCI	Sistema contra incendios.
SI	Sistema Internacional de Unidades.
SMYS	Specified Minimum Yield Stress (Mínimo Esfuerzo de Fluencia Especificado).
TCL	Top Capacity Level_(Nivel de capacidad máxima).
wt	Wall thickness (Espesor de tubería).

2.1. Teoría de Mecánica de Fluidos

La mecánica de fluidos es el estudio que analiza el comportamiento de un fluido en sus 2 estados: Líquido y gaseoso. Este análisis consta de varios parámetros como las más principales tenemos la densidad, presión, temperatura, velocidad y energía. El comportamiento del fluido puede ser evaluado tanto en régimen permanente (Mantiene la cantidad de movimiento constante a través del tiempo) o régimen no permanente (Varía la cantidad de movimiento a través del tiempo).

Las aplicaciones más importantes de la mecánica de fluidos son realizadas en la industria de la generación de energía, transporte de fluidos newtonianos o no newtonianos, el acondicionamiento de clima, canales, sistemas de irrigación, diseño aeronáutico, entre otros.

2.2. Sistema Internacional de Unidades

La principal magnitud del sistema internacional de unidades se muestra a continuación en la tabla 2-1:

Tabla 2-1: *Tabla del Sistema internacional de Unidades.*

Magnitud Física	Dimensión	Unidad
Longitud	L	Metro
Tiempo	T	Segundo

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Volumen	L^3	Metro cúbico	m^3
Velocidad	LT^{-1}	Metros por segundo	m/s
Aceleración	LT^{-2}	Metros por segundo al cuadrado	m/s^2
Masa	M	Kilogramo	kg
Densidad	$L^{-3}M$	Kilogramo por metro cúbico	kg/m^3
Fuerza	LMT^{-2}	Newton	N
Peso específico	$L^{-2}MT^{-2}$	Newton por metro cúbico	N/m^3
Presión	$L^{-1}MT^{-2}$	Pascal	Pa
Gradiente de Presión	$L^{-2}MT^{-2}$	Pascal por metro	Pa/m
Energía	L^2MT^{-3}	Watt	W
Flujo volumétrico	L^3T^{-1}	Metro cúbico por segundo	m^3/s
Viscosidad	$L^{-1}MT^{-1}$	Pascal por segundo	Pa s
Dinámica			
Viscosidad	L^2T^{-1}	Metros cuadrados por segundo	m^2/s
Cinámica			
Calor Específico	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	Joule por kilogramo kelvin	J/kg K
Conductividad térmica	$LMT^{-3}\theta^{-1}$	Watt por metro kelvin	W/m K

Nota: Adaptado de I. E. Idelchik (2005). *Handbook of hydraulic resistance, 4th revised and augment edition.*

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

2.3. Propiedades de los fluidos

Es una característica del fluido la cual podemos medir, éstas pueden ser clasificadas como extensiva (depende de la masa) o puede ser intensiva (no depende de la masa). De las características principales tenemos las siguientes:

2.3.1. La densidad (ρ)

Está definida por la cantidad de masa en un volumen determinado:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Donde:

ρ : Puede estar dado por $\frac{kg}{m^3}$ o $\frac{slug}{ft^3}$.

Como valor estándar para el fluido agua, la densidad es igual a $1,000 \frac{kg}{m^3}$ o también $1.94 \frac{slug}{ft^3}$.

2.3.2. El peso específico (γ)

Está definido por el peso del fluido por una cantidad determinada de volumen:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.2)$$

Donde:

γ : Puede estar dado en $\frac{N}{m^3}$ o $\frac{lbf}{ft^3}$

A continuación, veremos algunos pesos específicos en la tabla 2-2 para algunos fluidos para 20 °C:

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Tabla 2-2: Pesos específicos de algunos fluidos comunes.

Fluido	N/m ³	lbf/ft ³
Aire (1 atm)	11.8	0.0752
Aceite SAE 30	8,720	55.5
Agua	9,790	62.4
Glicerina	12,360	78.7
Mercurio	133,100	846
Alcohol etílico	7,733	49.2

Nota: Adaptado de Frank M. White (2003). *Mecánica de fluidos 5ta edición*.

2.3.3. La temperatura (T)

Es la sensación del grado de calor o frialdad del fluido. Es intrínseco a la dinámica molecular del fluido. Tenemos 4 unidades de medida, Celcius (°C), Rankine (°R), Kelvin (°K) y Fahrenheit (°F). A continuación, mostraremos su equivalencia para el fluido agua.

Para el estado de congelación del agua tenemos 0 °C, 32 °F, 492 °R y 273 °F.

Para el estado de ebullición tenemos 100 °C, 212 °F, 672 °R y 373 °K.

2.3.4. La presión (p)

La presión es una medida escalar determinada por la cantidad de fuerza ortogonal ejercida en una superficie dada. Ésta a su vez es inversamente proporcional a la velocidad del fluido que se puede demostrar con la ecuación de Bernoulli la cual veremos en la sección 2.4.

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Donde p puede ser medida en $\frac{N}{m^2}$, *mca*, *mm de Hg*, etc.

La presión podemos dividirla en presión estática (dada por la fuerza normal aplicada en la superficie de contacto en un punto) y la presión dinámica (Dada por el cuadrado de la velocidad del fluido sobre la aceleración gravitatoria).

Cuando utilizamos cálculos en donde interviene la presión del fluido tenemos que tener un punto de referencia el cual está dado por la presión atmósfera obteniendo la siguiente relación:

$$p_{abs} = p_{atm} + p_{man} \quad (2.4)$$

En donde p_{abs} es la presión absoluta, p_{atm} es la presión atmosférica y p_{man} es la presión manométrica.

2.3.5. *La viscosidad*

La viscosidad es una propiedad del fluido que mide la resistencia que ejerce entre sí para generar movimiento. Éstas se pueden clasificar en 2:

2.3.5.1. **Viscosidad dinámica (μ)**

Está dada por la relación de la tensión de corte τ entre la rapidez de corte $\frac{\Delta v}{\Delta y}$.

$$\mu = \tau \left(\frac{\Delta y}{\Delta v} \right) \quad (2.5)$$

En el sistema internacional de las unidades que se utilizan son $N \cdot \frac{s}{m^2}$, *Pa . s* o $\frac{kg}{m \cdot s}$.

A continuación, en la tabla 2-3 mostraremos valores para algunos fluidos.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Tabla 2-3: *Viscosidad dinámica de fluidos.*

Fluido	Temperatura (°C)	Viscosidad Dinámica (N . s/m² o Pa . s)
Agua	15	1.138 x 10 ⁻³
Gasolina	20	3.100 x 10 ⁻⁴
Aceite SAE 30	20	3.500 x 10 ⁻¹
Aceite SAE 30	80	1.900 x 10 ⁻²

Nota: Adaptado de Merle C. Potter & David C. Wiggert. (1998). *Mecánica de fluidos 3ra edición.*

2.3.5.2. Viscosidad cinemática (ν)

En algunos cálculos se utiliza la viscosidad cinemática que es simplemente dividir la viscosidad dinámica entre la densidad:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.6)$$

En el sistema internacional de las unidades que se utilizan son $\frac{m^2}{s}$ y $\frac{ft^2}{s}$.

2.4. Ecuación de Bernoulli.

Una de las leyes estudiadas en el pregrado es la ley de la conservación de la energía, quiere decir que la energía no puede ser destruida ni creada sino transformada. Daniel Bernoulli (1738) estudió el comportamiento de una partícula de fluido a través de una corriente de flujo bajo las siguientes condiciones:

- Flujo permanente (el caudal se mantiene a lo largo del tiempo).
- Flujo incompresible (la densidad se mantiene constante).
- Sin transferencia de calor.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

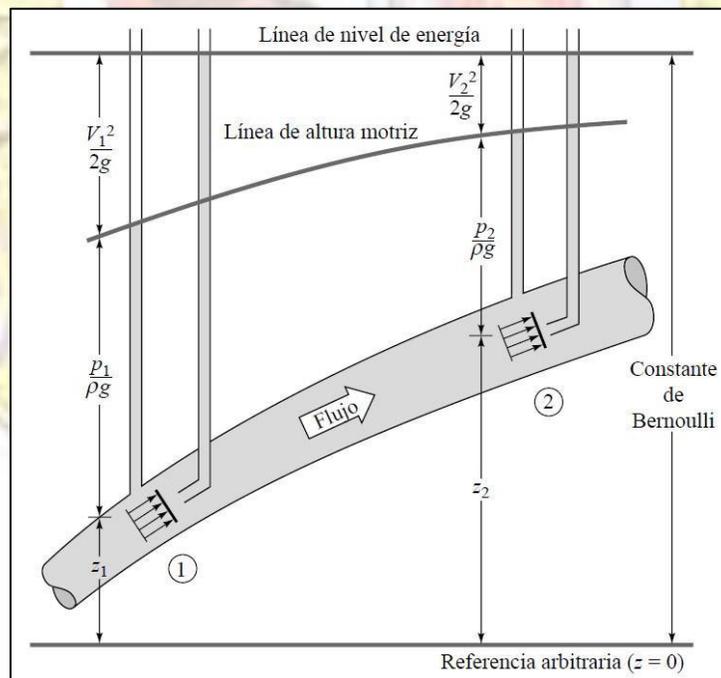
- Sin pérdida de energía por fricción.
- Sin trabajo de motor o bomba (sin añadir energía).

Daniel Bernoulli bajo esas condiciones conceptuó que la partícula del fluido tiene una elevación (Energía potencial z), tiene velocidad (Energía cinética $\frac{v^2}{2g}$) y tiene una Presión (mca). Y tomó un punto 1 y un punto 2 a lo largo de una corriente del flujo.

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (2.7)$$

En donde v es la velocidad de la partícula, p es la presión, z es la altura, γ es el peso específico y g la aceleración gravitatoria. La ecuación está definida con metros de columna de agua como unidad (mca).

Figura 2-1: Línea de nivel de energía y línea de altura motriz y constante Bernoulli.



Nota: Adaptado de Frank M. White (2003). *Mecánica de fluidos 5ta edición*.

2.5. Ecuación general de la energía

Como vimos en el capítulo 2.4 la ecuación de Bernoulli tiene algunas restricciones las cuales integraremos en la presente sección. Añadiremos la energía adicionada en el sistema, se puede considerar una bomba h_A , también tendremos en cuenta la energía extraída por el sistema, en este caso puede ser una turbina h_R y consideraremos las pérdidas ocasionadas por fricción de tubería junto con las pérdidas ocasionadas por los accesorios h_L .

$$E'_1 + h_A - h_R - h_L = E'_2 \quad (2.8)$$

En donde h_A es la energía añadida al sistema puede ser una bomba, h_R es la energía removida del sistema que puede ser una turbina y h_L es la pérdida de energía a causa de la fricción del fluido con el volumen de control.

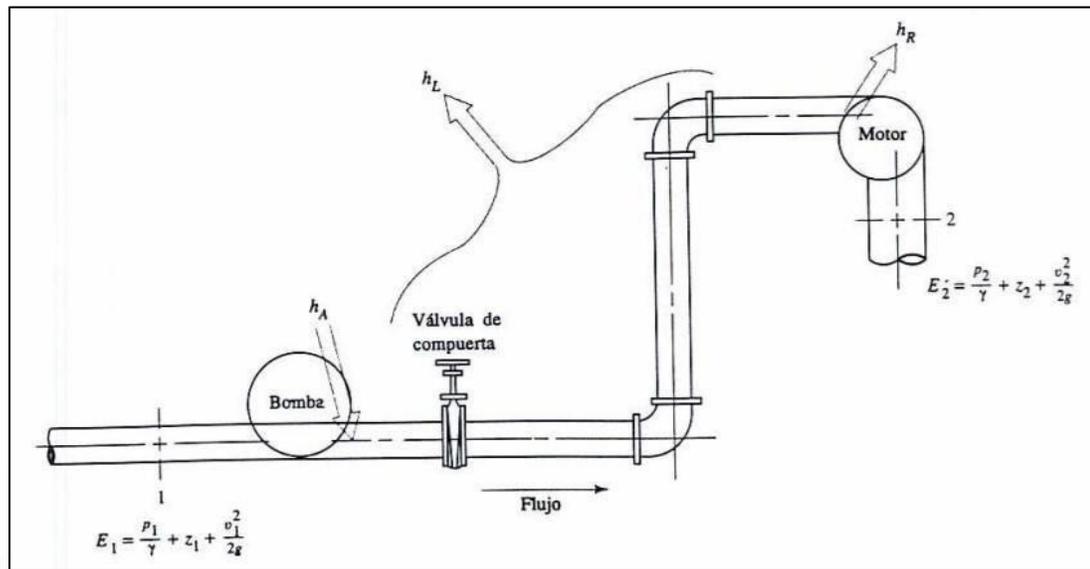
Desglosando la ecuación 2.8 tenemos la ecuación de la energía 2.9.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.9)$$

De igual manera que en la ecuación de Bernoulli que contiene ciertas restricciones, en la ecuación de la energía tenemos que considerar que no hay transferencia de calor, el flujo es permanente e incompresible.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 2-2: Sistema de flujo para la ecuación general de la energía.



Nota: Adaptado de Robert L. Mott (1996). *Mecánica de Fluidos aplicada 4ta edición*.

2.6. Caudal

Es la cantidad de flujo que pasa a través de una sección transversal en un tiempo determinado, puede ser caudal volumétrico o caudal másico. La unidad en el sistema internacional de unidades está dada por $\frac{m^3}{s}$. Existen diversos tipos de dispositivos para calcular el caudal en una sección circular que es la más usada es el caudalímetro.

$$Q = v \times A \quad (2.10) \quad Q = v \times A \times \rho \quad (2.11)$$

En la ecuación 2.10 describimos el caudal volumétrico que está dado en $\frac{m^3}{s}$ y en la ecuación 2.11 describe el caudal másico dado por $\frac{kg}{s}$.

2.7. Número de Reynolds, Flujo Laminar y Flujo Turbulento

El número de Reynolds es un número adimensional que nos permite evaluar si el fluido líquido se encuentra en régimen laminar, transitorio o turbulento en una sección

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

transversal circular. Cabe mencionar que para su similar en los gases tenemos el número Mach y para el fluido en un canal abierto tenemos el número de Froude.

Podemos hallar el número de Reynolds para un fluido que pasa a través de una tubería sabiendo los parámetros de velocidad del fluido $V(\frac{m}{s})$, el diámetro de la tubería $D(m)$, y la viscosidad cinemática $(\frac{m^2}{s})$.

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (2.12)$$

Podemos definir para un número de Reynolds menor a 2000 es considerado flujo en régimen laminar, para un número de Reynolds mayor o igual a 2000 pero menor o igual a 4000 flujo en régimen transitorio y para números de Reynolds mayores a 4000 se considera flujo en régimen turbulento.

2.8. Ecuación de Darcy y Weisbach y Colebrook- White

Empíricamente Henry Darcy (1857) y Julius Weisbach (1845) hallaron que se cumple la siguiente relación:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.13)$$

En donde f es el coeficiente de fricción de Darcy. Para flujos laminares ($Re < 2000$) tenemos la siguiente ecuación:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.14)$$

Para flujos turbulento ($Re > 4000$) aplicamos la ecuación de Colebrook-White que viene a ser una ecuación con variables implícitas la cual se resuelve aplicando cualquier método numérico. Así mismo para su representación gráfica la ecuación de Colebrook-White fue planteada en un diagrama llamado diagrama de Moody, 1944 (Ver figura 2-3).

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (2.15)$$

En donde ε es el coeficiente de rugosidad del material en donde tiene contacto el fluido. A continuación, mostraremos algunos coeficientes de rugosidad en la tabla 2-4 para conductos nuevos y limpios.

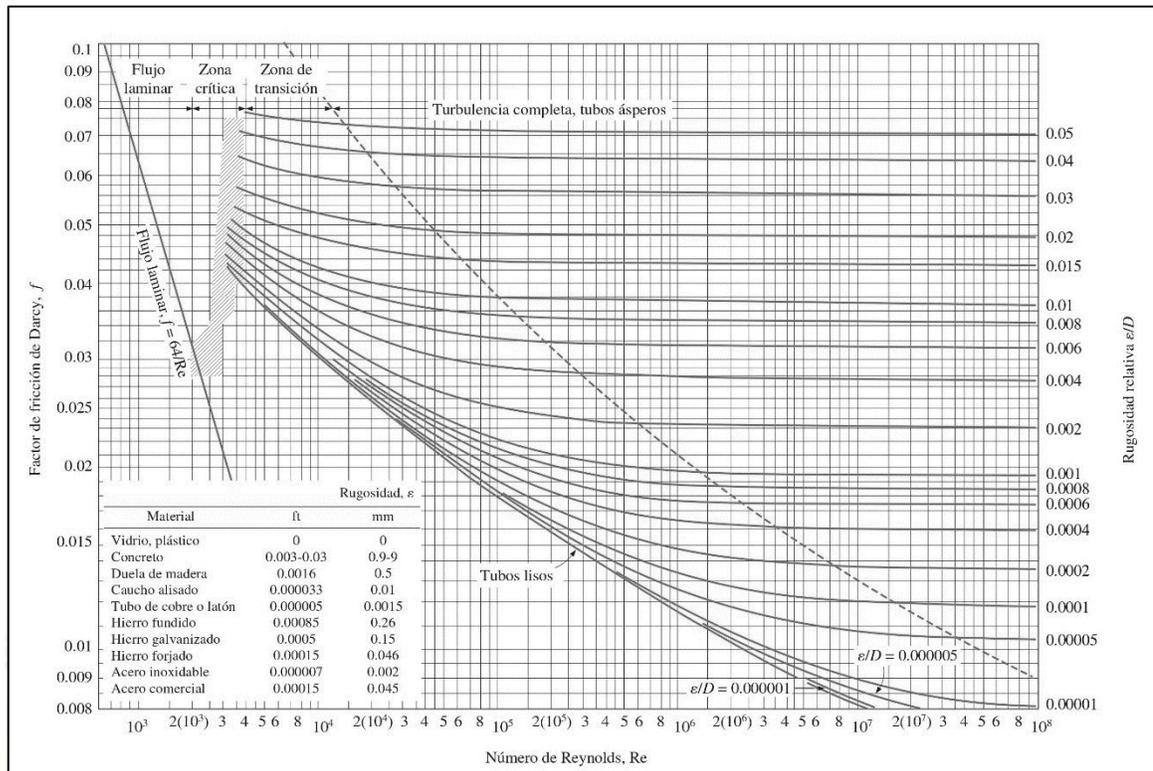
Tabla 2-4: Valores de coeficiente de rugosidad para conductos nuevos y limpios.

