



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 del desaguado del tajo
Chalcobamba**

MONOGRAFÍA TÉCNICA

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Alfredo André ALTUNA RIOS

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

Altuna, A. (2022). *Cálculo hidráulico del sistema del desaguado del tajo Chalcobamba*. [Monografía técnica 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

Número de documento de identidad	46426898
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-2599-0613

Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	ARÍSTIDES RAMON SERRUTO COLQUE
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01284486
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MARRIQUE
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	

Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.5.1. Energética
Grupo de investigación	
Agencia de financiamiento	PROPIA
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Apurímac Provincia: Cotabamba Distrito: Chalcobamba Latitud: 75° 51' 0.8" Longitud: -58° 26' 2.3"
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería mecánica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.01



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

XIII CAP DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE LA MONOGRAFÍA TÉCNICA PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS, MODALIDAD DE TITULACIÓN M-3 - POR SUFICIENCIA PROFESIONAL

Siendo las 10:00 a.m. del día sábado 19 de noviembre de 2022, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la presidencia del Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE y con la asistencia de los miembros Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE y el Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA, se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de la Monografía Técnica para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad de Titulación M-3 Por Suficiencia Profesional, del Bachiller:

ALFREDO ANDRÉ ALTUNA RIOS

El Presidente del Jurado Examinador dio lectura del Resumen del Expediente, e invitó al Bachiller ALFREDO ANDRÉ ALTUNA RIOS, a realizar la Exposición del trabajo de la Monografía Técnica titulada "CÁLCULO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado Examinador, el Presidente invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la sala de sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado. Se procedió a promediar la nota final del curso de actualización y la nota de la sustentación para obtener la calificación final.

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:

...DIECISIETE...(17).

El Presidente del Jurado Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller ALFREDO ANDRÉ ALTUNA RIOS Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 10:45 a.m. del mismo día, se levantó la sesión.

Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE
PRESIDENTE DEL JURADO

Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE
MIEMBRO DEL JURADO

Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA
MIEMBRO DEL JURADO



UNMSM

Firmado digitalmente por LOZANO
BARTRA Whualkuier Enrique FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 21.12.2022 21:44:50 -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/85286349901?pwd=dXJhVWpwTXFKdkRwa2FIUHdzdlldjz09>

ID de reunión: 852 8634 9901

Código de acceso: 300590

Grabación archivada en el siguiente enlace:

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 DEL DESAGUADO CHALCOBAMBA"
7. Autor del documento (2)
ALTUNA RIOS ALFREDO ANDRÉ
8. Fecha de recepción del documento 6/09/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes 6/09/22
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
5%
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 23 /12 /22



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

ÍNDICE

1	Resumen.....	9
1	Capítulo I-Condiciones Generales	10
1.1	Introducción	10
1.2	Planteamiento del problema.....	11
1.3	Procesos productivos de minerales en la unidad minera Las Bambas	12
1.4	Objetivos	13
1.4.1	Objetivo General.....	13
1.4.2	Objetivos Específicos.....	13
1.5	Justificación.....	14
1.6	Limitaciones del Tema.....	15
1.7	Sistema de Unidades	16
2	Capítulo II-Fundamentos Teóricos	17
2.1.	Antecedentes	17
2.2.	Códigos de Diseño	18
2.3.	Definiciones y Abreviaciones	19
2.4.	Mecánica de Fluidos.....	20
2.5.	Sistema de Unidades	21
2.6.	Propiedades de los fluidos.....	23
2.6.1.	Temperatura (T)	23

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

2.6.2.	Densidad (ρ).....	24
2.6.3.	El peso específico (γ).....	25
2.6.4.	Presión atmosférica (P_{atm})	26
2.6.5.	Presión de vapor (P_v)	26
2.6.6.	Viscosidad dinámica o absoluta (μ).....	27
2.6.7.	Viscosidad cinemática (ν).....	28
2.7.	Conservación de la energía-ecuación de Bernoulli.....	30
2.8.	Ecuación general de la energía.....	32
2.9.	Caudal volumétrico y caudal másico	34
2.10.	Número de Reynolds y número de Froude.....	34
2.11.	Ecuación de Darcy- Weisbach y Colebrook- White.....	35
2.12.	Pérdidas primarias y secundarias de energía	37
2.13.	Altura dinámica total	39
2.14.	Altura Neta Positiva en la succión (NPSH).....	40
2.15.	Potencia hidráulica (BHP).....	41
2.16.	Profundidad de flujo normal-Ecuación de Manning	42
3	Capítulo III-Descripción del Problema.....	44
3.1.	Descripción del problema.....	44
4	Capítulo IV-Bases y Criterio de Diseño	46
4.1.	Datos de entrada.....	46

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

4.2.	Escenarios de operación	47
4.3.	Condiciones de instalación de las estaciones de bombas	49
4.4.	Escenarios para el desaguado del tajo Chalcobamba	49
5	Capítulo V-Diseño hidráulico	51
5.1.	Estación de inicio Poza N°1	51
5.1.1.	Resultados hidráulicos, tubería a superficie libre entre la Poza N°1 y N°2	52
5.2.	Estación de la Poza N°2 hacia la Poza N°6.....	55
5.2.1.	Resultados hidráulicos, tubería a superficie libre entre la Poza N°2 y N°6	57
5.3.	Estación de la Poza N°3 hacia la Poza N°2.....	60
5.3.1.	Resultados hidráulicos, tubería a superficie libre entre la Poza N°3 y N°2	62
5.4.	Estación de la Poza N°4 hacia la Poza N°6.....	65
5.4.1.	Resultados hidráulicos, tubería a superficie libre entre la Poza N°4 y N°6	67
5.5.	Estación de la Poza N°5 hacia la Poza N°6.....	70
5.5.1.	Resultados hidráulicos, tubería a superficie libre entre la Poza N°5 y N°6	72
5.6.	Estación de bombeo Poza N°6 hacia cajón de Paso N°1	75
5.6.1.	Perfil del terreno	75
5.6.2.	Evaluación del perfil hidráulico en estado estable.....	76
5.7.	Cálculo de parámetros hidráulicos de la Poza N°6 hacia Cajón de paso N°1....	78
5.7.1.	Para 01 bomba en operación	78
5.7.2.	Para 02 bomba en operación.....	85