Material	Rugosidad ε	Rugosidad ε
	(m)	(ft)
Cobre, plomo	1.5×10^{-6}	5×10^{-6}
Hierro fundido (sin revestir)	2.4×10^{-4}	8×10^{-4}
Hierro fundido (revestido de asfalto)	1.2×10^{-4}	4×10^{-4}
Acero comercial	4.6×10^{-4}	1.5×10^{-4}
Acero desnudo	1.9×10^{-3}	6×10^{-3}
PEX	1.0×10^{-3}	3.2×10^{-3}

Nota: Adaptado de Robert L. Mott (1996). *Mecánica de Fluidos aplicada 4ta edición*.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 2-3: Diagrama de Moody para flujos en sección circular.



Nota: Adaptado de Ynuns Cengel y John Cimbala (2012). *Mecánica de fluidos fundamentales y aplicaciones 2da edición*.

2.9. Fluido Newtoniano y No Newtoniano

El fluido newtoniano se define por el comportamiento de la viscosidad con respecto a la fuerza que se aplica al fluido, la relación de la viscosidad es constante a la fuerza que se aplica por ejemplo tenemos el agua el cual será materia de estudio para el presente informe. Por el contrario, el fluido no newtoniano es indirectamente proporcional, es decir, al aplicar mayor fuerza al fluido la viscosidad disminuye. Estos tipos de fluidos lo vemos en el transporte de relaves, el lodo, pulpas, etc. Los cuales no están en el alcance del presente informe.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

2.10. Pérdidas de energía en un sistema de tuberías

Las pérdidas de energía en un sistema de tuberías h_{1-2} está dada por las pérdidas primarias ($h_{f_{1-2}}$) y pérdidas secundarias ($h_{m_{1-2}}$). Las pérdidas primarias son ocasionadas por la fricción que causa las paredes del conducto con la interacción del fluido en movimiento. Las pérdidas secundarias están dadas por el cambio de dirección del fluido en el conducto, puede ser por accesorios, por entradas o salidas del fluido en la sección transversal del ducto.

$$h_{1-2} = h_{f_{1-2}} + h_{m_{1-2}} \quad (2.16)$$

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (\text{Mencionado en la sección 2.8})$$

$$h_m = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.17)$$

2.11. Gradiente Hidráulico (HGL), MAOH y TDH.

El gradiente hidráulico o en sus siglas en inglés hydraulic gradient line (HGL) nos indica en metros de columna de agua la energía que posee el fluido a cierta altura y presión. El maximum allowable operating head (MAOH) nos indica en metros de columna de agua la presión máxima que puede soportar la tubería en un tiempo determinado. El total dynamic head (TDH) nos indica en columna de agua la cantidad total de energía que posee el sistema, este parámetro se utiliza para la selección de la bomba el cual está al alcance del presente informe.

$$TDH = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) + h_f \quad (2.18)$$

Donde:

P : Presión estática del sistema.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

ρ : Densidad del fluido.

g : Aceleración de la gravedad.

Z : Altura

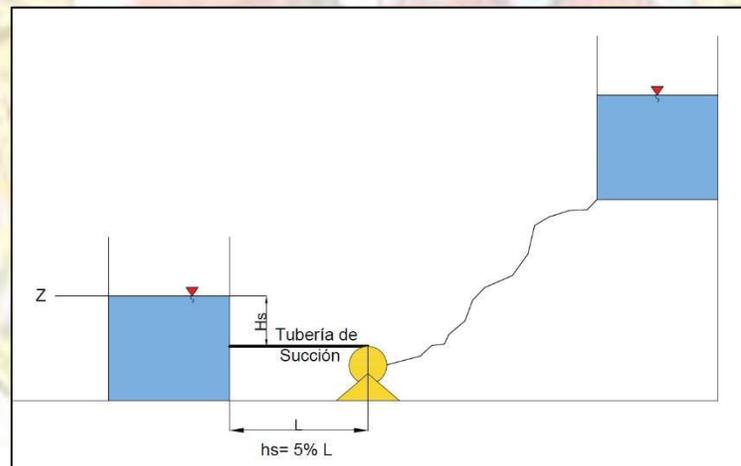
h_f : Perdidas por fricción del sistema.

2.12. Altura Neta Positiva en la succión (NPSH)

Por su acrónimo en inglés Net Positive Suction Head, es un valor dado en metros de columna de agua que nos indica la cavitación que se puede generar en ella. Existen 2 tipos de NPSH, el $NPSH_A$ (Admisible) que depende de parámetros del sistema y el $NPSH_r$, el cual es un valor de la bomba.

Para el sistema del presente informe tenemos el esquema de la figura 2-4.

Figura 2-4: Esquema para el cálculo del $NPSH_A$.



Nota: Elaboración propia.

La altura neta positiva de succión admisible o también llama disponible es igual a:

$$NPSH_A = P_{Atm} + P_v + H_S - h_s \quad (2.19)$$

Donde:

Capítulo III-Descripción del Problema

3.1. Descripción del Pipeline

En todo proyecto minero por seguridad es necesario un sistema contra incendio, para ello utilizaremos agua desde el reservorio Chuspiri. Por consecuencia, se necesita el diseño de una tubería de impulsión (pipeline) que nos permite que el fluido llegue desde el reservorio Chuspiri hacia los tanques de agua fresca y de sistema contra incendio.

Uno de los parámetros importantes a considerar en todo diseño es el de carácter económico, para ello analizaremos variantes de diámetros comerciales de tuberías y variantes comerciales de material (Acero al Carbono, HDPE o PEX) que será descrito en el capítulo IV sección 4.4 y también consideraremos el parámetro hidráulico el cual describiremos en el capítulo V.

Considerando las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos estudiados en el pregrado realizaremos el diseño del sistema requerido para lograr los objetivos planteados en el capítulo I sección 1.3. Consideraremos como matriz de nuestro cálculo la ecuación de la energía descrita en el capítulo 2 sección 2.5, ecuación 2.9. La ecuación del TDH descrita en el capítulo 2 sección 2.10, ecuación 2.16 y la ecuación de Colebrook-White descrita en el capítulo 2 sección 2.8, ecuación 2.15.

4.1. Datos de entrada

- Condiciones del sitio:

Tabla 4-1: Condiciones del sitio para el sistema.

Propiedad	Valor
Temperatura ambiente máxima ¹	22 (°C)
Temperatura ambiente mínima ¹	-9 (°C)
Velocidad del viento promedio ¹	12.2 (km/h)
Presión atmosférica ²	59.3 (kPa)

1. Adaptado de Las Bambas Project, febrero (2013). *Technical Specification for General Site Condition.*
2. Adaptado de estándar ISO 2533.

- Vida útil del proyecto: 20 años.
- Consideraciones hidráulicas:

Tabla 4-2: Consideraciones hidráulicas para el sistema.

Propiedad	CS	HDPE	PEX
Tasa de corrosión ¹ (mm/año)	0.3	0	0
Rugosidad ² (mm)	0.5	0.005	0.05

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

1. Adaptado de Las Bambas Project (mayo 2011) *Design Criterial for Water Pipelines*. La tasa de corrosión debe ser de 0.08 (mm/año) sin embargo se toma el valor mostrado en la tabla 6 de la base de datos de Las Bambas Project por ser más restrictivo.
2. Adaptado de Las Bambas Project (2011). *Base de datos*.

- Propiedades del fluido:

Tabla 4-3: *Propiedades de transporte de agua fresca para el sistema.*

Propiedad	Valor
Temperatura de operación ¹	15 (°C)
Densidad del fluido	999,2 (kg/m ³)
Viscosidad dinámica	1.14 (cP)
Viscosidad cinemática	1.14 (cSt)
Presión de vapor	1.71 (kPa)
Calor específico	4.235 (J/kg-K)
Conductividad térmica	0.59 (W/m-K)

1. Adaptado de Las Bambas Project (octubre 2013). *Design Criteria for Piping*.

- Caudal requerido – Tanque de sistema de alimentación a camiones cisterna:

Tabla 4-4: *Caudal requerido para camiones cisterna.*

Propiedad	Valor
Volumen camión cisterna	25,000 (gal)
Tiempo máximo de llenado	10-12 (min)

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Caudal mínimo ¹⁻²	473.1 (m ³ /h)
Nº de camiones ³	6-7

1. Calculado para un tiempo de 12 minutos.
2. El caudal será determinado de acuerdo al nivel en el tanque y la capacidad de transporte de la tubería de descarga.
3. Se considera para el flujo nominal y de diseño el despacho de 6 y 7 camiones cisterna respectivamente.

- Caudal requerido – Tanque de sistema contra incendios:

Tabla 4-5: Caudal mínimo, tanque de sistema contra incendios.

Descripción	Valor
Caudal requerido por monitores ¹	328 (gpm)
Tiempo de aplicación ¹	50 (min)
Caudal requerido por hidrantes ¹	500 (gpm)
Tiempo de aplicación ¹	240 (min)
Volumen requerido	516.3 (m ³)
Caudal mínimo de llenado ²	64.5 (m ³ /h)

1. Adaptado de Las Bambas Project (marzo 2018). *Criterio de diseño del Sistema contra incendio.*
2. Calculado para un tiempo de llenado de 8 horas como máximo de acuerdo con lo indicado en la sección 4.2.1.4 de la NFPA 22.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

4.2. Escenarios de operación

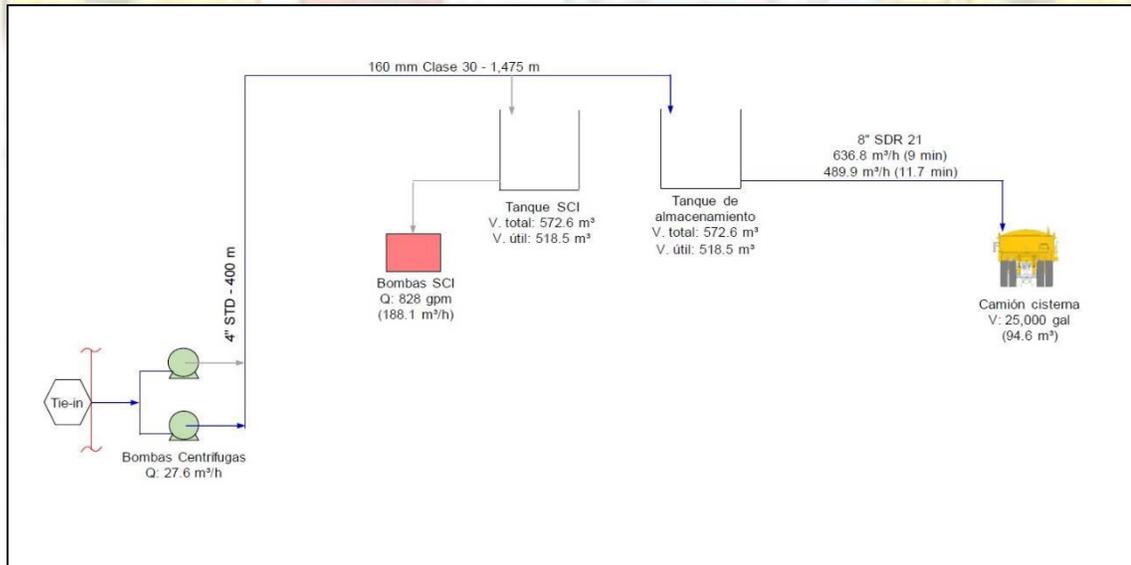
Las figuras 4-1 y 4-2 muestran los esquemas de operación normal y eventual del sistema. En los cuales se opera una o dos bombas respectivamente para impulsar el agua fresca desde el reservorio Chuspiri hacia los tanques de agua fresca y sistema contra incendio.

Tabla 4-6: *Requerimientos de caudal nominal y eventual*

Descripción	Nominal	Eventual
Caudal	27.6 m ³ /s	47.0 m ³ /s

Nota: Elaboración propia.

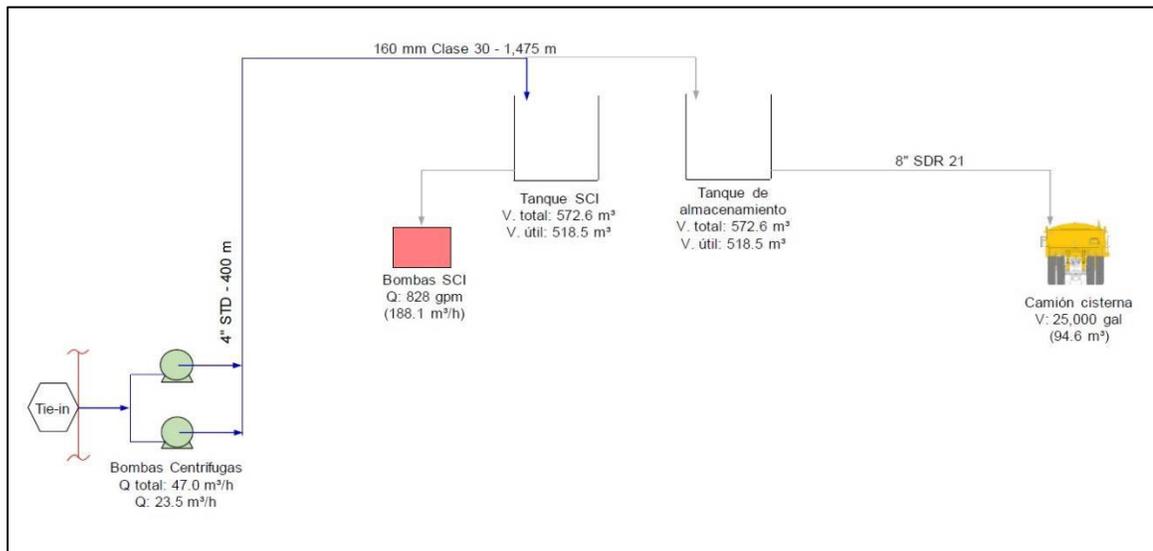
Figura 4-1: *Esquema de operación normal.*



Nota: Elaboración propia.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 4-2: Esquema de operación eventual (llenado de tanque SCI).



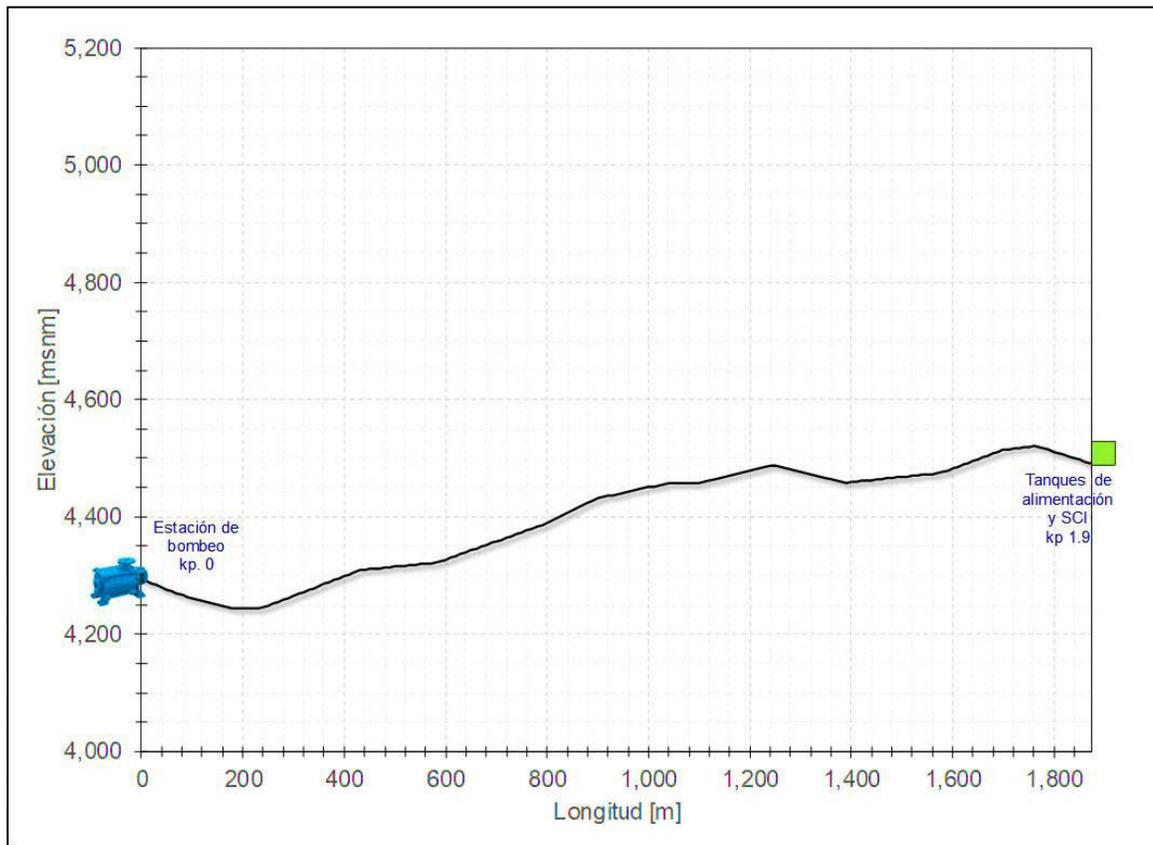
Nota: Elaboración propia.