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

5.8.	Resultados del análisis de la tubería de impulsión.....	90
5.9.	Requerimiento de bombeo, bombas 0926-PPV-0001/0002.....	91
6	Conclusiones.....	92
7	Recomendaciones.....	94
8	Bibliografía.....	95
9	Anexos.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Ubicación geográfica del Tajo Chalcobamba.....	10
Figura 2:	Ubicación de las Pozas N°1, N°2, N°3, N°4, N°5, N°6 y el Cajón de paso.	11
Figura 3:	Diagrama de flujo del proceso de producción de concentrado de cobre.....	13
Figura 4:	Viscosidad absoluta o dinámica de fluidos comunes a 1 atm.....	28
Figura 5:	Viscosidad cinemática de fluidos comunes a 1 atm.....	29
Figura 6:	Elementos de un fluido para la ecuación de Bernoulli.....	31
Figura 7:	Línea de nivel de energía y línea de altura motriz y constante Bernoulli.....	32
Figura 8:	Sistema de flujo para la ecuación general de la energía.....	33
Figura 9:	Diagrama de Moody para flujos en sección circular.....	37
Figura 10:	TDH para un sistema de tuberías.....	40
Figura 11:	Esquema para el cálculo del NPSHa.....	41
Figura 12:	Esquema de operación del desaguado del tajo Chalcobamba.....	45
Figura 13:	Perfil del terreno comprendidas entre Poza N°1 y Poza N°2.....	52
Figura 14:	Perfil del terreno comprendidas entre la Poza N°2 y Poza N°6.....	57

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Figura 15: Perfil del terreno comprendidas entre la Poza N°3 y Poza N°2.....	62
Figura 16: Perfil del terreno comprendidas entre la Poza N°4 y Poza N°6.....	67
Figura 17: Perfil del terreno comprendidas entre la Poza N°5 y Poza N°6.....	72
Figura 18: Perfil del terreno de la tubería de impulsión.	76
Figura 19: Gradiente hidráulico de tuberías de acero al carbono 16", 02 bombas operando en paralelo y caudal de diseño 728.6 m ³ /h.....	77
Figura 20: Gradiente hidráulico de tuberías de acero al carbono 16", 01 bombas operando en paralelo y caudal de diseño 377.0 m ³ /h.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla del Sistema internacional de Unidades. Magnitudes fundamentales.....	21
Tabla 2: Tabla del Sistema internacional de Unidades. Magnitudes cinemáticas.	22
Tabla 3: Tabla del Sistema internacional de Unidades. Magnitudes dinámicas.....	22
Tabla 4: Pesos específicos de líquidos comunes a 1atm y 20°C.....	25
Tabla 5: Valores de coeficiente de rugosidad para conductos nuevos y limpios.....	36
Tabla 6: Coeficiente K para diferentes accesorios y válvulas.	38
Tabla 7: Coeficiente de rugosidad de Manning	43
Tabla 8: Condiciones del sitio para el sistema.....	46
Tabla 9: Consideraciones hidráulicas para el sistema.....	46
Tabla 10: Propiedades de transporte de agua fresca para el sistema.	47
Tabla 11: Caudales de acuerdo a estudio hidrológico (caudales con trasvase entre Pozas.	48

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 12: Condiciones de instalación de los sistemas de impulsión y descarga de agua de desaguado del tajo.....	49
Tabla 13: Parámetros hidráulico del acueducto Poza N°1 hacia Poza N°2.....	51
Tabla 14: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 1.9%.....	53
Tabla 15: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02, en los tramos con pendiente 275%.....	54
Tabla 16: Parámetros hidráulico del acueducto Poza N°2 hacia Poza N°6.....	56
Tabla 17: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 1.5%.....	58
Tabla 18: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 275%.....	59
Tabla 19: Parámetros hidráulico del acueducto Poza N°3 hacia Poza N°2.....	61
Tabla 20: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 1.8%.....	63
Tabla 21: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 289.1%.....	64
Tabla 22: Parámetros hidráulico del acueducto Poza N°4 hacia Poza N°6.....	66
Tabla 23: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 1.8%.....	68
Tabla 24: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 274.8%.....	69
Tabla 25: Parámetros hidráulico del acueducto Poza N°5 hacia Poza N°6.....	71

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 26 : Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 1.5%.....	73
Tabla 27: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 275.0%.....	74
Tabla 28: Datos de ingreso para 01 bomba tramo 1.	78
Tabla 29: Datos de ingreso para 01 bomba tramo 2.	79
Tabla 30: Parámetros para hallar el NPSH	85
Tabla 31: Resultados del análisis hidráulico de la tubería de impulsión.	90
Tabla 32: Requerimiento de bombeo.	91

ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de flujo en canal abierto.	96
Anexo 2: Relación de estándares y dimensiones (SDR).	97
Anexo 3: Espesores mínimos para tubería HDPE.	98
Anexo 4: Rugosidad de diversos materiales (1/2).	99

Palabras claves: Acueducto, hidráulica, tubería, cálculo, diseño.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Resumen

La presente monografía técnica tiene como objetivo realizar los cálculos hidráulicos para el desaguado del tajo Chalcobomba de la minera Las Bambas, ello consta de 02 partes.

La primera tiene objetivo evaluar los tirantes hidráulicos de los acueductos (tubería despresurizada) que mediante energía potencial transporta el fluido a través de tuberías de diámetros nominales de DN 6 y DN 10 de material HDPE-SDR17. La línea de flujo inicia en la poza N°1, poza N°2, poza N°3, poza N°4 y poza N°5 convergiendo en la poza N°6. Los diámetros nominales de los acueductos son de 6" y 10" y de material HDPE –SDR17 y evaluará si el tirante hidráulico del transporte del fluido se encuentra fuera de los rangos del flujo crítico (el número de Froude debe estar fuera del rango 0.8-1.4).

La segunda parte tiene como objetivo hallar el diámetro hidráulico óptimo para impulsar el fluido desde la poza N°6 hacia el cajón de paso N°1 mediante energía mecánica, es decir se realizarán los cálculos para hallar la potencia de la bomba. El material de la tubería será de acero al carbono. Se calcularán los parámetros hidráulicos como las pérdidas menores causado por la fricción del fluido con las paredes de la tubería y la altura dinámica total.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Capítulo I-Condicionales Generales

1.1 Introducción

Chalcobamba es un yacimiento minero perteneciente a la unidad minera Las Bambas, productor de Molibdeno, Plata, Oro, Zinc y concentrado de Cobre a mayor escala (Chile es el primer productor de Sudamérica seguido por Las Bambas). Inicialmente fue operado por Xtrata Cooper una compañía suiza en el año 2004 y actualmente se encuentra operado por MMG Limited (MMG) desde el 2014.

El yacimiento Chalcobamba se encuentra en el departamento de Apurímac, a unos 70 km de Cuzco con coordenadas UTM E:786884.3 N:8444206 y una altitud de 4360 msnm. Ver figura 1.

Figura 1: Ubicación geográfica del Tajo Chalcobamba.