4.3. Perfiles

La figura 4-3 muestra el perfil de la línea de transporte de agua fresca del reservorio Chuspiri desde la estación de bombas hacia los tanques de agua fresca y contra incendios.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 4-3: Perfil – Agua fresca reservorio Chuspiri a tanque del SCI.

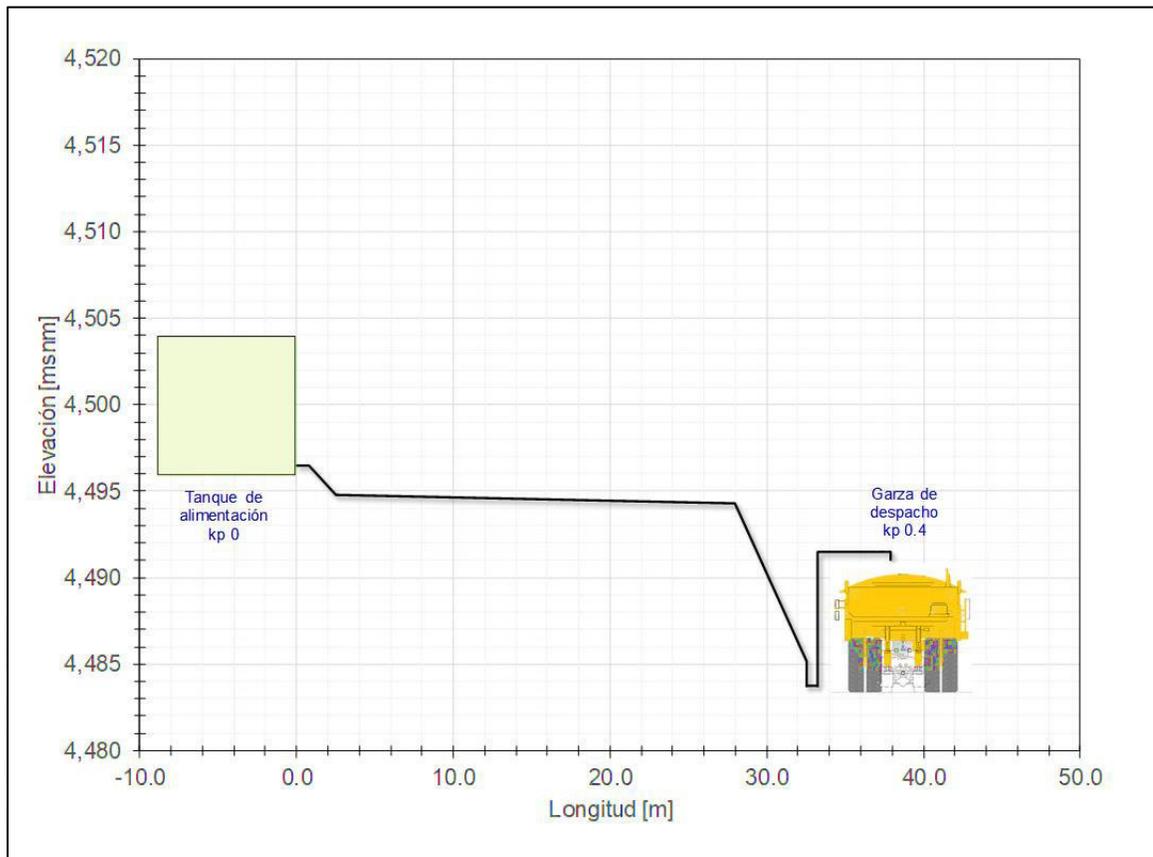


Nota: Elaboración propia.

La figura 4-4 muestra el perfil del sistema de alimentación a las cisternas para supresión de polvo.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 4-4: Perfil de la tubería de alimentación a cisternas para supresión de polvo



Nota: Elaboración propia.

4.4. Análisis de diámetro económico

El presente informe considera el desarrollo de un análisis de diámetro económico para la tubería de impulsión de agua fresca desde el reservorio Chuspiri hacia los tanques de agua fresca y sistema contra incendio. También considerar que el presente informe se encuentra en la etapa de factibilidad de ingeniería.

4.4.1. Bases de estimación

La selección del diámetro óptimo basado en el Valor Actual Neto se define a partir de los análisis del costo capital y el costo de operación marginal preliminares del

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

sistema, a lo largo de la vida útil proyectada. Este análisis se realiza para el trazado de la línea, considerando también la(s) estación(es) de bombas. El diámetro seleccionado será el que posea el menor VAN (o el menor costo capital si los VAN son cercanos) y las mejores ventajas técnicas basadas en las características del sistema.

El análisis del diámetro económico considera los parámetros más influyentes en el diseño que cumplan con los criterios establecidos.

El costo estimado es obtenido considerando que el sistema satisfaga las condiciones del flujo máximo para el costo de capital y el flujo nominal para la estimación del costo operacional.

Los cálculos para el desarrollo del costo de operación y el costo capital con el fin de determinar el diámetro económico óptimo, son a nivel conceptual +/-30%.

$$VAN = CC + VAN_{op}. \quad (4.1)$$

Donde:

CC: Costo Capital.

VAN_{op}: Valor actual neto por operación de sistema

$$VAN_{op} = COA \left(\frac{(1+TA)^n - 1}{(1+TA)^n - TA} \right) \quad (4.2)$$

Siendo:

COA: Costo operación actual.

TA: Tasa de actualización

n: Años proyectado de vida útil.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

4.4.2. Costo capital

La estimación del costo de capital para el análisis de diámetro económico fue obtenida considerando costos directos excluyendo escalamientos y contingencias. Los precios de los equipos y materiales para estos cálculos fueron obtenidos de cotizaciones para este informe.

Es importante resaltar que el costo capital para la alternativa en el presente informe no constituye el CAPEX. El costo capital es estimado teniendo en cuenta lo siguiente.

- Materiales e instalación (2019):

Tabla 4-7: Resumen de costos de material instalado.

Descripción	CS	HDPE	PEX
Costo de material (USD/kg)	1.12	3.2	6.7
Instalación NPS 3" (USD/m)	140	-	-
Instalación NPS 4" (USD/m)	159	44	27
Instalación NPS 6" (USD/m)	199	62	33
Instalación NPS 8" (USD/m)	260	81	44

Nota: Elaboración propia.

- Estación de bombeo: 1000 (USD/ kW)

4.4.3. Costo operativo

Las siguientes consideraciones se han tomado en la estimación del costo operativo:

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

- Vida útil del proyecto: 20 (años)
- Tasa de actualización: 8 (%)
- Costo energía: 0.08 (USD/ kWh)

Es importante resaltar que el costo capital para la alternativa en el presente informe no constituye el OPEX.

4.4.4. Costos no incluidos

Los costos de las instalaciones de los equipos no han sido considerados dentro del análisis de diámetro económico, se asume que será aproximadamente igual en las opciones analizadas.

Los costos de los siguientes elementos no han sido considerados dentro de la presente evaluación:

- Instalaciones eléctricas
- Protección catódica (material e instalación)
- Costos indirectos
- Movimientos de tierras
- Servicios auxiliares

4.4.5. Metodología

Se analizarán las siguientes combinaciones de material de tuberías. Tubería de acero desnudo. Tubería de acero desnudo / HDPE y tubería de acero al desnudo / PEX. Para definir la alternativa más apropiada técnica y económicamente para el sistema de transporte de agua fresca se ha considerado lo siguiente:

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

- Costo capital: Se dimensionó el pipeline para el escenario de operación eventual (llenado de tanque SCI, 02 bombas operando en paralelo) que presenta una mayor pérdida por fricción y presión en el sistema.
- Costo operativo: Se consideró el escenario de operación nominal (alimentación a tanque de almacenamiento del sistema de supresión de polvo, 01 bomba en operación) debido a que será la condición estable del sistema.

4.4.6. Análisis de diámetro económico: Tubería de acero desnudo

En la tabla 4-7 se muestra los resultados del dimensionamiento del pipeline (diámetro, espesores de tuberías y rating de bridas) así como los requerimientos hidráulicos (ADT y potencia hidráulica) para el análisis de diámetro económico del sistema.

Tabla 4-8: Requerimientos hidráulicos y dimensionamiento tubería de acero desnudo.

Item	Material	OD	wt	Desde	Hasta	Clase	Desde	Hasta
		(in)	(in)	(m)	(m)		(m)	(m)
1	ASTM A53 Gr. B	3.5	0.438	0	290	600	0	570
	ASTM A53 Gr. B	3.5	0.3	290	700	300	570	1250
	ASTM A53 Gr. B	3.5	0.281	700	1,874	150	1250	1,874
	ADT (m) (item 1)		463.4		BHP (Kw) (item 1)		122.0	
2	ASTM A53 Gr. B	4.5	0.312	0	370	300	0	870
	ASTM A53 Gr. B	4.5	0.281	370	1,874	150	870	1,874
	ADT (m) (item 2)		276.2		BHP (Kw) (item 2)		72.4	

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

	ASTM A53 Gr. B	6.625	0.312	0	670	300	0	780
3	ASTM A53 Gr. B	6.625	0.28	670	1,874	150	780	1,874
	ADT (m) (ítem 3)		220.2				BHP (kW) (ítem 3)	58.0
	ASTM A53 Gr. B	8.625	0.322	0	300	300	0	760
	ASTM A53 Gr. B	8.625	0.312	300	850	150	760	1,874
4	ASTM A53 Gr. B	8.625	0.277	850	1,874	-	-	-
	ADT (m) (ítem 4)		215.4				BHP (Kw) (ítem 4)	56.0

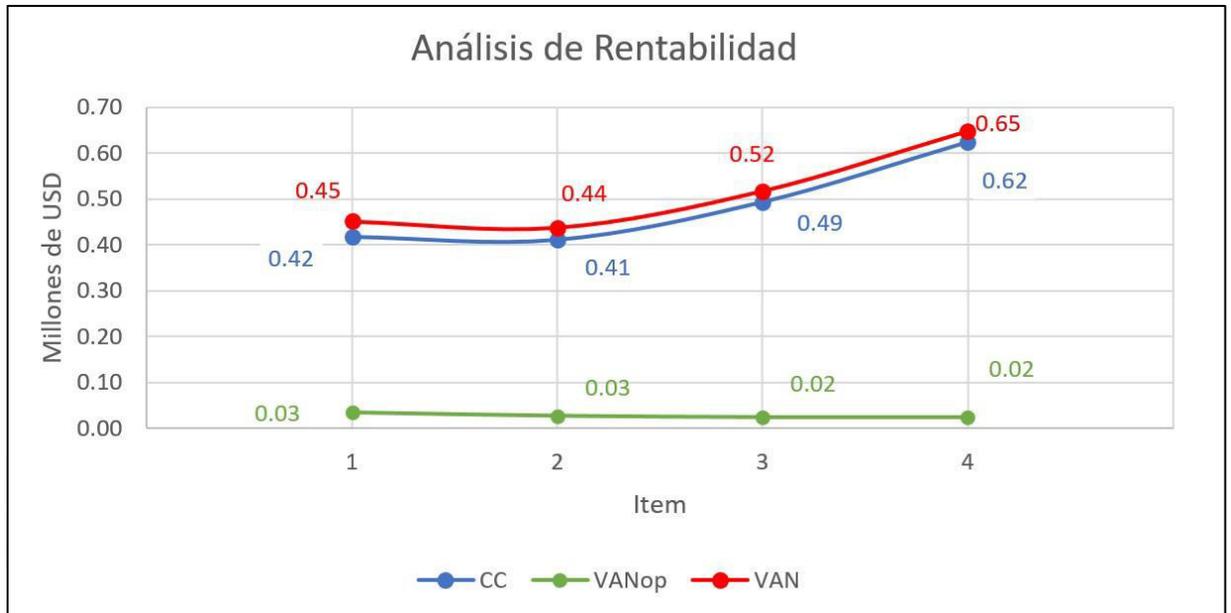
Nota: Elaboración propia. En la tabla 4-8 y en la figura 4-6 se muestra el análisis de diámetro económico del pipeline con valores obtenidos de acuerdo a lo indicado en la sección 3.5.3.

Tabla 4-9: Análisis de diámetro económico – Tubería de acero desnudo.

Ítem	Costo Capital (M USD)	VANop Costo de operación (M USD)	VAN Inversión (M USD)
1	0.42	0.03	0.45
2	0.41	0.03	0.44
3	0.49	0.02	0.52
4	0.62	0.02	0.65

Nota: Elaboración propia.

Figura 4-5: Diámetro económico tubería de acero desnudo.

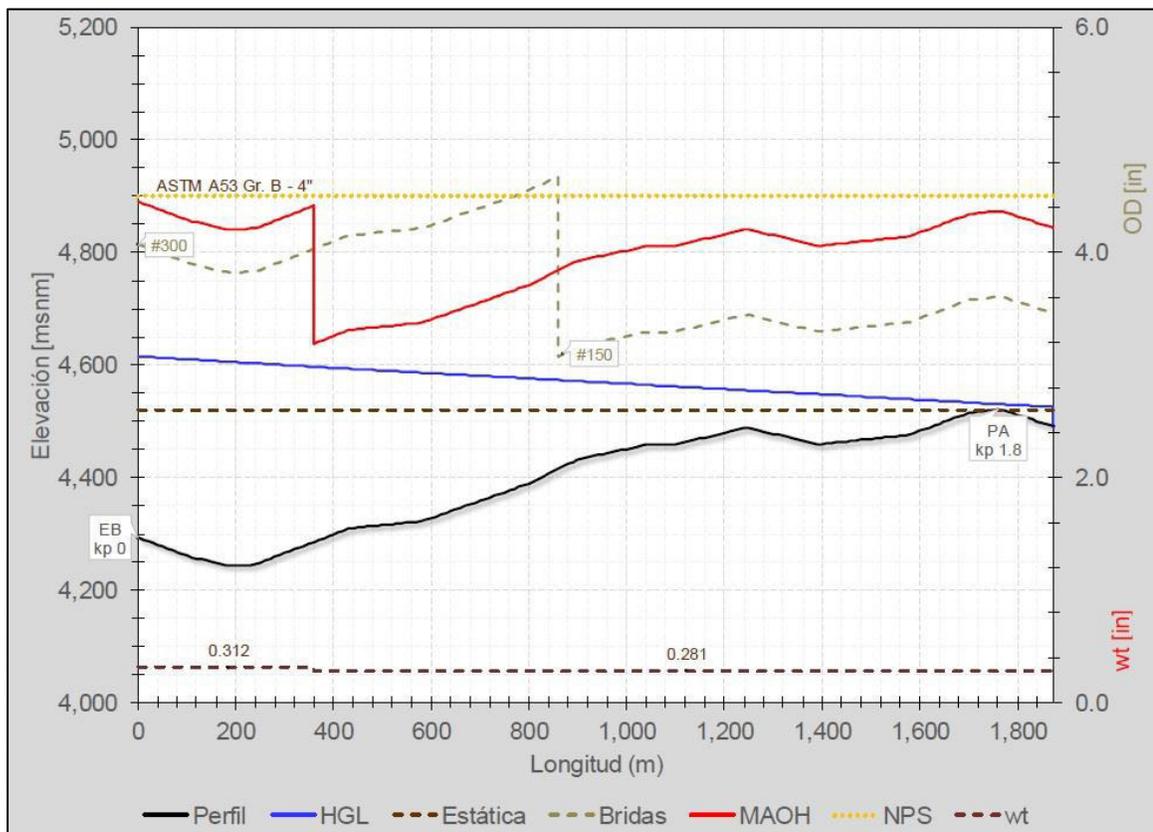


Nota: Elaboración propia.

De la figura 4-5 se puede observar que el diámetro económico para el sistema con tubería de acero desnudo es de 4" (Item 2 de la tabla 4.8). La figura 4-6 muestra el perfil hidráulico del sistema para el escenario de operación eventual (02 bombas operando en paralelo) y un pipeline de 4". El MAOH mostrado corresponde al obtenido al final de la vida útil del sistema de acuerdo a lo indicado en la sección 4.1.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 4-6: HGL – Tubería de acero desnudo NPS 4" (año 20).



Nota: Elaboración propia.

De la figura 4-6 se puede observar lo siguiente:

- Las pérdidas por fricción (72.9 m.) corresponden al 26.4% del ADT del sistema. Esto se puede apreciar como la diferencia entre presión estática y la HGL. Los cálculos de las pérdidas por fricción y ADT serán desarrollados en el punto 5.1.1.
- Se debe considerar uniones clase 300 según ASME B16.5 o superiores desde la estación de bombeo hasta la progresiva 0+870, mientras que el resto del sistema podrá utilizar uniones de clase 150 según ASME B16.5 o superiores.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

- En la zona de descarga hacia los tanques de almacenamiento de agua para supresión de polvo y para el sistema contra incendios es necesario el uso de una placa de orificio a fin de poder evitar el Slack Flow en la zona del punto alto (PA) del alineamiento.

- El sistema posee un volumen contenido de agua fresca de 14.6 m^3 .

4.4.7. Análisis de diámetro económico: Tubería de acero desnudo / HDPE

En la tabla 4-9 se muestran los resultados del dimensionamiento del pipeline (diámetros, espesores de tuberías y rating de bridas) así como los requerimientos hidráulicos (ADT y potencia hidráulica) para el análisis de diámetro económico del sistema.

Tabla 4-10: Requerimientos hidráulicos y dimensionamiento tubería de acero desnudo.

Ítem	Material	OD (in)	wt (in)	Desde (m)	Hasta (m)	Clase	Desde (m)	Hasta (m)
1	ASTM A53 Gr. B	4.5	0.312	0	400	300	0	890
	ASTM A53 Gr. B	4.5	0.281	400	980	150	890	1,874
	HDPE PE4710	4.5	0.64	980	1,874	-	-	-
ADT (m) (ítem 1)			305.7	BHP (Kw) (ítem 1)		80.0		
2	ASTM A53 Gr. B	4.5	0.312	0	260	300	0	790
	ASTM A53 Gr. B	4.5	0.281	260	680	150	790	1,874
	HDPE PE4710	6.625	0.946	680	1,874	-	-	-

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

	ADT (m) (ítem 2)				246.7	BHP (Kw) (ítem 2)			64.0
	ASTM A53 Gr. B	6.625	0.312	0	700	300	0	800	
3	HDPE PE4710	6.625	0.946	700	1,874	150	800	1,874	
	ADT (m) (ítem 3)				229.2	BHP (kW) (ítem 3)			60.0
	ASTM A53 Gr. B	6.625	0.312	0	660	300	0	770	
4	HDPE PE4710	8.625	1.232	660	1,874	150	770	1,874	
	ADT (m) (ítem 4)				220.0	BHP (Kw) (ítem 4)			58.12

Nota: Elaboración propia.

En la tabla 4-10 y en la figura 4-7 se muestra el análisis del diámetro económico del pipeline, con valores obtenidos de acuerdo a lo indicado en la sección 3.5.3.

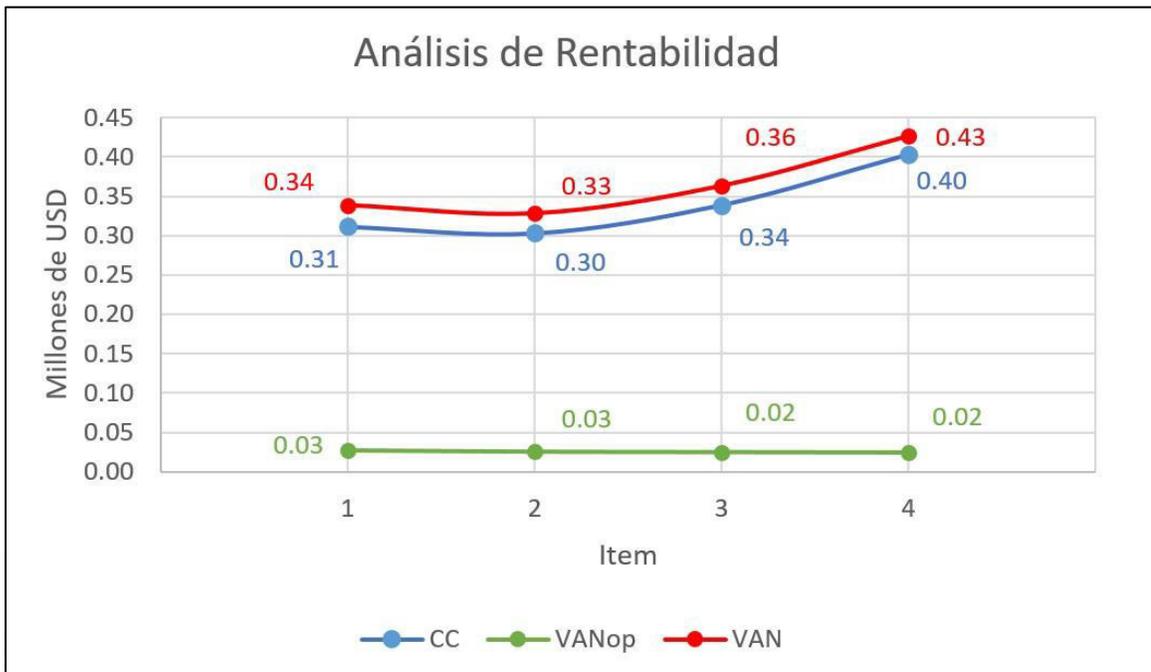
Tabla 4-11: Análisis de diámetro económico – tubería de acero desnudo / HDPE.

Ítem	Costo Capital (M USD)	VAN Costo de operación (M USD)	VAN Inversión (M USD)
1	0.31	0.03	0.34
2	0.30	0.03	0.33
3	0.34	0.02	0.36
4	0.40	0.02	0.43

Nota: Elaboración propia.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 4-7: Diámetro económico tubería acero desnudo / HDPE

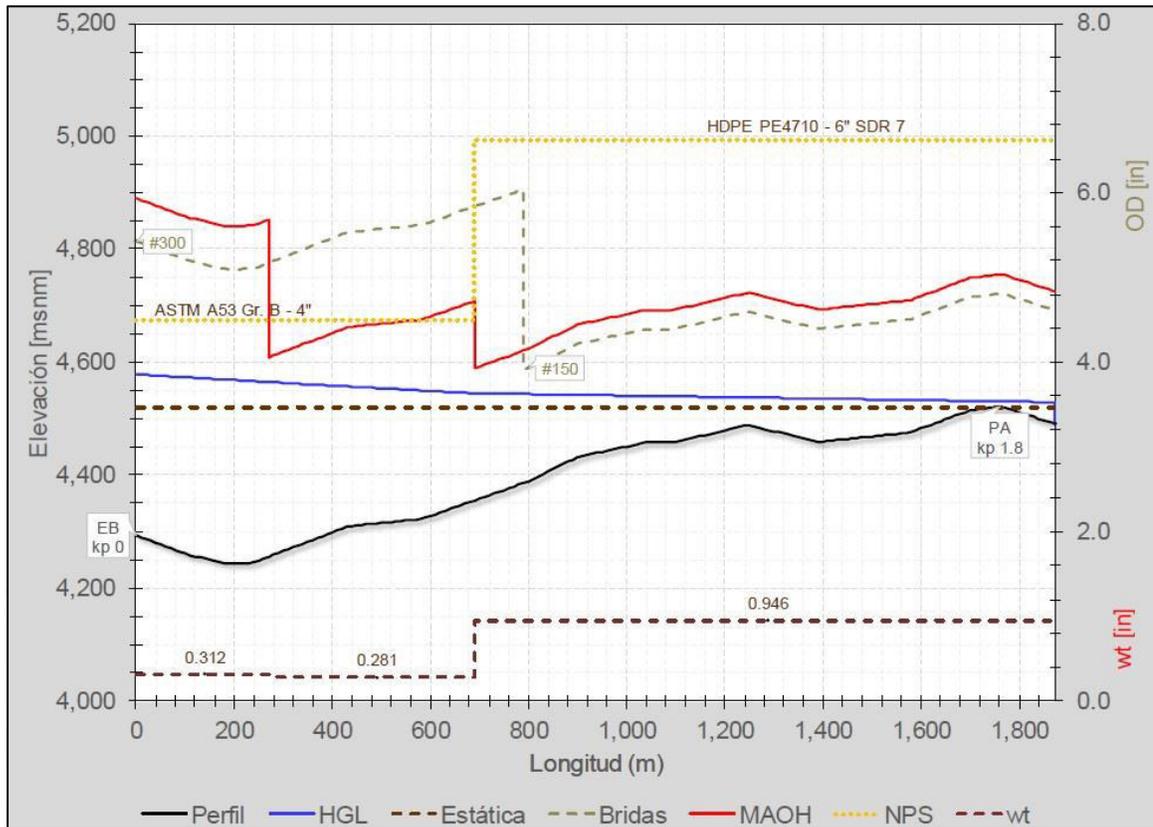


Nota: Elaboración propia.

De la figura 4-7 se puede observar que el diámetro económico para el sistema con 4" de tubería de acero desnudo y 6" HDPE PE4710 SDR 7 (Item 2 de la tabla 4-10). La figura 4-8 muestra el perfil hidráulico del sistema para el escenario de operación eventual (02 bombas operando en paralelo) y un pipeline de 4" y 6". El MAOH mostrado corresponde al obtenido al final de la vida útil del sistema de acuerdo a lo indicado en la sección 4.1.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 4-8: HGL – Tubería de acero desnudo NPS 4" / HDPE PE4710 6" SDR7 (año 20).



Nota: Elaboración propia.

De la figura 4-8 se puede observar lo siguiente:

- Las pérdidas por fricción (43.0 m) corresponden al 17.4% del ADT del sistema. Esto se puede apreciar como la diferencia entre la presión estática y la HGL. Los cálculos de las pérdidas por fricción y ADT serán desarrollados en el punto 5.1.1.
- Se debe considerar uniones clase 300 según ASME B16.5 o superiores desde la estación de bombeo hasta la progresiva 0+790, mientras que el resto del sistema podrá utilizar uniones de clase 150 según ASME B16.5 o superiores.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

- En la zona de descarga hacia los tanques de almacenamiento de agua para supresión de polvo y para el sistema contra incendios es necesario el uso de una placa orificio a fin de poder evitar el Slack Flow en la zona de punto alto (PA) del alineamiento.
- El sistema posee un volumen contenido de agua fresca de 16.1 m^3 .

4.4.8. Análisis de diámetro económico: Tubería de acero desnudo / PEX

En la tabla 4-11 se muestran los resultados del dimensionamiento del pipeline (diámetros, espesores de tuberías y rating de bridas) así como los requerimientos hidráulicos (ADT y potencia hidráulica) para el análisis de diámetro económico del sistema.

Tabla 4-12: Requerimientos hidráulicos y dimensionamiento tubería acero desnudo.

Item	Material	OD (in)	wt (in)	Desde (m)	Hasta (m)	Clase	Desde (m)	Hasta (m)
1	ASTM A53 Gr. B	4.5	0.312	0	710	300	0	1,130
	ASTM A53 Gr. B	4.5	0.281	710	840	150	1,130	1,874
	PEX	4.331	0.72	840	1,874	-	-	-
	ADT (m) (item 1)		367.9		BHP (Kw) (item 1)		94.0	
2	ASTM A53 Gr. B	4.5	0.312	0	280	300	0	820
	ASTM A53 Gr. B	4.5	0.281	280	410	150	820	1,874
	PEX	6.299	1.047	410	1,874	-	-	-
	ADT (m) (item 2)		255.2		BHP (Kw) (item 2)		64	

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

	ASTM A53 Gr. B	6.625	0.312	0	410	300	0	820
3	PEX	6.299	0.946	410	1,874	150	820	1,874
	ADT (m) (ítem 3)	238.1			BHP (kW) (ítem 3)	60.0		
	ASTM A53 Gr. B	6.625	0.322	0	360	300	0	780
4	PEX	7.874	1.307	360	1,874	150	780	1,874
	ADT (m) (ítem 4)	225.1			BHP (Kw) (ítem 4)	58.0		

Nota: Elaboración propia.

En la tabla 4-12 y en la figura 4-9 se muestra el análisis de diámetro económico del pipeline, con valores obtenidos de acuerdo a lo indicado en la sección 3.5.3.

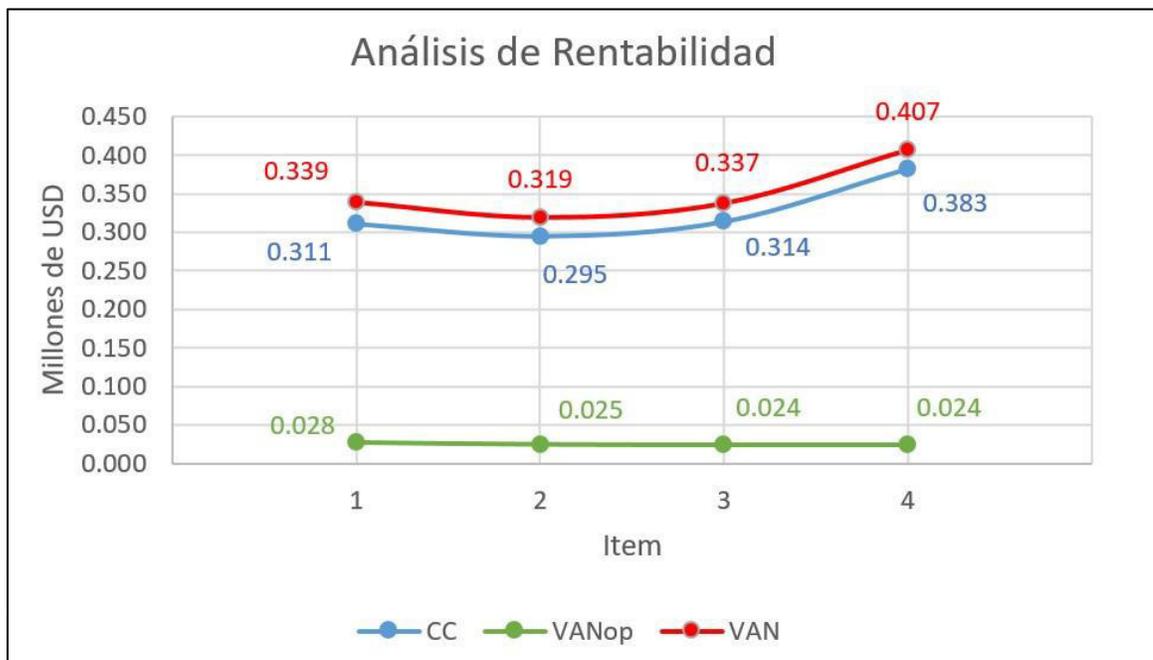
Tabla 4-13: Análisis de diámetro económico – Tubería de acero desnudo / PEX.

Ítem	Costo Capital (M USD)	VAN Costo de operación (M USD)	VAN Inversión (M USD)
1	0.311	0.028	0.339
2	0.295	0.025	0.319
3	0.313	0.024	0.337
4	0.384	0.024	0.407

Nota: Elaboración propia.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 4-9: Diámetro económico tubería de acero desnudo / PEX.

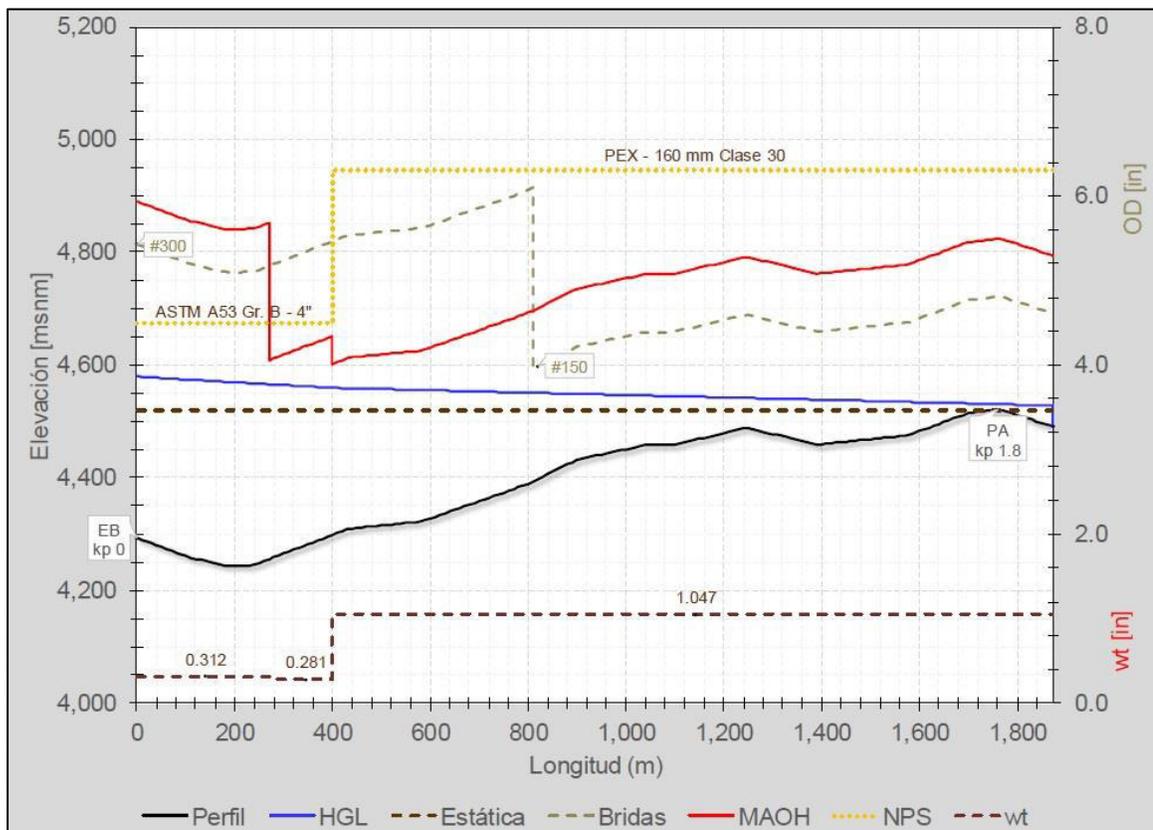


Nota: Elaboración propia.

De la figura 4-9 se puede observar que el diámetro económico para el sistema con 4" de tubería de acero desnudo y 160 mm Clase 30 (Ítem 2). La figura 4-10 muestra el perfil hidráulico del sistema para el escenario de operación eventual (02 bombas operando en paralelo) y un pipeline de 4" y 160 mm. El MAOH mostrado corresponde al obtenido al final de la vida útil del sistema de acuerdo a lo indicado en la sección 4.1.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 4-10: HGL – Tubería de acero desnudo NPS 4" / PEX 160mm Clase 30 (año 20).



Nota: Elaboración propia.

De la figura 4-10 se puede observar lo siguiente:

- Las pérdidas por fricción (42.4 m) corresponden al 16.6% del ADT del sistema. Esto se puede apreciar como la diferencia entre la presión estática y la HGL. Los cálculos de las pérdidas por fricción y ADT serán desarrollados en el punto 5.1.1.
- Se debe de considerar uniones clase 300 según ASME B16.5 o superiores desde la estación de bombeo hasta la progresiva 0+820, mientras que el resto del sistema podrá utilizar uniones de clase 150 según ASME B16.5 o superiores.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

- En la zona de descarga hacia los tanques de almacenamiento de agua para supresión de polvo y para sistema contra incendios es necesario el uso de una placa de orificio a fin de poder evitar el Slack Flow en la zona del punto alto (PA) de almacenamiento.

- El sistema posee un volumen contenido de agua fresca de 10.8 m^3 .