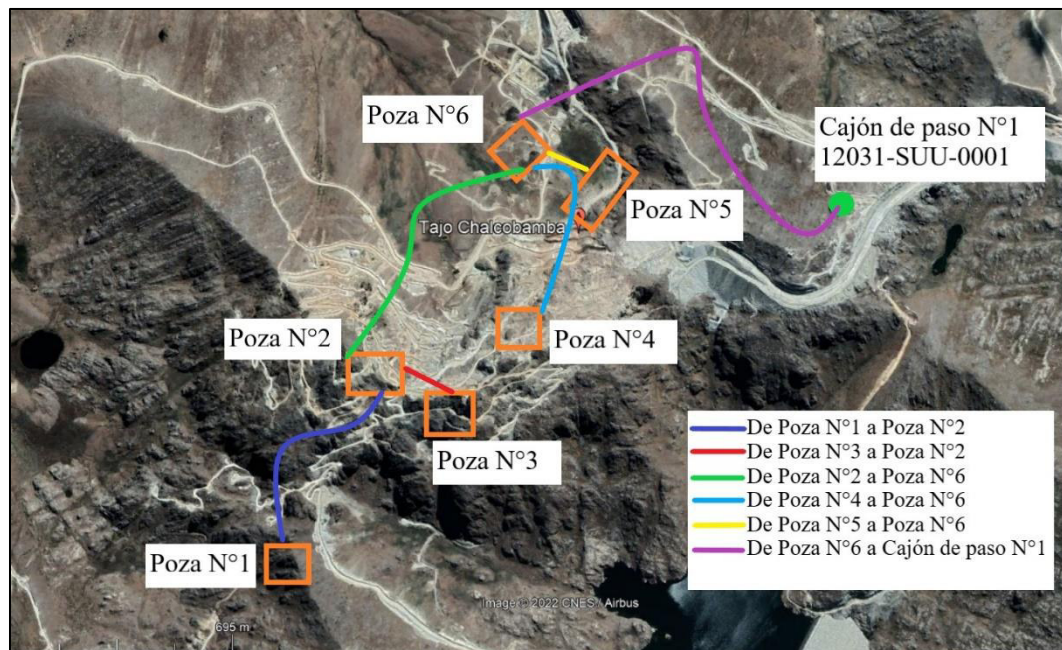
Nota: Adaptado de Google Earth (<https://earth.google.com/web>)

Cabe resaltar que el Tajo Chalcobamba apenas empezó su explotación en el año 2021 y está proyectado su explotación hasta el año 2033. Considerar que los proyectos mineros son realizados a largo plazo debido a su gran envergadura e inversión.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

La presente monografía técnica evaluará el comportamiento hidráulico de los acueductos que inician en la Poza N°1, Poza N°2, Poza N°3, Poza N°4, Poza N°5 y Poza N°6. Y evaluará el sistema de impulsión desde la Poza N°6 hasta la descarga del Cajón N°1. Ver figura 2.

Figura 2: Ubicación de las Pozas N°1, N°2, N°3, N°4, N°5, N°6 y el Cajón de paso.



Nota: Elaboración propia.

1.2 Planteamiento del problema

En el proyecto Las Bambas se encuentran construido pozas de almacenamiento de agua para el proceso de molienda y flotación en donde se procesa el relave para la extracción de los minerales como el cobre siendo el principal, para ello se utiliza el líquido agua para mezclar los sólidos para el transporte de la pulpa y su posterior extracción. Las pozas se encuentran a una elevación de tal manera que fluye por energía potencial gravitatoria convergiendo hacia una poza de menor elevación (ver figura 13).

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Para ello se tiene que analizar los tirantes hidráulicos de los acueductos pre seleccionados (tubería despresurizadas) para direccionar el fluido de tal manera que cumplan los parámetros hidráulicos y evitar el rebalse o colapso de la tubería. Posterior a ello, en la poza de convergencia el fluido debe ser impulsado para su respectivo requerimiento mediante una tubería de impulsión a través de energía mecánica (bomba). Describiremos el problema en el capítulo III.

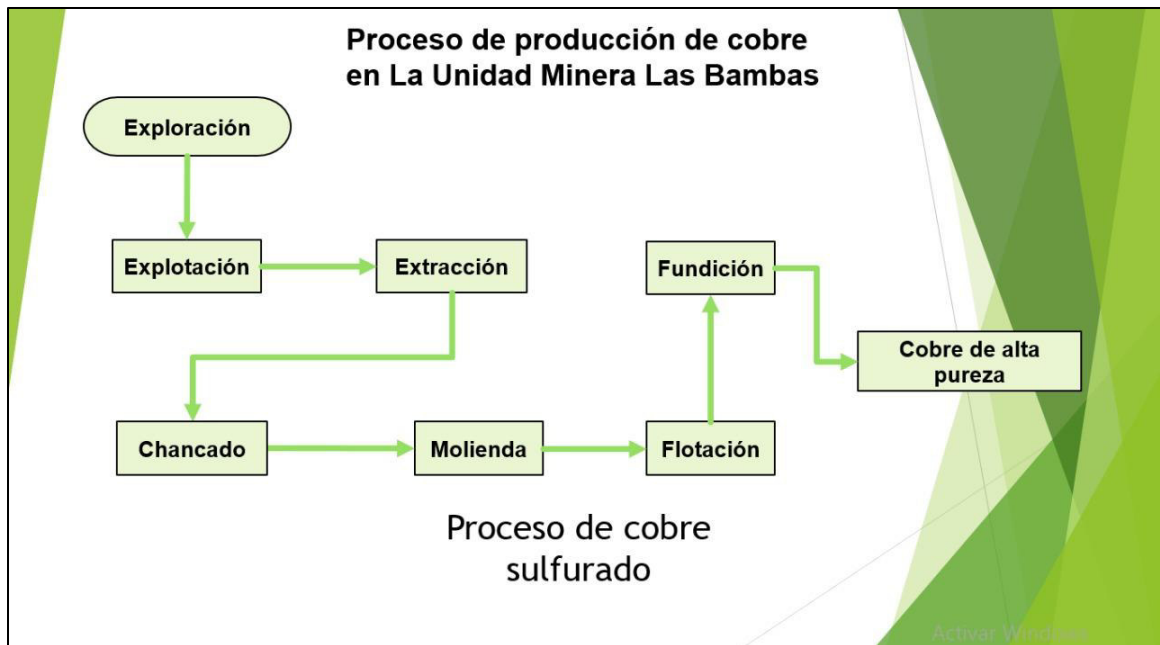
1.3 Procesos productivos de minerales en la unidad minera Las Bambas

En la unidad minera Las Bambas tiene como principal metal de producción el concentrado de cobre y Molibdeno. Cabe resaltar que existen 02 procesos para la producción de concentrado de cobre; es a través de cobre oxidado o cobre sulfurado. En la unidad minera Las Bambas es a través del cobre sulfurado. Siguiendo procesos mencionados a continuación se logra explorar, extraer y procesar los metales.

- Exploración, explotación, voladura y extracción
- 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).
- Flotación (Contiene la pulpa de cobre sulfurado).
- Fundición del cobre sulfatado.

A continuación, en la figura 3 se muestra el diagrama de proceso para la producción de cobre concentrado a través de cobre sulfurado.