4.5. Comparativo de análisis de rentabilidad

Seleccionando los ítems más rentables según los puntos 4.4.6 (Acero al desnudo), 4.4.7 (Acero al desnudo y HDPE) y 4.4.8 (Acero al desnudo y PEX). Tenemos los siguientes datos en la tabla 4.13:

Tabla 4-14: Costos de los más rentables de los 03 sistemas propuestos.

Item	Descripción	Costo capital (M USD)	VANop (M USD)	VAN (M USD)
1	Acero al desnudo	0.41	0.03	0.44
2	Acero al desnudo y HDPE	0.30	0.03	0.33
3	Acero al desnudo y PEX	0.29	0.02	0.32

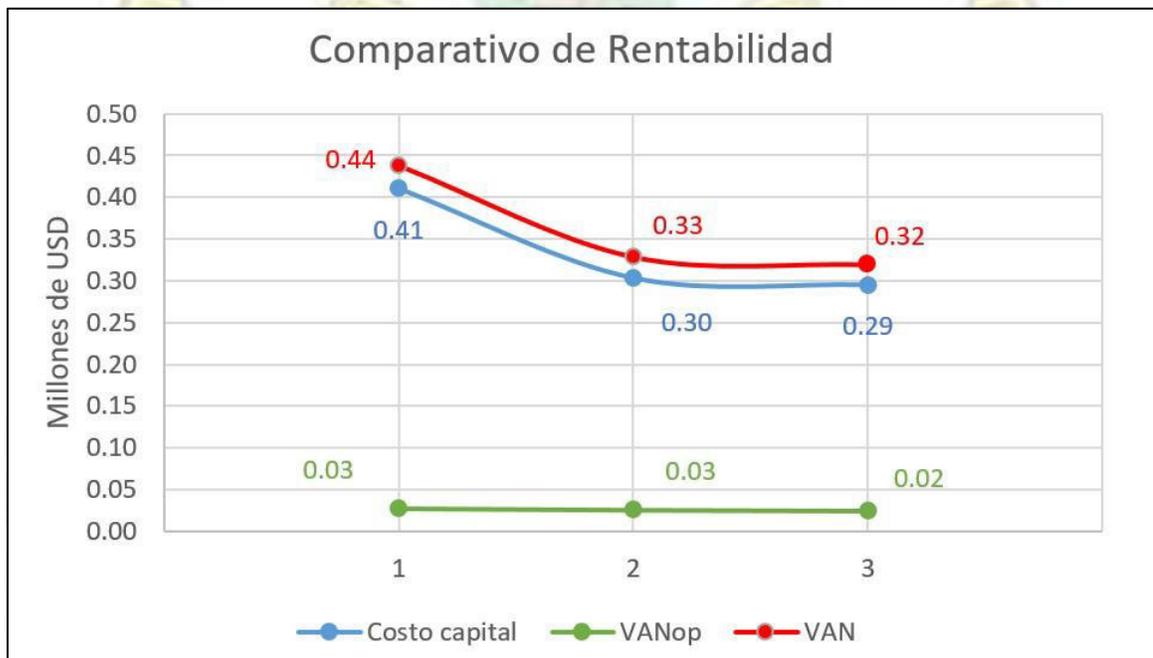
Nota: Elaboración propia.

La tabla 4-13 no muestra el costo en millones de dólares americanos de cada sistema analizado en los puntos 4.4.6, 4.4.7 y 4.4.8. Vemos que para el ítem 1 (sistema compuesto por acero al desnudo) tiene un costo de 0.46 millones de USD, mientras el ítem 2 (sistema compuesto por acero al desnudo y HDPE) tiene un costo de 0.35 millones

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

de USD y el ítem 3 (sistema compuesto por acero al desnudo y tubería PEX) tiene un costo de 0.34 millones de dólares.

Figura 4-11: *Comparativo de rentabilidad.*



Nota: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 4-11, el ítem 3 (sistema de tubería de acero al desnudo y tubería PEX) tiene menor costo capital (0.029 M USD), menor costo operativo (0.02 M USD) y por ello menor valor actual neto (0.32 M USD) en una vida útil de 20 años. Se resuelve que el ítem 2 es el más rentable según los índices analizados.

Los cálculos hidráulicos a ser desarrollados en la presente sección consideran el dimensionamiento del sistema de bombeo de agua fresca proveniente de la presa Chuspiri hacia los tanques de agua fresca y sistema contra incendio y la tubería de descarga para la alimentación de los camiones cisterna para la supresión de polvo del Haul Road.

5.1. Estación de bombeo de agua fresca

5.1.1. Selección de diámetro

De acuerdo a lo mostrado en la tabla 4-13 y figura 4-11 el diámetro económico para los sistemas analizados en el presente informe se seleccionará para el sistema compuesto por tuberías de acero desnudo de 4" y PEX de 160 mm Clase 30. La mayor ventaja de esta opción se debe a que la tubería de PEX se puede suministrar en secciones continuas (rollos) para el caso específico de la tubería seleccionada se podrá suministrar en 3 rollos. Al presentar menos uniones, se reducen los riesgos de falla y tiempo de montaje.

5.1.2. Parámetros hidráulicos del pipeline

La tabla 5-1 muestra los parámetros hidráulicos de acuerdo con los requerimientos del sistema.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Tabla 5-1: Parámetros hidráulicos del pipeline.

Parámetros	Operación nominal			Operación eventual		
	0-280	280-410	410-1755	0-280	280-410	410-1755
Ubicación	0-280	280-410	410-1755	0-280	280-410	410-1755
Material	ASTM A53 Gr. B	PEX	PEX	ASTM A53 Gr. B	PEX	PEX
OD (in)	4.5	4.5	6.299	4.5	4.5	6.299
wt (in)	0.312	0.281	0.946	0.312	0.281	0.946
Caudal (m ³ /h)		27.6			47	

Nota: Elaboración propia.

1. Incluye factor adicional sobre el HGL de 3%.
2. Incluye factor adicional de 5% sobre la longitud.

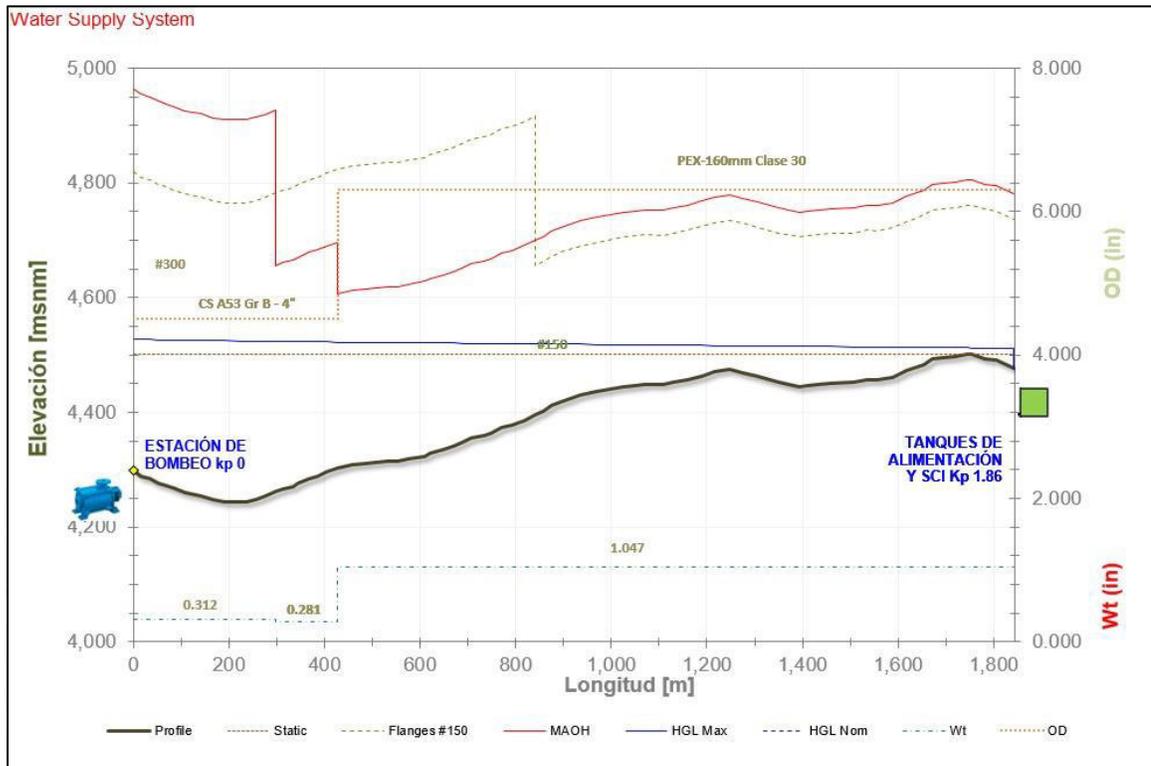
5.1.3. Perfil hidráulico

- Operación nominal

El perfil hidráulico del sistema en operación nominal para alimentar el tanque de almacenamiento de agua fresca (01 bomba en operación + 01 stand by) se muestra en la figura 5-1.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 5-1: HGL-Tubería de acero desnudo NPS 4" / PEX 160 mm Clase 30 –
Operación nominal (20 años).

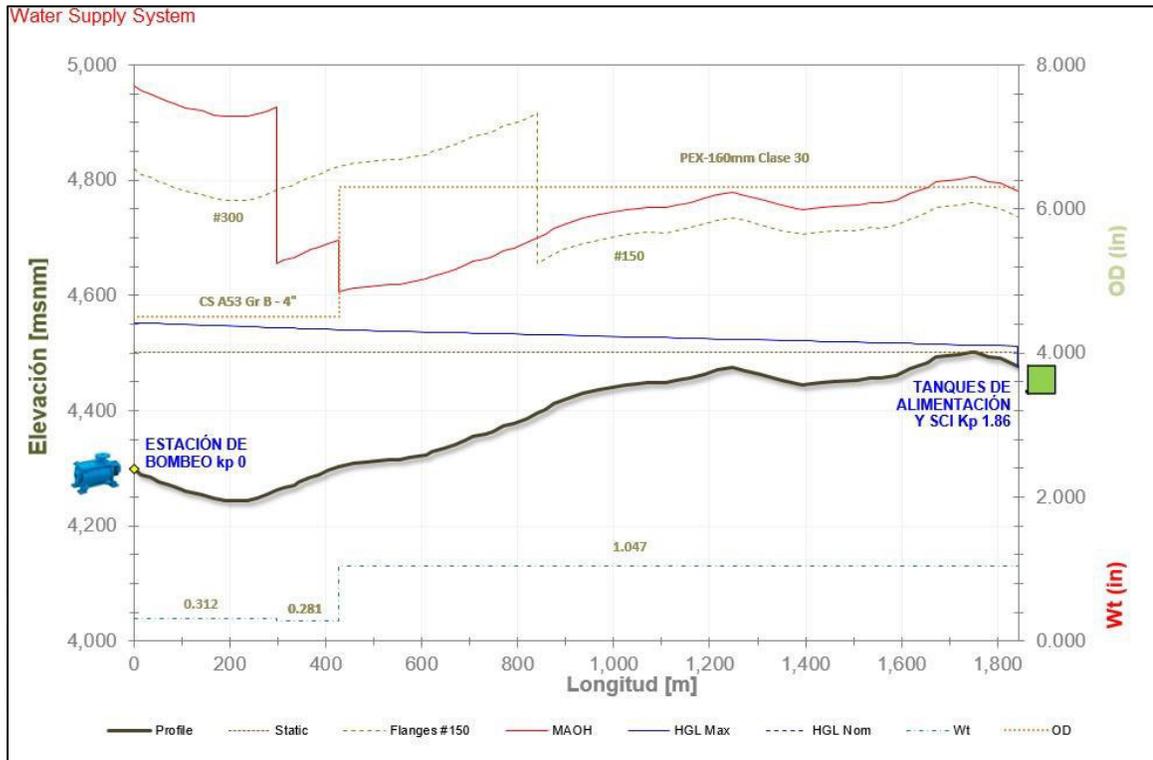


- Operación eventual

El perfil hidráulico del sistema en operación eventual para el llenado del tanque del SCI (02 bombas operando en paralelo) se muestra en la figura 5-2.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 5-2: HGL – Tubería de acero desnudo NPS 4" / PEX 160 mm Clase 30 –
Operación eventual (20 años).



Nota: Elaboración propia.

5.1.1. Cálculo del TDH sistema crítico (eventual)

La altura dinámica total (ADT) o en inglés Total Dynamic Head (TDH) es la energía total que necesita el sistema para su operatividad (ver ecuación 2.18) según requerimientos señalados en el punto 4.1.

- Caudal volumétrico requerido (ver tabla 4-6) :

$$- Q_{Eventual} = 47.0 \frac{m^3}{h}$$

- Viscosidad dinámica y densidad del fluido a 15 °C (ver tabla 2-3):

$$- \mu = 0.0011 \frac{N.s}{m^2}$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

$$- \rho = 999.17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Rugosidad de material (ver tabla 2-4):
 - Para el acero al desnudo : $\epsilon = 0.0019 \text{ m}$
 - Para PEX: $\epsilon = 0.001 \text{ m}$

- Tramos a evaluar:

Tabla 5-2: Valores de ingreso del sistema nominal.

Parámetros	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Material	ASTM A53 Gr. B	ASTM A53 Gr. B	PEX
Desde (m)	0	280	410
Hasta (m)	280	410	1755
Z ₁ (m)	4298	4253	4296
Z ₂ (m)	4253	4296	4501
L (m)	280	130	1464
NPS	4	4	6
OD (in)	4.5	4.5	6.299
wt (in)	0.312	0.281	0.946

Nota: Elaboración propia.

- Diámetro interno (D_i):

$$D_i(\text{m}) = OD \times 2 \times wt \times 0.0254 \quad (5.1)$$

- Para tramo 1:

$$D_i = 4.5 \times 2 \times (0.312) \times 0.0254 = 0.09845 \text{ m}$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

- Para tramo 2:

$$D_i = 4.5 \times 2(0.281) \times 0.0254 = 0.1 \text{ m}$$

- Para tramo 3:

$$D_i = 6.299 \times 2(1.047) \times 0.0254 = 0.1068 \text{ m}$$

• Velocidad (V):

Referenciando la ecuación 2.10 y despejando el valor de la velocidad tenemos:

$$V \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{4Q}{3600\pi D_i^2} \quad (5.2)$$

- Para tramo 1:

$$V = \frac{4 \times 47.0}{3600\pi(0.09845)^2} = 1.01 \frac{m}{s}$$

- Para tramo 2:

$$V = \frac{4 \times 47.0}{3600\pi(0.1)^2} = 1.66 \frac{m}{s}$$

- Para tramo 3:

$$V = \frac{4 \times 47.0}{3600\pi(0.1)^2} = 1.46 \frac{m}{s}$$

• Reynolds (Re):

Referenciando la ecuación 2.12 tenemos:

$$Re = \frac{\rho V D_i}{\mu}$$

- Para tramo 1:

$$Re = \frac{999.17 \times 1.01 \times 0.09845}{0.0011} = 148177$$

- Para tramo 2:

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

$$Re = \frac{999.17 \times 1.66 \times 0.1}{0.0011} = 145554$$

- Para tramo 3:

$$Re = \frac{999.17 \times 1.46 \times 0.1}{0.0011} = 136312$$

- Factor de fricción (f):

Se observa que los números de Reynolds son mayores a 4000, es decir nos encontramos en el régimen turbulento. Para ello utilizaremos la ecuación 2.15 (Colebrook-white) y para hallar el factor de fricción que es una incógnita implícita en la ecuación mencionada recurriremos a métodos numéricos para solucionarla.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (2.15)$$

Pasos para la solución de f :

1. Asignaremos al lado izquierdo de la ecuación 2.15 un valor A.
2. Asignaremos al lado derecho de la ecuación 2.15 un valor B.
3. Se estima un valor f' .
4. El f' es evaluado en A y en B.
5. El valor de A y el valor de B tienen que converger entre sí es decir,
 $|A - B| \xrightarrow{\text{Límite}} 0$. Es ahí donde se considera el valor de f' como el factor de fricción f .
6. De lo contrario si no converge seleccionar un f'' y repetir los pasos 4 y 5.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

- Para tramo 1:

○ $f' = 1$

$$A = \frac{1}{\sqrt{f'}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1$$

$$B = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f'}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00196}{2.7(0.098)} + \frac{2.51}{148177\sqrt{1}}\right)$$

$$B = 4.487$$

$$|A - B| = |1 - 4.487| = 3.487 \quad (\text{Asignar un nuevo valor } f'')$$

○ $f'' = 0.1$

$$A = \frac{1}{\sqrt{f''}} = \frac{1}{\sqrt{0.1}} = 3.162$$

$$B = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f''}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00196}{2.7(0.098)} + \frac{2.51}{148177\sqrt{0.1}}\right)$$

$$B = 4.481$$

$$|A - B| = |3.162 - 4.481| = 1.318 \quad (\text{Asignar un nuevo valor } f''')$$

○ $f''' = 0.04874$

$$A = \frac{1}{\sqrt{f'''}} = \frac{1}{\sqrt{0.050009}} = 4.529$$

$$B = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f'''}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00196}{2.7(0.098)} + \frac{2.51}{148177\sqrt{0.050009}}\right)$$

$$B = 4.4776$$

$$|A - B| = |4.4717 - 4.4777| = 0.051 \quad (\text{ok})$$

Se resuelve el factor de fricción en el tramo 1 es $f = 0.050009$

- Para tramo 2:

○ $f' = 1$

$$A = \frac{1}{\sqrt{f'}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1$$

$$B = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f'}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00196}{2.7(0.1)} + \frac{2.51}{145554\sqrt{1}}\right)$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

$$B = 4.5$$

$$|A - B| = |1 - 4.5| = 3.5 \text{ (Asignar un nuevo valor } f'')$$

○ $f'' = 0.1$

$$A = \frac{1}{\sqrt{f''}} = \frac{1}{\sqrt{0.1}} = 3.1622$$

$$B = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f''}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00196}{2.7(0.1)} + \frac{2.51}{145554\sqrt{0.1}}\right)$$

$$B = 4.4946$$

$$|A - B| = |3.1622 - 4.4946| = 1.332 \text{ (Asignar un nuevo valor } f''')$$

○ $f''' = 0.04846$

$$A = \frac{1}{\sqrt{f'''}} = \frac{1}{\sqrt{0.0497}} = 4.5426$$

$$B = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f'''}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00196}{2.7(0.1)} + \frac{2.51}{145554\sqrt{0.0497}}\right)$$

$$B = 4.4908$$

$$|A - B| = |4.4856 - 4.4909| = 0.0518 \quad (\text{ok})$$

Se resuelve el factor de fricción en el tramo 2 es $f = 0.04846$.