Figura 3: Diagrama de flujo del proceso de producción de concentrado de cobre.



Nota: Elaboración propia.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

El objetivo general de la presente monografía técnica es el cálculo de los tirantes hidráulicos de las tuberías en forma de acueductos (tuberías de superficie libre-despresurizadas) que conectan pozas para el transporte de desaguado a través de energía gravitatoria hacia una poza de menor elevación, en ella impulsaremos el fluido hacia un cajón de paso que se encuentra con mayor elevación mediante 02 bombas y una tubería, determinando el diámetro de la tubería y la potencia de la bombas de transporte del fluido.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a. Analizar el tirante hidráulico de los acueductos que conectan la Poza N°1, Poza N°2, Poza N°3, Poza N°4 y Poza N°5 con la poza de menor elevación Poza N°6 a

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

través de energía potencial gravitatoria. Los diámetros nominales de los acueductos son de 6" y 10" y de material HDPE –SDR17

- b. El análisis del tirante hidráulico nos proporcionará parámetros hidráulicos como la pendiente y el número de Froude para evaluar la profundidad de flujo, si esta permanece entre el 30% y 65% del diámetro de la tubería, así aseguramos su transporte alejándonos del flujo crítico (El número de Froude debe estar fuera del rango 0.8-1.4)
- c. Cálculo del diámetro óptimo de la tubería de impulsión desde la Poza N°6 hacia el Cajón de Paso N°1 y los requerimientos hidráulicos de la bomba para impulsar el fluido.

1.5 Justificación

Unas de las aplicaciones de la mecánica de fluidos es el diseño de acueductos que intervienen en el proceso minero para el transporte de fluidos, en este caso la presente monografía técnica abarca el estudio y análisis hidráulicos que atraviesa el fluido a través de una tubería despresurizada que conceptúa un acueducto. De igual manera, otra de las aplicaciones importantes para la mecánica de fluidos es el diseño hidráulico del diámetro óptimo de una línea de tubería. Las dos aplicaciones mencionadas viene acompañado del aspecto económico ya que no se puede sobredimensionar el diseño, a pesar de cumplir hidráulicamente el sistema, pues tendría el costo capital muy elevado al realizar un análisis de económico del VAN con respecto a la vida útil del proyecto no tendría rentabilidad. Es por ello que optimizaremos el diseño de tal manera que cumpla hidráulicamente el sistema y no sobredimensionar el sistema.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

La mecánica de fluidos tiene diversas aplicaciones tanto en la salud, la industria, la minería, etc. El conocimiento adquirido en el pregrado de la universidad es muy útil para el análisis y soluciones en diferentes problemas concernientes a la especialidad.

Se considera que la mecánica de fluidos se encuentra en 02 estados de la materia, tanto en sólido como en fluido, es en el último estado en donde a través de la ecuación de Navier Stokes derivan las diferentes ecuaciones para el análisis del comportamiento del fluido con respecto a sus diversos parámetros hidráulicos (viscosidad, temperatura, número de Reynolds, número de Froude, pérdida de energía por fricción, TDH, etc).

Existen 02 tipos de fluidos; Newtoniano y no newtoniano. La presente monografía técnica está basada en el estudio de un fluido newtoniano (agua) en donde la viscosidad se mantiene constante al aplicarle fuerza tangencial o fuerza cortante. El transporte de fluido puede ser a través de tuberías, canales, acueductos, etc.

Actualmente las industrias tienen soporte en el área de ingeniería para realizar los cálculos mediante softwares para el transporte de fluidos, tanto newtonianos y no newtonianos, los más comerciales son el AFT Fathom, Hammer, Autopipe, Ansys, pero todos los softwares tienen en común que están basados en las ecuaciones de mecánica de fluidos como la de Bernoulli, Hazen-Williams, Darcy Weisbach, Coolebrooke-White, etc.

1.6 Limitaciones del Tema

- La presente monografía técnica realiza sólo el análisis hidráulico de los tirantes de los acueductos de 10" y 8" de diámetro nominal SDR17 y material HDPE. Se considera que nos encontramos en la etapa de ingeniería de pre factibilidad. Para la tubería de impulsión se hallará el diámetro hidráulico. No se considera aspectos medioambientales y sociales. El análisis del sistema se realiza en flujo permanente, es

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

decir, la cantidad de movimiento se mantiene constante a lo largo del tiempo.

Adicional a ello el sistema se encuentra evaluado en flujo uniforme, es decir, no se consideran gradientes de presión por cierre brusco de válvulas (transientes hidráulicos). Ello es alcance de la siguiente etapa de ingeniería de factibilidad.

- Para el transporte de flujos en canal abierto (en este caso acueducto) debe ser tal que la profundidad del flujo permanezca entre el 30% y 65% del diámetro de la tubería. Bajo condiciones imprevistas y de manera temporal la profundidad del flujo podría alcanzar el 75% del diámetro de tubería.
- El sistema de flujo en canal abierto debe ser diseñado para asegurar una buena operación, lejos del flujo crítico. Esto significa que el número de Froude (Fr) debe estar fuera del rango 0.8 – 1.4.

1.7 Sistema de Unidades

Las unidades a utilizar en la monografía técnica 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 en unidades inglesas (psi).

Capítulo II-Fundamentos Teóricos

2.1. Antecedentes

Calderón Prevóst, Ángel (1983), realizó una tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería titulado “El canal de derivación del proyecto Chira – Piura”.

Identificador: ”<http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/20966>”.

En ella nos describe la primera etapa que comprende la represa Poechos con su respectivo canal de derivación de $80 \frac{m^3}{s}$ de caudal, la segunda etapa desarrollada en el Valle del bajo Piura y la tercera etapa del proyecto desarrollado en el Valle del Chira en donde desarrolla los cálculos hidráulicos de un canal de derivación revestido de concreto, sección trapezoidal y un caudal medio de $75 \frac{m^3}{s}$.

Robles Rázuri, Max Rogger (2010), realizó una monografía técnica para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos de la Universidad Nacional de Mayor de San Marcos titulado “Planteamiento de solución a la problemática de las aguas residuales de Arequipa metropolitana y diseño de emisores”.

Identificador: “<https://hdl.handle.net/20.500.12672/15429>”.

En ella nos describe en una etapa de factibilidad las consecuencias de las aguas servidas con respecto a la salud en la localidad de Arequipa y propone como solución un sistema de conducción de aguas servidas a través del diseño de un colector de material Glass Reinforced Plastic-ASTM D3262 utilizando ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Espinoza Andrade, Yandri Jesús (2016), realizó una tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil de la Unidad Académica de Ingeniería Civil, Machala, Ecuador titulado “Diseño de línea de conducción de agua potable para una combinación de diámetros de tubería con un costo total mínimo”.

Identificador: “<http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/8033>”.