- Para tramo 3:

○ $f' = 1$

$$A = \frac{1}{\sqrt{f'}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1$$

$$B = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f'}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.001}{2.7(0.1)} + \frac{2.51}{136312\sqrt{1}}\right)$$

$$B = 5.13$$

$$|A - B| = |1 - 5.13| = 4.136 \text{ (Asignar un nuevo valor } f'')$$

○ $f'' = 0.1$

$$A = \frac{1}{\sqrt{f''}} = \frac{1}{\sqrt{0.1}} = 3.1622$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

$$B = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f''}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.001}{2.7(0.1)} + \frac{2.51}{136312\sqrt{0.1}}\right)$$

$$B = 5.1268$$

$$|A - B| = |3.1622 - 5.1268| = 1.9604 \text{ (Asignar un nuevo valor } f''')$$

○ $f''' = 0.03749$

$$A = \frac{1}{\sqrt{f'''}} = \frac{1}{\sqrt{0.0382}} = 5.1646$$

$$B = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f''}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.001}{2.7(0.1)} + \frac{2.51}{136312\sqrt{0.0382}}\right)$$

$$B = 5.1105$$

$$|A - B| = |5.1164 - 5.1108| = 0.0056 \quad (\text{ok})$$

Se resuelve el factor de fricción en el tramo 3 es $f = 0.03749$.

La tabla 5-3 muestran los valores hallados para el factor de fricción para su respectivo tramo

Tabla 5-3: Valores de f para cada tramo.

Parámetros	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Factor de fricción	0.04874	0.04846	0.03749
Material	ASTM A53 Gr. B	ASTM A53 Gr. B	PEX
Desde (m)	0	280	410
Hasta (m)	280	410	1755

Nota: Elaboración propia.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

- Pérdidas por fricción ($h_f + h_m$):

En el cálculo de pipelines se obvian las pérdidas menores ($h_m = 0$) debido ser insignificante con respecto al TDH. A continuación, hallaremos las pérdidas por fricción primarias debido al desgaste de energía entre el fluido en movimiento y las paredes de la tubería. Tomamos como referencia la ecuación 2.13 (Darcy-Weisbach)

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (\text{Ecuación de Darcy-Weisbach})$$

- Para tramo 1:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.04874 \times \frac{280}{0.098} \times \frac{1.72^2}{2 \times 9.81} = 20.78 \text{ m}$$

- Para tramo 2:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.04846 \times \frac{130}{0.01} \times \frac{1.66^2}{2 \times 9.81} = 8.86 \text{ m}$$

- Para tramo 3:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.03749 \times \frac{1345}{0.01} \times \frac{1.46^2}{2 \times 9.81} = 51.09 \text{ m}$$

Pérdidas por fricción del sistema es igual a la suma de las pérdidas de cada tramo:

$$h_f = h_{f_{\text{Tramo 1}}} + h_{f_{\text{Tramo 2}}} + h_{f_{\text{Tramo 3}}} = 20.78 + 8.86 + 51.09 = 80.73 \text{ m}$$

$$h_f = 80.73 \text{ m}$$

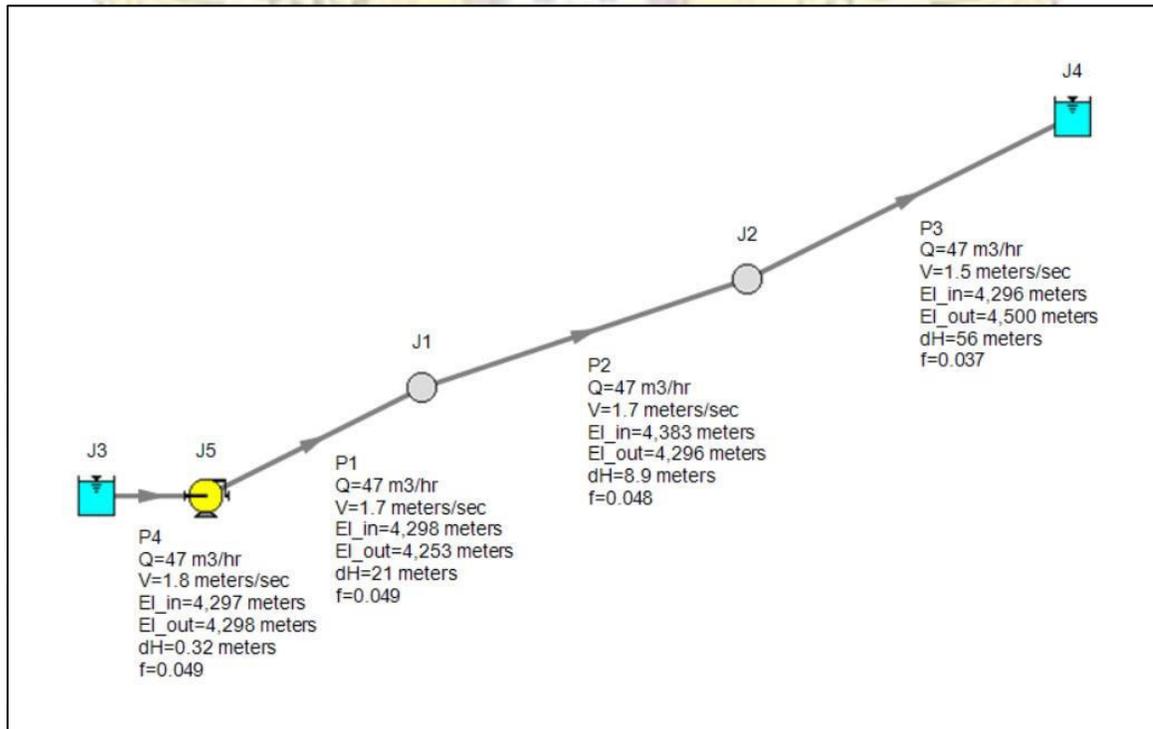
- Pérdidas por fricción utilizando el software AFT Fathom

Se realizó la simulación del sistema eventual en el software AFT Fathom que es una herramienta muy útil en la actualidad para el modelamiento de diseño de sistemas de

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

tuberías. El sistema propuesto en el presente informe se ve en la figura 5-3 considerando los parámetros de ingresos mencionado en la sección 4.1.

Figura 5-3: Esquema del sistema eventual.



Nota: Elaboración propia.

A continuación, en la figura 5-4 en la columna d(H) no muestra las pérdidas causada por fricción de la tubería para el sistema eventual, $d(H) = 85.58$ m. Contrastando con las pérdidas halladas con las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos mostradas en el punto anterior ($h_f = 80.73$ m) se tiene una diferencia de 5.6% el cual está dentro de los parámetros permitidos.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 5-4: Resultados del modelamiento.

General

Title: AFT Fathom Model
 Analysis run on: 13/01/2022 21:18:21
 Application version: AFT Fathom Version 10 (2018.07.13)
 Input File: D:\M4\Información\Fathom\Perdidas (1).fth
 Output File: D:\M4\Información\Fathom\Perdidas (1)_F1.out

Execution Time= 0.08 seconds
 Total Number Of Head/Pressure Iterations= 0
 Total Number Of Flow Iterations= 2
 Total Number Of Temperature Iterations= 0
 Number Of Pipes= 4
 Number Of Junctions= 5
 Matrix Method= Gaussian Elimination

Pipes

Pipe	Name	Hyd. Diameter (inches)	Vol. Flow Rate (m ³ /hr)	Velocity (meters/sec)	P Static Max (m H ₂ O std.)	P Static Min (m H ₂ O std.)	Elevation Inlet (meters)	Elevation Outlet (meters)	dH (meters)	f	Reynolds No.
1	Pipe	3.876	47.00	1.715	318.150	293.958	4.298	4.253	20.7896	0.04874	1.467E+05
2	Pipe	3.938	47.00	1.661	266.336	188.261	4.383	4.296	8.8637	0.04846	1.444E+05
3	Pipe	4.205	47.00	1.457	266.368	6.941	4.296	4.500	55.6308	0.03749	1.352E+05
4	Pipe	3.826	47.00	1.760	6.892	5.574	4.297	4.298	0.3184	0.04898	1.486E+05

All Junctions

Jct	Name	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m ³ /hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)	Loss Factor (K)
1	Branch	31.1990	18.4616	31.2137	18.4754	47.00	13.04	0
2	Branch	26.1179	26.1211	26.1317	26.1317	47.00	13.04	0
3	Reservoir	0.5933	0.6913	0.5933	0.6913	47.00	13.04	0
4	Reservoir	0.5933	0.6913	0.5933	0.6913	47.00	13.04	0
5	Pump	0.5466	28.8267	0.5621	28.8414	47.00	13.04	0

Nota: Elaboración propia.

- Cálculo del TDH del sistema crítico (eventual):

De la ecuación 2.18 $TDH = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) + h_f$ en donde la presión estática

es igual a 0 por ser depósitos y están a temperatura atmosférica tenemos la

diferencia de cotas y las pérdidas por fricción.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

$$TDH = 4501m - 4298m + 82.47 m$$

$$TDH = 285.47 m$$

- Cálculo del TDH del sistema nominal:

De la misma forma en que se realizó los cálculos para el sistema eventual $Q = 47 \frac{m^3}{s}$ se realiza los cálculos para el sistema nominal variando el caudal a $Q = 27.6 \frac{m^3}{s}$ obteniendo un $h_f = 28.64 m$ y un $TDH = 231.64$

5.1.2. Cálculo de la potencia útil (sistema eventual)

Potencia útil:

$$Pot = SG \times \frac{Q}{3.6} \times \frac{TDH}{76n}$$

Donde:

Pot: Potencia útil (hp)

SG: Gravedad específica del agua a 15 °C

n: Eficiencia

$$Pot = 0.999 \times \frac{47}{3.6} \times \frac{285.47}{76 \times 0.55} = 97.27 hp$$

$$Pot = \frac{92.27}{1.341} = 72.56 kw$$

5.1.3. Cálculo de la potencia útil (sistema nominal)

Potencia útil:

$$Pot = SG \times \frac{Q}{3.6} \times \frac{TDH}{76n}$$

Donde:

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Pot: Potencia útil (hp)

SG: Gravedad específica del agua a 15 °C

n: Eficiencia

$$Pot = 0.999 \times \frac{27.6}{3.6} \times \frac{231.64}{76 \times 0.55} = 46.35 \text{ hp}$$

$$Pot = \frac{92.27}{1.341} = 34.56 \text{ kw}$$

5.1.4. Cálculo del NPSH

Considerando los valores señalados en la tabla 5-4 del ambiente:

Tabla 5-4: Parámetros para hallar el NPSH

Parámetros de ambiente	Valores
T (°C)	15
μ (kg/m.s)	0.00114029
ρ (kg/m ³)	998.71795
Pv (mca)	0.15303062
Patm (mca)	6.05

Tenemos de la ecuación 2.19

$$NPSH_A = P_{Atm} + P_v + H_S - h_s$$

Donde:

$$P_A \text{ (Presión atmosférica)} = 6.05 \text{ mca}$$

$$P_v \text{ (Presión de vapor)} = 0.15 \text{ m}$$

$$H_S \text{ (Altura estática de succión)} = 0.90 \text{ m}$$

$$\Delta h_s \text{ (Pérdida de carga en la succión)} = 1.08$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

$$NPSH_A = 6.05 + 0.150.9 + 1.08 = 5.72 \text{ m}$$

$$NPSH_A = 5.72 \text{ m}$$

5.1.5. Requerimientos de bombeo

Este análisis es referencial y servirá para poder mostrar los puntos operativos calculados y para poder determinar la potencia estándar requerida. Para lo cual, se tomará como referencia la curva de performance de un equipo disponible en el mercado y se analizará su comportamiento bajo las condiciones operativas definidas en la sección 4.1.

Los requerimientos hidráulicos para la estación de bombeo de agua fresca se resumen en la tabla 5-5 mostrada a continuación.

Tabla 5-5:Requerimientos de bombeo.

Parámetro	Nominal	Eventual
Caudal total (m ³ /h)	27.6	47
Caudal por bomba (m ³ /h)	27.6	23.5
ADT (m)	231.64	285.47
Eficiencia ¹ %	55.4	55.4
BHP (K W)	34.56	72.56
NPSHa (m)	5.72	5.72

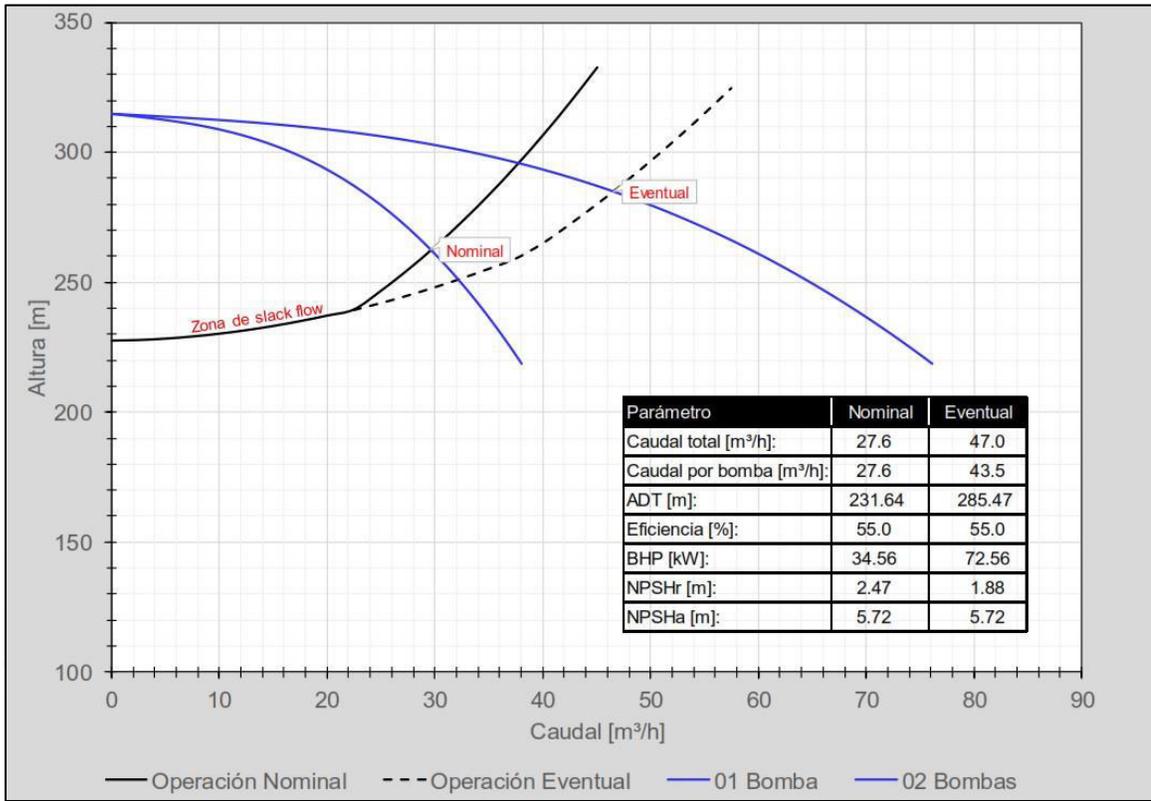
Nota: Elaboración propia.

1. La eficiencia ha sido determinada según catálogo del proveedor. A ser actualizado según propuesta de proveedor.

En la figura 5-3 se muestran los puntos operativos de la bomba versus las curvas del sistema para la curva de performance analizada, al operar en la condición eventual (operación con 02 bombas en paralelo) y en la condición de nominal (operando 01 bomba).

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 5-5: Condiciones de operación.



Nota: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 5-3 se determina lo siguiente:

- De acuerdo a lo mostrado en la figura 5-1 y figura 5-2 es necesario implementar un dispositivo de restricción en la zona de llegada hacia los tanques a fin de evitar Slack Flow en el sistema. Se plantea el uso de una placa de orificio de diferente diámetro para cada acometida en los tanques del SCI y almacenamiento de agua fresca, respectivamente. Por lo cual, se muestran dos curvas del sistema en la figura 5-3; la zona común de ambas curvas representa los caudales bajo los cuales se presentará Slack Flow en el sistema (caudales menores a $22.7 \frac{m^3}{h}$).

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

- Como se puede observar en la figura 5-3 los puntos operativos de la bomba versus la curva del sistema muestran que, para la curva de performance analizada, la bomba al operar en la condición nominal transporta un mayor caudal que al operar en condición eventual. Por lo cual, el punto de operación para la condición nominal es más crítico para el sistema ya que se sitúa más a la derecha de la curva de performance teniendo un mayor valor de NPSH, menor eficiencia y por ende mayor consumo de energía eléctrica.