En ella nos describe el diseño de una tubería troncal para agua potable en material PVC considerando el diámetro económico como parámetro principal para su diseño. Utiliza un perfil de terreno para realizar el trazo de la línea de agua potable, y a través de ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos va estimando el diámetro utilizando la ecuación de Hazen Williams. Considera las pérdidas de energías por fricción de tuberías utilizando la ecuación de Darcy y a su vez considera las pérdidas secundarias ocasionadas por accesorios.

2.2. 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.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

- 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.
- ISO 2533 / 1975: Standard Atmosphere.
- ISO 12241 / 2008: Thermal for building equipment and industrial installations – Calculation rules.

2.3. 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.

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).

EB Estación de Bombas

HDPE High Density Polyethylene (Polietileno de alta densidad).

hp Horse power (Caballos de fuerza).

NPS Nominal Pipe Size (Diámetro nominal de tubería).

NPSHa Net positive suction head available (Carga Neta de Succión Positiva Disponible).

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

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.

psi Pounds per square inch (Libras por pulgada cuadrada).

Pv Presión de vapor.

SI Sistema Internacional de Unidades.

wt Wall thickness (Espesor de tubería).

2.4. Mecánica de Fluidos

La mecánica de fluidos es el estudio que analiza parámetros hidráulicos de un fluido tanto en líquido como en gaseoso. Tiene la ecuación de Navier Stokes como la ecuación general de los fluidos y está compuesta por ecuaciones en derivadas parciales no lineales. La mecánica de fluidos tiene 02 tipos de fluidos; fluido newtoniano en donde la viscosidad se mantiene constante al aplicarle una fuerza cortante o tangencial, por ejemplo, el agua. El fluido no newtoniano, la viscosidad varía inversamente proporcional a la fuerza tangencial o cortante que se aplica, es decir al aplicarle mayor fuerza cortante al fluido su viscosidad disminuye y por el contrario al aplicarle menor fuerza cortante la viscosidad aumenta, por ejemplo, los relaves.

Los fluidos podemos encontrarlos en diversos regímenes. Pueden ser en régimen permanente o no permanente, aquí el volumen de control del fluido se mantiene constante

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

a través del tiempo, es decir no hay aumento de cantidad de masa. También encontramos fluido en estado estable o estado transitorio, en el estado estable las gradientes de presión se mantienen constantes en un volumen de control, por el contrario, en el transitorio existen gradientes de presión oscilando debido al cierre brusco de una válvula por ejemplo en un sistema de tuberías. El fluido puede estar en régimen turbulento debido a la interacción de sus partículas debido a la energía cinemática del sistema del volumen de control o por el contrario puede estar en régimen laminar en donde las partículas no presentan variaciones cinemáticas de las partículas. Por ejemplo para el agua tenemos el número de Reynolds que es un número adimensional que nos indica si el flujo está en régimen turbulento ($Re > 4000$) o en régimen laminar ($Re < 2000$) en un sistema de tuberías. Para un canal o acueducto se utiliza el número de Froude para establecer si el flujo se encuentra en régimen crítico o no crítico.

2.5. Sistema de Unidades

La principal magnitud del sistema internacional de unidades se muestra a continuación en la tabla 1, tabla 2 y tabla 3:

Tabla 1: *Tabla del Sistema internacional de Unidades. Magnitudes fundamentales.*

Magnitudes fundamentales	Símbolo	En función de M,L y T	Unidad en el SI
Masa	M	$[M]$	kg
Longitud	L	$[L]$	m
Tiempo	T	$[T]$	s

Nota: Adaptado de Claudio Mataix (1986). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, segunda edición.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 2: *Tabla del Sistema internacional de Unidades. Magnitudes cinemáticas.*

Magnitudes cinemáticas	Símbolo	En función de M,L y T	Unidad en el SI
Aceleración angular	α	$[T]^{-2}$	rad/s^2
Aceleración lineal	a	$[L][T]^{-2}$	m/s^2
Caudal volumétrico	Q	$[L]^3[T]^{-1}$	m^3/s
Caudal másico	G	$[M][T]^{-1}$	kg/s
Velocidad angular	ω	$[T]^{-1}$	rad/s
Velocidad lineal	v	$[L][T]^{-1}$	m/s
Viscosidad cinemática	ν	$[L]^2[T]^{-1}$	m^2/s

Nota: Adaptado de Claudio Mataix (1986). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, segunda edición.

Tabla 3: *Tabla del Sistema internacional de Unidades. Magnitudes dinámicas.*

Magnitudes dinámicas	Símbolo	En función de M,L y T	Unidad en el SI
Densidad	ρ	$[M][L]^{-3}$	kg/m^3
Esfuerzo cortante	τ	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$\frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2}$
Fuerza	F	$[M][L][T]^{-2}$	$N = \frac{m \cdot kg}{s^2}$
Impulso	I	$[M][L][T]^{-1}$	$N \cdot s = \frac{kg \cdot m}{s}$
Módulo de elasticidad	E	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$\frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2}$
Momento de inercia	I_x, I_y, I_o	$[M][L]^2$	$kg \cdot m^2$
Peso específico	γ	$[M][L]^{-2}[T]^{-2}$	$\frac{kg}{m^2 \cdot s^2} = \frac{N}{m^3}$

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Potencia	P	$[M][L]^2[T]^{-3}$	$W = \frac{J}{s} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$
Presión	p	$[M][L]^{-1}[T]^{-2}$	$\frac{N}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2}$
Trabajo, energía	W, E	$[M][L]^2[T]^{-2}$	$N \cdot m = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$
Tensión superficial	σ	$[M][T]^{-2}$	$\frac{N}{m} = \frac{kg}{s^2}$
Viscosidad dinámica	μ	$[M][L]^{-1}[T]^{-1}$	$Pa \cdot s = \frac{kg}{m \cdot s}$

Nota: Adaptado de Claudio Mataix (1986). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, segunda edición.

2.6. 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). También tenemos las propiedades termodinámicas. De las características principales utilizada para el desarrollo de la presente monografía técnica tenemos las siguientes:

2.6.1. Temperatura (T)

Es la sensación de calor o frío que existe en una sustancia. Esto es debido a la interacción de las moléculas causando fricción entre sí (elevación de temperatura) o tienden a un estado estático (disminución de temperatura). Las unidades son Celcius [$^{\circ}C$] para el sistema internacional, Fahrenheit [$^{\circ}F$], Kelvin [$^{\circ}K$] y Rankine [$^{\circ}R$]. A continuación, mostramos las equivalencias en las unidades de medida para la temperatura.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

$$T_{(^{\circ}R)} = T_{(^{\circ}F)} + 459.67 \quad (2.1)$$

$$T_{(^{\circ}R)} = 1.8 T_{(^{\circ}K)} \quad (2.2)$$

$$T_{(^{\circ}K)} = 1.8 T_{(^{\circ}C)} + 273.15 \quad (2.3)$$

$$T_{(^{\circ}F)} = 1.8 T_{(^{\circ}C)} + 32 \quad (2.4)$$

2.6.2. Densidad (ρ)

La densidad es una propiedad del fluido dada por la masa por unidad de volumen $\rho = \frac{m}{V}$. Para un flujo incompresible la densidad se mantiene constante en un volumen de control. La densidad puede depender tanto de la presión como la temperatura en la que se encuentra, ello podemos verificar en la siguiente ecuación de gases ideales.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (2.5)$$

Donde:

ρ : Densidad $[\frac{kg}{m^3}]$.

P : Presión.

R : Constante de los gases.

Para el fluido agua la densidad puede depender sólo de la temperatura en el sistema internacional de unidades. Ver la ecuación 2.6:

$$\rho = 1000 \times ((2 \times 10^{-8} \times T) - (6 \times 10^{-6} \times T^2) + (3 \times 10^{-8} \times T) + 1) \quad (2.6)$$

Donde:

ρ : Densidad del agua $[\frac{kg}{m^3}]$.

T : Temperatura del agua $[^{\circ}C]$.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

2.6.3. El peso específico (γ)

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

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.7)$$

$$\gamma = \rho \times g \quad (2.8)$$

Donde:

W : Peso del fluido [N].

V : Volumen [m^3].

g : Aceleración gravitatoria [$\frac{m}{s^2}$].

γ : Puede estar dado en [$\frac{N}{m^3}$].

A continuación, veremos algunos pesos específicos en la tabla 4 para algunos fluidos a 20 °C y 1 atm de presión:

Tabla 4: Pesos específicos de líquidos comunes a 1 atm y 20°C.

Líquido	Peso específico
Amoniaco	5964.48
Benceno	8642.61
Etanol	7740.09
Gasolina	6670.8
Glicerina	12360.6
Querosene	7887.24
Mercurio	132925.5
Metanol	7759.71
Aceite SAE 10W	8534.7

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Agua	9790.38
------	---------

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

2.6.4. Presión atmosférica (P_{atm})

Es la fuerza por unidad de superficie que ejerce la atmósfera hacia un cuerpo. La relación de elevación es inversamente proporcional a la presión atmosférica ejercida en un cuerpo. Por ejemplo, la presión atmosférica en Lima es de 101.32 kPa o 10.34 metros de columna de agua (mca) y en Chalcobamba es de 59.7 kPa.

La presión atmosférica se puede expresar en la ecuación 2.9 con respecto a la elevación (m):

$$P_{atm} = (3.73 - 0.841 \times 0.0001 \times z)^{5.255} \quad (2.9)$$

Donde:

P_{atm} : Presión atmosférica [kPa].

z : Elevación [m].

Para convertir la presión atmosférica de kPa a metros de columna de agua se realiza la siguiente conversión:

$$P_{atm}[mca] = \frac{P_{atm}[kPa] \times 1000}{\rho[\frac{kg}{m^3}] \times 9.81} \quad (2.10)$$

2.6.5. Presión de vapor (P_v)

La presión de vapor es la presión límite del fluido para pasar de un estado líquido a un estado gaseoso. Es un parámetro utilizado de fluidos en tuberías para evaluar si el fluido empieza a cavitarse a cierta presión y es muy útil para la selección de una bomba ya que el valor de la presión de vapor está contenido para el cálculo del NPSHa el cual veremos en la sección 2.11.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

El valor de la presión de vapor depende de la temperatura en la que se encuentre el fluido. Por ejemplo, para el agua tenemos la ecuación 2.11.

$$P_v = 0.06231 \times e^{\frac{17.23T}{273.3+T}} \quad (2.11)$$

Donde:

P_v : Presión de vapor [mca].

T : Temperatura [C°].

2.6.6. Viscosidad dinámica o absoluta (μ)

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

$$\mu = \tau \left(\frac{\Delta y}{\Delta v} \right) \quad (2.12)$$

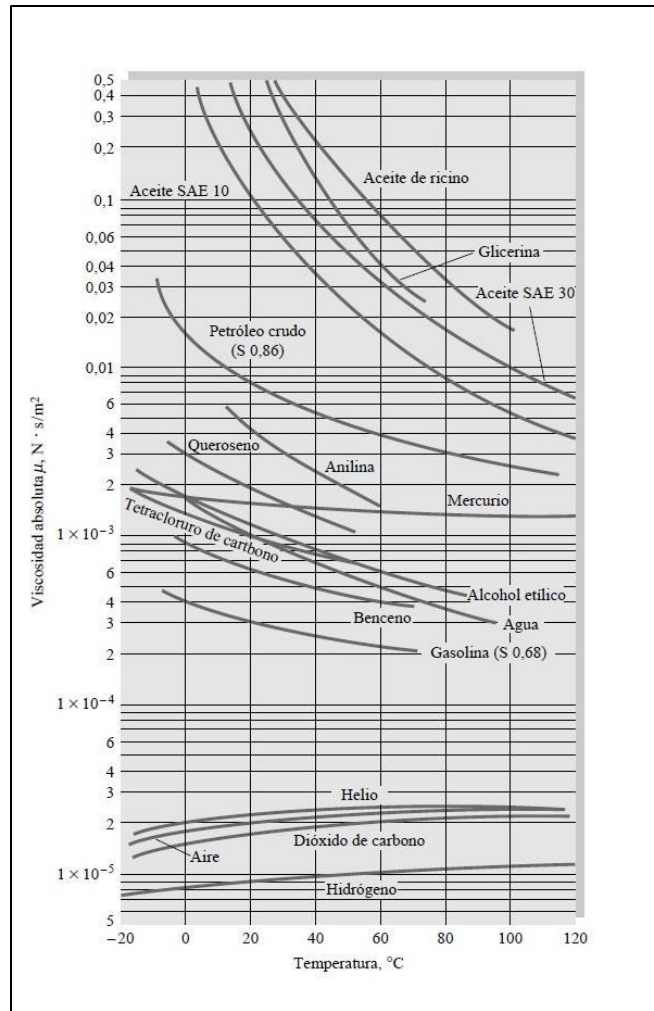
En el sistema internacional de las unidades que se utilizan son $N \cdot \frac{s}{m^2}$, $Pa \cdot s$ o $\frac{kg}{m \cdot s}$.

Para la viscosidad del agua con respecto a la temperatura tenemos la ecuación de Bingham y Jacson. Ver ecuación 2.13.

$$\mu = \frac{1}{10} \times \frac{1}{(2.14 \times (T - 8.435) + \sqrt{(T - 8.435)^2 + 8078.4}) - 120} \quad (2.13)$$

A continuación, en la figura 4 mostraremos valores de viscosidad absoluta o dinámica para algunos fluidos comunes a 1 atmósfera de presión.