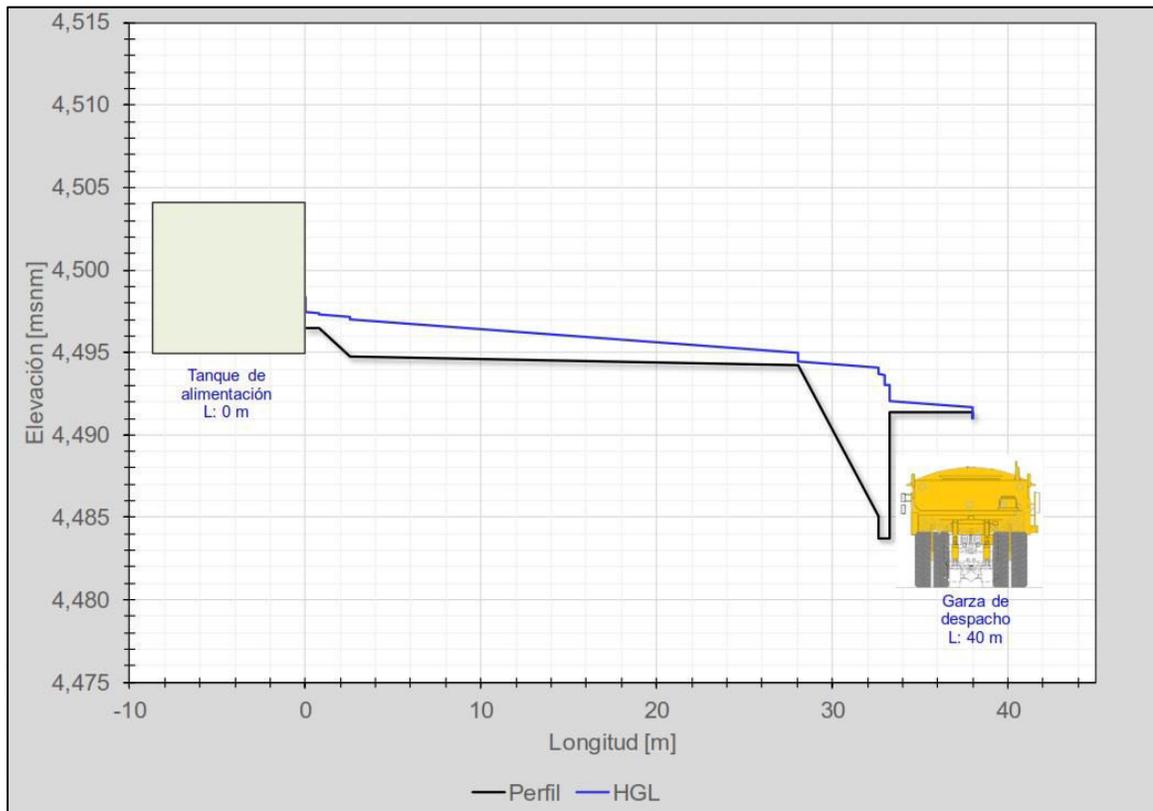
5.2. Tubería de descarga – camión cisterna

Debido a que el tanque de almacenamiento se encuentra siendo alimentado mediante la operación continua de 01 bomba, para el dimensionamiento del sistema descarga hacia camiones cisterna se debe tener en cuenta que el caudal de transporte depende del nivel del tanque almacenamiento. Por lo cual, a fin de cumplir con los requerimientos de la sección 4.1 se realizó un análisis en periodo extendido del nivel del tanque, las dimensiones del tanque propuesto son de 9 metros de diámetro y 9 metros de altura.

El perfil hidráulico del sistema en operación de diseño para alimentar a los tanques cisterna se muestra en la figura 5-4.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 5-6: Tubería de descarga hacia tanque cisterna.

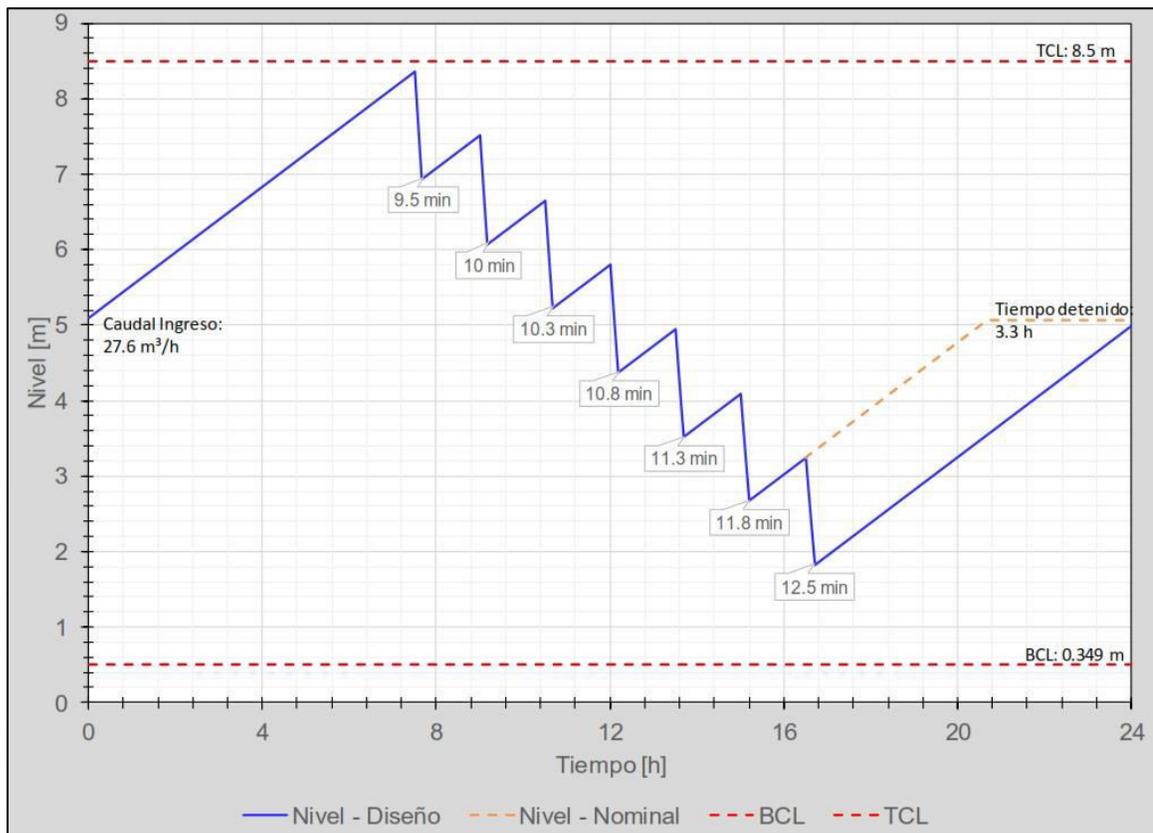


Nota: Elaboración propia.

La figura 5-5 muestra los resultados de este análisis teniendo en cuenta una tubería de descarga de HDPE PE4710 8" SDR 17, debido a que tuberías de menor diámetro exceden el tiempo de llenado del tanque de cisterna de acuerdo a los requerimientos de la sección 4.1. Como se puede observar para una carga de 6 camiones cisterna al día (operación nominal) el tiempo de llenado varía de 9.5 a 11.8 minutos, mientras que la condición de diseño (7 camiones cisterna al día) se analiza un tiempo de llenado de 12.5 minutos.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Figura 5-7: HGL – Análisis de tiempo extendido del tanque de almacenamiento de agua fresca.



Nota: Elaboración propia.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Conclusiones

- Se ha cumplido el objetivo de determinar los parámetros necesarios para la selección de las bombas de impulsión de agua fresca según los requerimientos de operación del sistema:
 - Operación nominal: Las bombas seleccionadas serán capaces de impulsar un caudal de $27.6 \frac{m^3}{h}$ (121.5 gpm) a un TDH de 231.64 metros con una potencia estándar del motor de 46.35 HP (01 bomba de operación + 01 bomba en stand by). La pérdida por fricción de la tubería es de 28.64 m (12.36% del TDH).
 - Operación eventual: Las bombas seleccionadas serán capaces de impulsar un caudal de $47.0 \frac{m^3}{h}$ (206.9 gpm) a un ADT de 285.47 metros con una potencia estándar del motor de 97 HP (02 bombas operando en paralelo). La pérdida por fricción de la tubería es de 80.73 m (28.27% del TDH).
- La tubería seleccionada para el sistema (4" Acero al carbono – 160 mm PEX) de bombeo de agua fresca ha sido seleccionada mediante un análisis de diámetro económico, las características de la tubería seleccionada se muestran en la tabla 5-1.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Recomendaciones y aportes

- Es recomendable, al seleccionar una bomba, que el punto de operación se encuentre a la izquierda del BEP debido a que en el tiempo éste tiende a moverse a la derecha provocando problemas de sobrecarga del motor y NPSH elevado.
- Según estándar ANSI/HI 9.6.1 Centrifugal an Vertical Pumps NPSH se recomienda una relación mínima entre el $NPSH_A / NPSH_R$ de 1.10.
- Para hallar el factor de fricción f implícito en la ecuación de Colebrooke-White utilizar el método numérico de Newton-Raphson. El factor de fricción es sensible para el cálculo de fricción en tramos largos.
- De mi consideración y aporte personal al presente informe profesional es el desarrollo de una hoja de cálculo en Excel para optimizar los cálculos de diferentes variables concernientes al tema. Teniendo como input principal las cotas de elevación y perfil brindado por el proyectista civil quien realizó el trazo in situ cuyos datos son la matriz para realizar los cálculos respectivo soportado en una hoja de cálculo Excel.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Bibliografía

1. Documento N° CKX003F-12021-0462-INF-00001 “Reporte Hidráulico – Sistema de Supresión de Polvo”. Chalcobamba Trucking Option – Engineering for ITS6. Las bambas Project, junio 2018.
2. Documento N° CF10755E-2133-0460-DCR-00001 “Criterio de diseño del Sistema contra incendio”. Ingeniería de detalle tracking option Chalcobamba. Las Bambas Project, marzo 2018.
3. Documento N° 25635-220-3PS-G000-00001 “Technical Specification for General Site Conditions”. Las Bambas Project, febrero 2013.
4. Documento N° 25635-220-3DR-P30-00001 “Design Criteria for Piping”. Las Bambas Project, octubre 2013 – Perú.
5. Documento N° 25635-220-3DR-P30-00003 “Design Criteria for Water Pipelines”. Las Bambas Project, mayo 2011 – Perú.
6. Documento N° 25635-220-3PS-P000-00011 “Especificación Técnica para Aislación Térmica de Cañerías”, Las Bambas, mayo 2018.
7. Documento N° 25635-220-3PS-EH00-00001 “Technical Specification for Heat Tracing”, Las Bambas, mayo 2018.
8. Documento N° 103436-2133-RPT-0602 “Memoria de Cálculo del Sistema Contra Incendio”. Ingeniería de detalle de Facilidades del Trucking Option de Chalcobamba. Las bambas, marzo 2018.
9. Crane (2010). Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipes. Technical Paper No. 410 - Metric Edition.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Anexos.

Anexo 1: Energía teórica en kilowatts.

Litres per Min.	Theoretical Power in kilowatts (kW) to Raise Water (at 15 C) to Different Heights														
	Metres														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45
20	0.007	0.013	0.020	0.026	0.033	0.039	0.046	0.052	0.059	0.065	0.082	0.098	0.114	0.131	0.147
40	0.013	0.026	0.039	0.052	0.065	0.078	0.091	0.105	0.118	0.131	0.163	0.196	0.229	0.261	0.294
60	0.020	0.039	0.059	0.078	0.098	0.118	0.137	0.157	0.176	0.196	0.245	0.294	0.343	0.392	0.441
80	0.026	0.052	0.078	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.261	0.327	0.392	0.457	0.523	0.588
100	0.033	0.065	0.098	0.131	0.163	0.196	0.229	0.261	0.294	0.327	0.408	0.490	0.572	0.653	0.735
120	0.039	0.078	0.118	0.157	0.196	0.235	0.274	0.314	0.353	0.392	0.490	0.588	0.686	0.784	0.882
140	0.046	0.091	0.137	0.183	0.229	0.274	0.320	0.366	0.412	0.457	0.572	0.686	0.800	0.915	1.029
160	0.052	0.105	0.157	0.209	0.261	0.314	0.366	0.418	0.470	0.523	0.653	0.784	0.915	1.045	1.176
180	0.059	0.118	0.176	0.235	0.294	0.353	0.412	0.470	0.529	0.588	0.735	0.882	1.029	1.176	1.323
200	0.065	0.131	0.196	0.261	0.327	0.392	0.457	0.523	0.588	0.653	0.817	0.980	1.143	1.307	1.470
250	0.082	0.163	0.245	0.327	0.408	0.490	0.572	0.653	0.735	0.817	1.021	1.225	1.429	1.633	1.838
300	0.098	0.196	0.294	0.392	0.490	0.588	0.686	0.784	0.882	0.980	1.225	1.470	1.715	1.960	2.205
350	0.114	0.229	0.343	0.457	0.572	0.686	0.800	0.915	1.029	1.143	1.429	1.715	2.001	2.287	2.573
400	0.131	0.261	0.392	0.523	0.653	0.784	0.915	1.045	1.176	1.307	1.633	1.960	2.287	2.614	2.940
450	0.147	0.294	0.441	0.588	0.735	0.882	1.029	1.176	1.323	1.470	1.838	2.205	2.573	2.940	3.308
500	0.163	0.327	0.490	0.653	0.817	0.980	1.143	1.307	1.470	1.633	2.042	2.450	2.859	3.267	3.675
600	0.196	0.392	0.588	0.784	0.980	1.176	1.372	1.568	1.764	1.960	2.450	2.940	3.430	3.920	4.410
700	0.229	0.457	0.686	0.915	1.143	1.372	1.601	1.829	2.058	2.287	2.859	3.430	4.002	4.574	5.145
800	0.261	0.523	0.784	1.045	1.307	1.568	1.829	2.091	2.352	2.614	3.267	3.920	4.574	5.227	5.880
900	0.294	0.588	0.882	1.176	1.470	1.764	2.058	2.352	2.646	2.940	3.675	4.410	5.145	5.880	6.615
1000	0.327	0.653	0.980	1.307	1.633	1.960	2.287	2.614	2.940	3.267	4.084	4.900	5.717	6.534	7.351
1250	0.408	0.817	1.225	1.633	2.042	2.450	2.859	3.267	3.675	4.084	5.105	6.125	7.146	8.167	9.188
1500	0.490	0.980	1.470	1.960	2.450	2.940	3.430	3.920	4.410	4.900	6.125	7.351	8.576	9.801	11.03
2000	0.653	1.307	1.960	2.614	3.267	3.920	4.574	5.227	5.880	6.534	8.167	9.801	11.43	13.07	14.70

Litres per Min.	Metres						
	50	55	60	70	80	90	100
20	0.163	0.180	0.196	0.229	0.261	0.294	0.327
40	0.327	0.359	0.392	0.457	0.523	0.588	0.653
60	0.490	0.539	0.588	0.686	0.784	0.882	0.980
80	0.653	0.719	0.784	0.915	1.045	1.176	1.307
100	0.817	0.898	0.980	1.143	1.307	1.470	1.633
120	0.980	1.078	1.176	1.372	1.568	1.764	1.960
140	1.143	1.258	1.372	1.601	1.829	2.058	2.287
160	1.307	1.437	1.568	1.829	2.091	2.352	2.614
180	1.470	1.617	1.764	2.058	2.352	2.646	2.940
200	1.633	1.797	1.960	2.287	2.614	2.940	3.267
250	2.042	2.246	2.450	2.859	3.267	3.675	4.084
300	2.450	2.695	2.940	3.430	3.920	4.410	4.900
350	2.859	3.144	3.430	4.002	4.574	5.145	5.717
400	3.267	3.594	3.920	4.574	5.227	5.880	6.534
450	3.675	4.043	4.410	5.145	5.880	6.615	7.351
500	4.084	4.492	4.900	5.717	6.534	7.351	8.167
600	4.900	5.390	5.880	6.861	7.841	8.821	9.801
700	5.717	6.289	6.861	8.004	9.147	10.29	11.43
800	6.534	7.187	7.841	9.147	10.45	11.76	13.07
900	7.351	8.086	8.821	10.29	11.76	13.23	14.70
1000	8.167	8.984	9.801	11.43	13.07	14.70	16.33
1250	10.21	11.23	12.25	14.29	16.33	18.38	20.42
1500	12.25	13.48	14.70	17.15	19.60	22.05	24.50
2000	16.33	17.97	19.60	22.87	26.14	29.40	32.67

Specific gravity of water page A-6
 Specific gravity of liquids other than water page A-7

Theoretical Power = $\frac{QH\rho}{6116 \times 10^3} = \frac{QP}{600}$ kilowatts

Power Demand (Brake Power) = $\frac{\text{Theoretical Power}}{e_p}$

where: Q = Flow rate in litres per minute
 H = Pump head in metres
 ρ = Density of liquid in kg/m³
 p = Pressure in bar gauge
 e_p = Pump efficiency

Overall efficiency (e_o) takes into account all losses in the pump and driver.

$e_o = e_p e_D e_T$

where: e_D = driver efficiency
 e_T = transmission efficiency

e_v = volumetric efficiency

$e_v (\%) = \frac{\text{actual pump displacement } (Q)}{\text{theoretical pump displacement } (Q)} (100)$

Note: For fluids other than water, multiply table values by specific gravity. In pumping liquids with a viscosity considerably higher than that of water, the pump capacity and head are reduced. To calculate the power required for such fluids, pipe friction head must be added to the elevation head to obtain the total head; this value is inserted in the first power equation given above.