Figura 4: Viscosidad absoluta o dinámica de fluidos comunes a 1 atm.



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

2.6.7. Viscosidad cinemática (ν)

Es la difusividad del fluido, es decir que tan rápido se distribuye en una superficie contenida. La viscosidad cinemática es la división de la viscosidad dinámica entre la densidad del fluido. Ver ecuación En algunos cálculos se utiliza la viscosidad cinemática que es simplemente dividir la viscosidad dinámica entre la densidad:

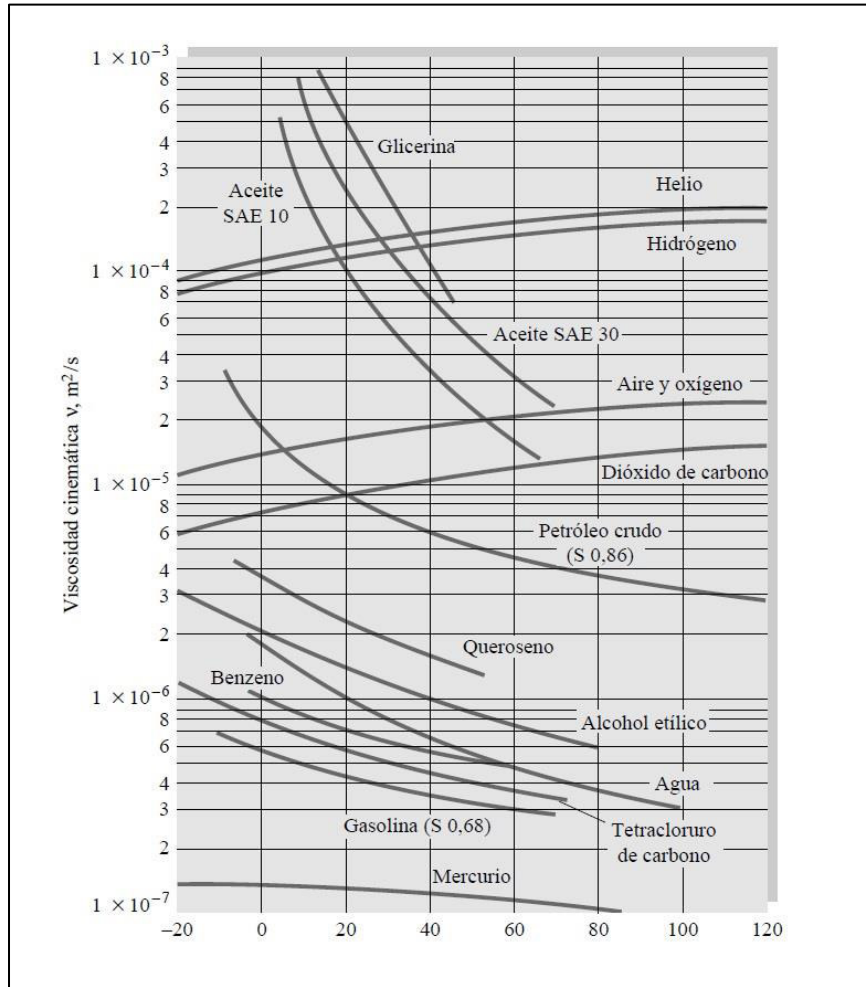
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.14)$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

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

continuación, en la figura 5 mostraremos valores de viscosidad cinemática para algunos fluidos comunes a 1 atmósfera de presión.

Figura 5: Viscosidad cinemática de fluidos comunes a 1 atm.



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

2.7. Conservación de la energía-ecuación de Bernoulli.

Como sabemos del primer principio de la termodinámica la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma, también se le conoce como ley de la conservación de la energía. Por ejemplo, un flujo en tuberías tenemos las siguientes energías en metros de columnas de agua.

- Energía potencial: Es la energía del elemento con respecto a su elevación tomando un eje referencial para el sistema.

$$E_P = z [m] \quad (2.15)$$

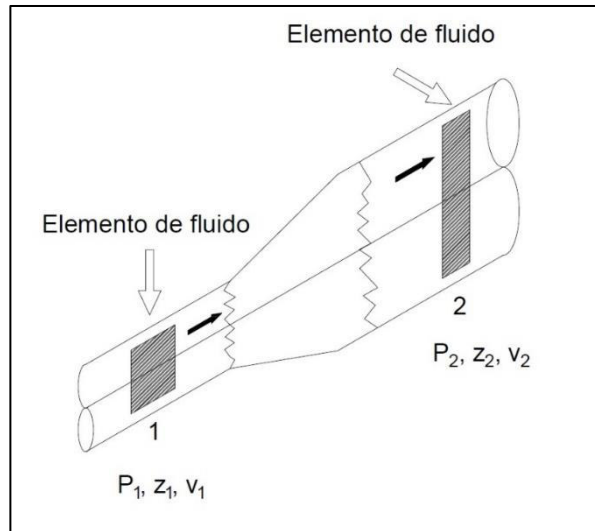
- Energía cinética: Es la energía del elemento a causa de su velocidad en cierto punto de la trayectoria de la línea de flujo.

$$E_c = \frac{v^2}{2g} [m] \quad (2.16)$$

- Energía de flujo: Es la energía que necesita el elemento para trasladarse de un punto hacia otro en la línea del flujo.

$$E_F = \frac{P}{\gamma} [m] \quad (2.17)$$

Figura 6: Elementos de un fluido para la ecuación de Bernoulli.



Nota: Elaboración propia.

Donde la ecuación 2.17 es la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.18)$$

Donde:

P : Presión [Pa]

z_1 : Elevación [m]

v : Velocidad [$\frac{m}{s}$]

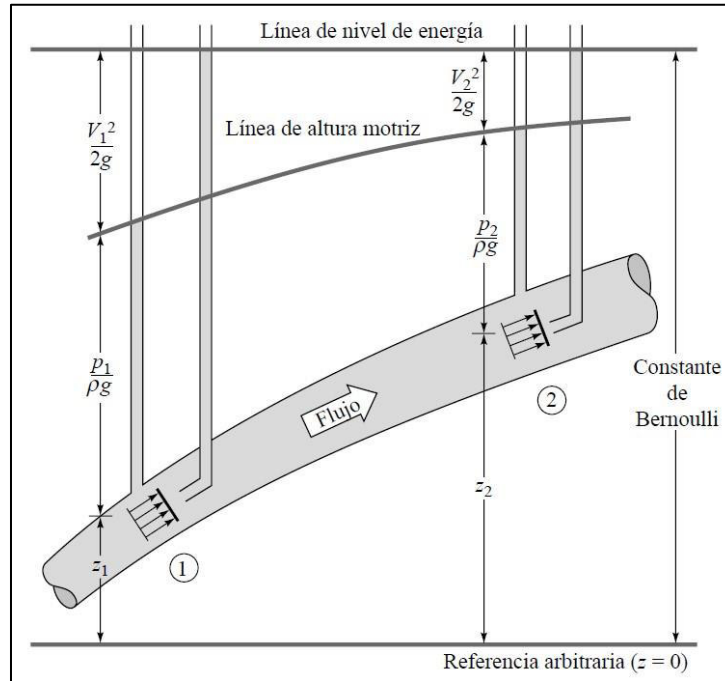
El comportamiento de una partícula dentro de la ecuación de Bernoulli está limitado bajo las siguientes condiciones para el sistema:

- Flujo permanente (el caudal se mantiene a lo largo del tiempo).
- Flujo incompresible (la densidad se mantiene constante).
- Sin transferencia de calor.
- Sin pérdida de energía por fricción.
- Sin trabajo de motor o bomba (sin añadir energía).