Nota: Adaptado de Crane (2010). *Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipes. Technical Paper No.*

410 - Metric Edition.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

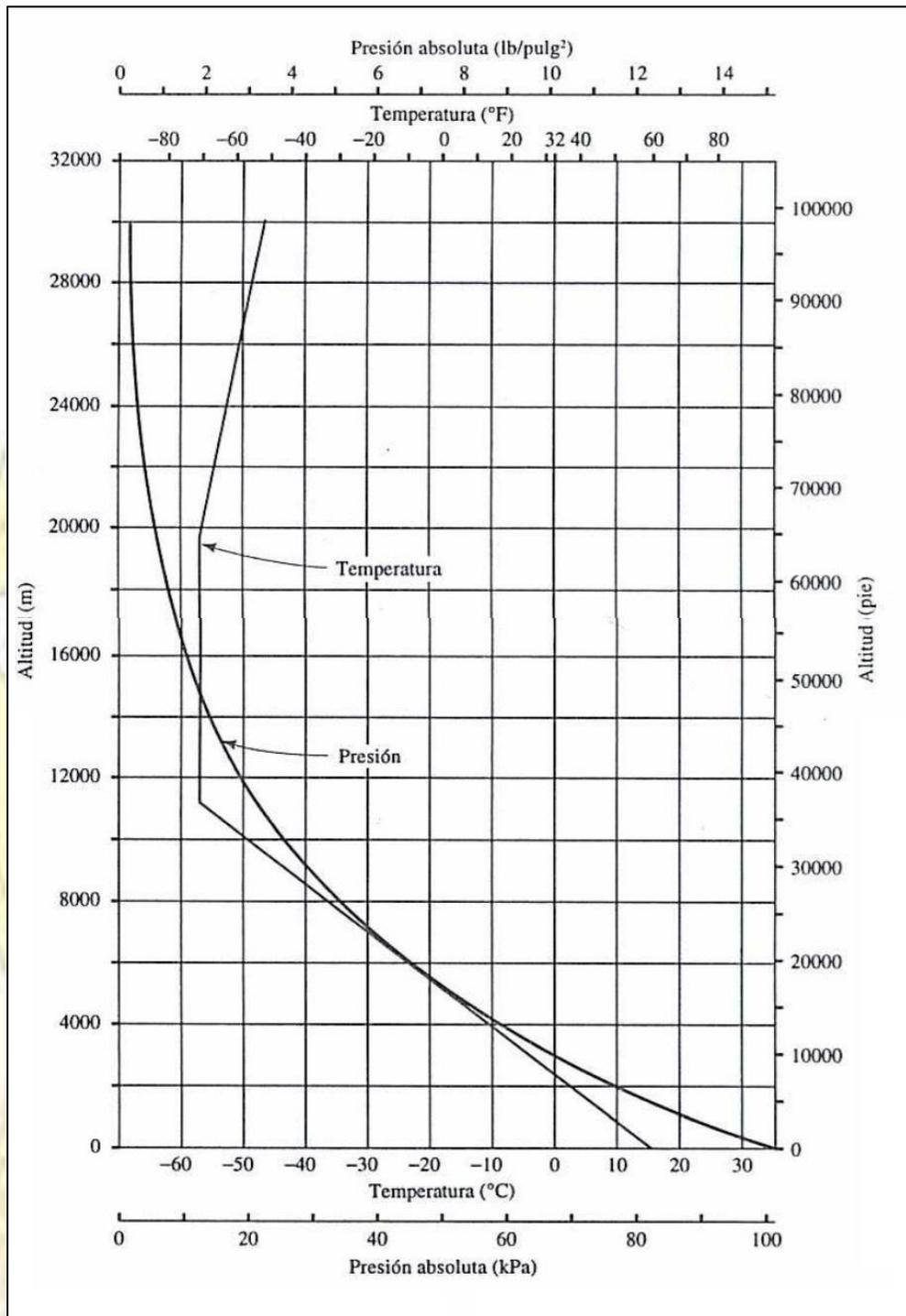
Anexo 2: Dimensiones de la tubería de acero al carbono.

Diámetro exterior	Grosor de la pared		Diámetro interior			Área de flujo		
	(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)	(pie)	(mm)	(pie ²)	(m ²)
1/8	3.18	0.032	0.813	0.061	0.00508	1.549	2.029 × 10 ⁻⁵	1.885 × 10 ⁻⁶
		0.035	0.889	0.055	0.00458	1.397	1.650 × 10 ⁻⁵	1.533 × 10 ⁻⁶
3/16	4.76	0.032	0.813	0.124	0.01029	3.137	8.319 × 10 ⁻⁵	7.728 × 10 ⁻⁶
		0.035	0.889	0.117	0.00979	2.985	7.530 × 10 ⁻⁵	6.996 × 10 ⁻⁶
1/4	6.35	0.035	0.889	0.180	0.01500	4.572	1.767 × 10 ⁻⁴	1.642 × 10 ⁻⁵
		0.049	1.24	0.152	0.01267	3.861	1.260 × 10 ⁻⁴	1.171 × 10 ⁻⁵
5/16	7.94	0.035	0.889	0.243	0.02021	6.160	3.207 × 10 ⁻⁴	2.980 × 10 ⁻⁵
		0.049	1.24	0.215	0.01788	5.448	2.509 × 10 ⁻⁴	2.331 × 10 ⁻⁵
3/8	9.53	0.035	0.889	0.305	0.02542	7.747	5.074 × 10 ⁻⁴	4.714 × 10 ⁻⁵
		0.049	1.24	0.277	0.02308	7.036	4.185 × 10 ⁻⁴	3.888 × 10 ⁻⁵
1/2	12.70	0.049	1.24	0.402	0.03350	10.21	8.814 × 10 ⁻⁴	8.189 × 10 ⁻⁵
		0.065	1.65	0.370	0.03083	9.40	7.467 × 10 ⁻⁴	6.937 × 10 ⁻⁵
5/8	15.88	0.049	1.24	0.527	0.04392	13.39	1.515 × 10 ⁻³	1.407 × 10 ⁻⁴
		0.065	1.65	0.495	0.04125	12.57	1.336 × 10 ⁻³	1.242 × 10 ⁻⁴
3/4	19.05	0.049	1.24	0.652	0.05433	16.56	2.319 × 10 ⁻³	2.154 × 10 ⁻⁴
		0.065	1.65	0.620	0.05167	15.75	2.097 × 10 ⁻³	1.948 × 10 ⁻⁴
7/8	22.23	0.049	1.24	0.777	0.06475	19.74	3.293 × 10 ⁻³	3.059 × 10 ⁻⁴
		0.065	1.65	0.745	0.06208	18.92	3.027 × 10 ⁻³	2.812 × 10 ⁻⁴
1	25.40	0.065	1.65	0.870	0.07250	22.10	4.128 × 10 ⁻³	3.835 × 10 ⁻⁴
		0.083	2.11	0.834	0.06950	21.18	3.794 × 10 ⁻³	3.524 × 10 ⁻⁴
1 1/4	31.75	0.065	1.65	1.120	0.09333	28.45	6.842 × 10 ⁻³	6.356 × 10 ⁻⁴
		0.083	2.11	1.084	0.09033	27.53	6.409 × 10 ⁻³	5.954 × 10 ⁻⁴
1 1/2	38.10	0.065	1.65	1.370	0.1142	34.80	1.024 × 10 ⁻²	9.510 × 10 ⁻⁴
		0.083	2.11	1.334	0.1112	33.88	9.706 × 10 ⁻³	9.017 × 10 ⁻⁴
1 3/4	44.45	0.065	1.65	1.620	0.1350	41.15	1.431 × 10 ⁻²	1.330 × 10 ⁻³
		0.083	2.11	1.584	0.1320	40.23	1.368 × 10 ⁻²	1.271 × 10 ⁻³
2	50.80	0.065	1.65	1.870	0.1558	47.50	1.907 × 10 ⁻²	1.772 × 10 ⁻³
		0.083	2.11	1.834	0.1528	46.58	1.835 × 10 ⁻²	1.704 × 10 ⁻³

Nota: Adaptado de Crane (2010). *Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipes. Technical Paper No. 410 - Metric Edition.*

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Anexo 3: Propiedades del aire.



Nota: Adaptado de I. E. Idelchik (2005). *Handbook of hydraulic resistance, 4th revised and augment edition.*

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Anexo 4: Rugosidad de diversos materiales (1/2).

ϵ					
Material	Condición	ft	mm	Incertidumbre, %	
Acero	Lámina metálica, nueva	0,00016	0,05	±60	
	Inoxidable	0,000007	0,02	±50	
	Comercial, nuevo	0,00015	0,046	±30	
	Estriado	0,01	3,0	±70	
	Oxidado	0,007	2,0	±50	
Hierro	Fundido, nuevo	0,00085	0,26	±50	
	Forjado, nuevo	0,00015	0,046	±20	
	Galvanizado, nuevo	0,0005	0,15	±40	
	Fundido asfáltico	0,0004	0,12	±50	
Latón	Laminado	0,000007	0,002	±50	
Plástico	Tubo laminado	0,000005	0,0015	±60	
	—	Liso	Liso		
Vidrio	—	Liso	Liso		
	—	Liso	0,04	±60	
Hormigón	—	Rugoso	2,0	±50	
	—	Liso	0,01	±60	
Caucho	—	0,000033	0,01	±60	
Madera	En duelas	0,0016	0,5	±40	

Nota: Adaptado de Frank M. White (2003). *Mecánica de fluidos 5ta edición*.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

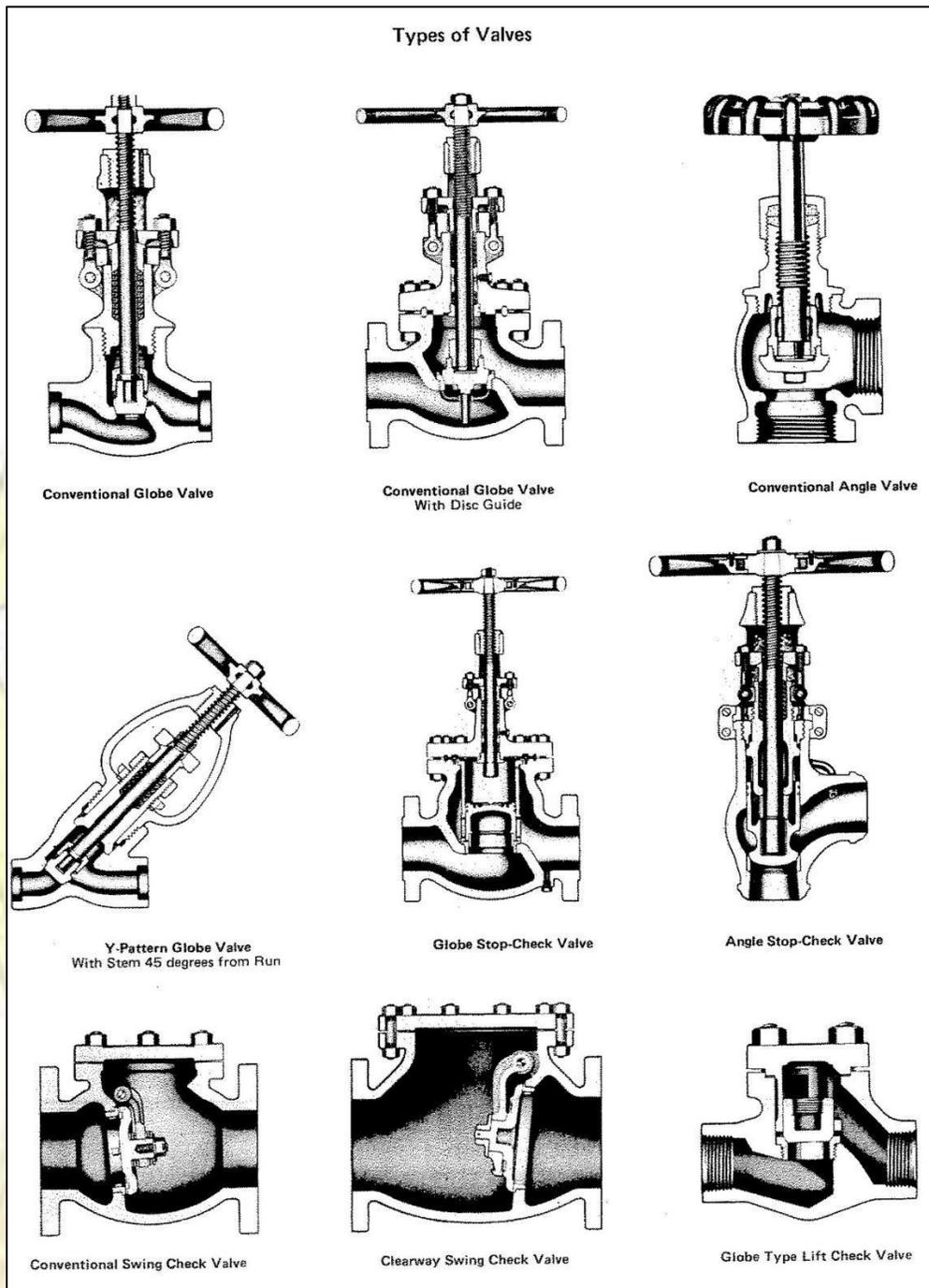
Anexo 5: Rugosidad de diversos materiales (2/2).

Material	Condición	ϵ			Incertidumbre, %
		ft	mm		
Acero	Lámina metálica, nueva	0,00016	0,05		±60
	Inoxidable	0,000007	0,02		±50
	Comercial, nuevo	0,00015	0,046		±30
	Estriado	0,01	3,0		±70
	Oxidado	0,007	2,0		±50
Hierro	Fundido, nuevo	0,00085	0,26		±50
	Forjado, nuevo	0,00015	0,046		±20
	Galvanizado, nuevo	0,0005	0,15		±40
	Fundido asfáltico	0,0004	0,12		±50
Latón	Laminado	0,000007	0,002		±50
Plástico	Tubo laminado	0,000005	0,0015		±60
	—	Liso	Liso		
Vidrio	—	0,00013	0,04		±60
	—	0,007	2,0		±50
Hormigón	Liso	0,000033	0,01		±60
	Rugoso	0,0016	0,5		±40
Caucho	Liso				
Madera	En duelas				

Nota: Adaptado de Frank M. White (2003). *Mecánica de fluidos 5ta edición*.

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

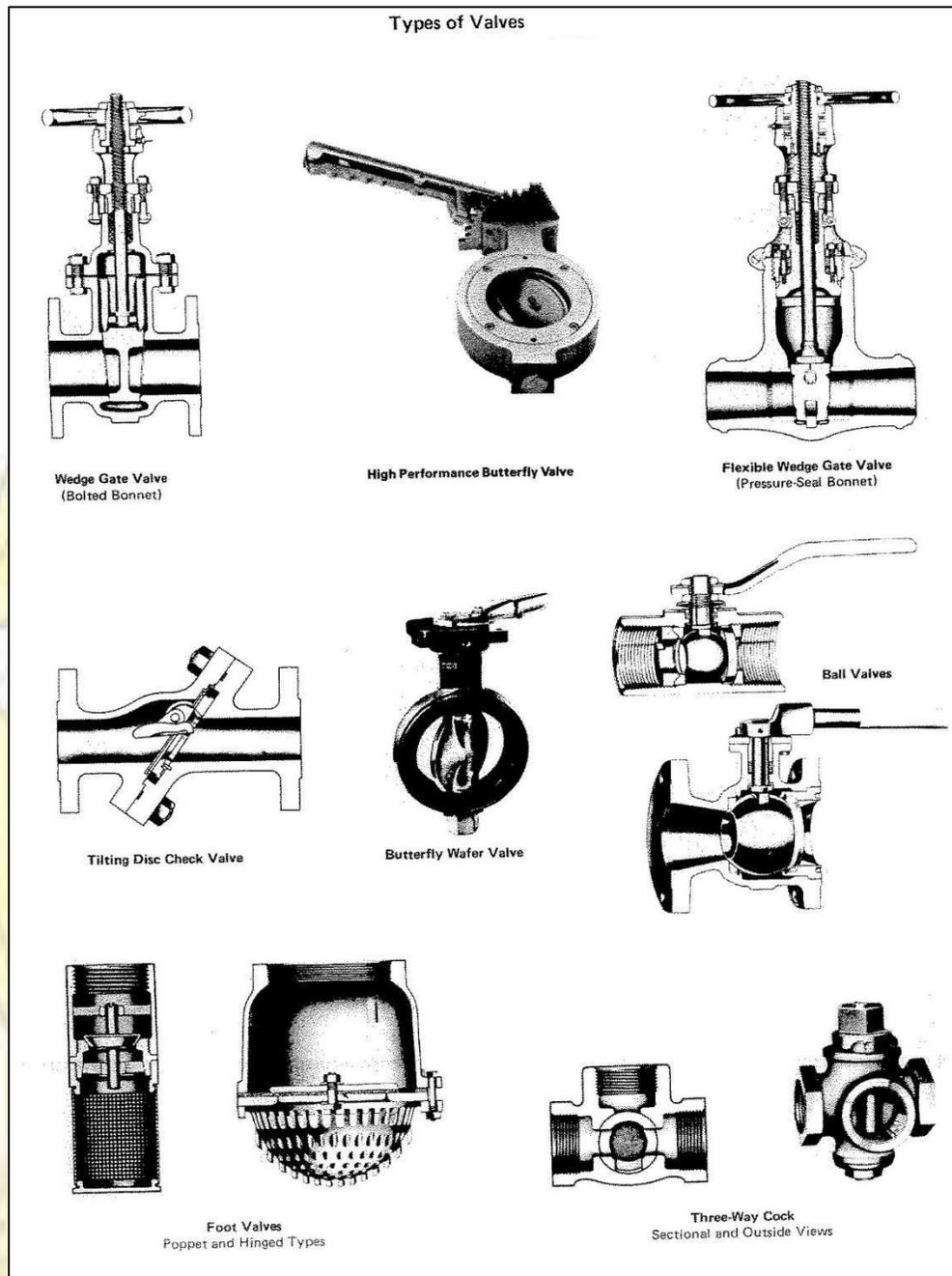
Anexo 6: Tipo de válvulas (1/2).



Nota: Crane (2010). *Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipes. Technical Paper No. 410 - Metric Edition.*

CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO

Anexo 7: Tipo de válvulas (2/2).



Nota: Crane (2010). *Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipes. Technical Paper No. 410 - Metric Edition.*