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

En la figura 7 se observa la línea del nivel de energía dado por las componentes de la ecuación de Bernoulli.

Figura 7: 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*.

2.8. 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 .

$$E'_1 + h_A - h_R - h_L = E'_2 \quad (2.19)$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

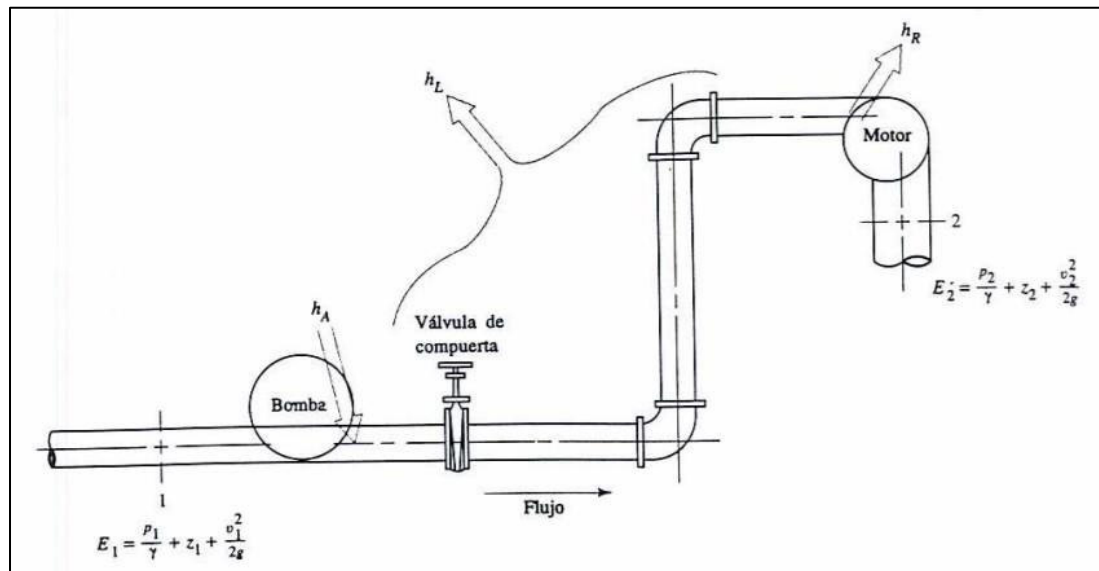
En donde h_A es la energía añadida al sistema puede ser una bomba, h_R es la energía removida del sistema que puede ser una turbina y h_L es la pérdida de energía a causa de la fricción del fluido con el volumen de control. Ver figura 8.

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

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.20)$$

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.

Figura 8: Sistema de flujo para la ecuación general de la energía.



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

2.9. Caudal volumétrico y caudal másico

El caudal es la cantidad de fluido que pasa a través un ducto de sección circular para las tuberías, sección trapezoidal para los canales o rectangular en algunos casos. El caudal puede ser volumétrico que es la cantidad de volumen por unidad de tiempo o la velocidad del fluido por área transversal del ducto:

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{V[m^3]}{t[s]} = v \left[\frac{m}{s} \right] \times A[m^2] \quad (2.21)$$

El caudal másico, es la cantidad de masa que pasa un fluido por unidad de tiempo a través de una sección transversal:

$$Q \left[\frac{kg}{s} \right] = v \left[\frac{m}{s} \right] \times A[m^2] \times \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (2.22)$$

2.10. Número de Reynolds y número de Froude

El número de Reynolds es un parámetro utilizado para el análisis del flujo en una tubería, $Re < 2000$ el flujo es laminar, $2000 < Re < 4000$ el flujo se encuentra en transitorio y para Reynolds $Re > 4000$ el flujo es turbulento.

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (2.23)$$

Donde:

V : Velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s} \right]$.

D : Diámetro de la tubería $[m]$.

ν : Viscosidad cinemática $\left[\frac{m^2}{s} \right]$.

El número de Froude es un número adimensional empleado en el análisis hidráulico en un canal, para $Fr < 1$ el flujo es subcrítico, para $Fr = 1$ se considera flujo crítico y para $Fr > 1$ se considera flujo supercrítico.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \times \frac{A}{L}}} \quad (2.24)$$

Donde:

V : Velocidad del fluido [$\frac{m}{s}$].

g : Aceleración gravitatoria [$\frac{m}{s^2}$].

A : Área transversal del canal [m^2].

L : Longitud de la superficie libre de flujo [m].

2.11. Ecuación de Darcy- Weisbach y Colebrook- White

La ecuación de Darcy-Weisbach indica las pérdidas primarias ocasionadas en un sistema de tuberías, es decir, las pérdidas ocasionadas por la fricción del fluido con la pared de la tubería. Mientras más largo es el recorrido del fluido la pérdida de energía aumenta y las unidades utilizadas en el sistema internacional son metros de columnas de agua [mca].

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.25)$$

Donde:

h_f : Pérdidas primarias de energía [mca].

L : Longitud de la tubería [m].

D : Diámetro de la tubería [m].

V : Velocidad del fluido [$\frac{m}{s}$].

g : Aceleración de la gravedad [$\frac{m}{s^2}$].

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

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.26)$$

La ecuación de Colebrook-White es utilizada para hallar el factor de fricción en un sistema de tuberías para flujo turbulento. El factor de fricción f es una variable implícita en la ecuación de Colebrook-White por lo que para su solución se tiene que recurrir a métodos numéricos mediante iteraciones.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (2.27)$$

Donde:

- f : Factor de fricción.
- ϵ : Rugosidad del material [m].
- D : Diámetro de la tubería [m].
- Re : Número de Reynolds.

El factor de fricción f también se puede obtener mediante el nomograma de Moody (ver figura 9) requiriendo el valor de la rugosidad relativa y número de Reynolds para el hallar el valor.

El valor de ϵ es el coeficiente de rugosidad, depende del material del conducto del sistema. A continuación, mostraremos algunos coeficientes de rugosidad en la tabla 5 para conductos nuevos y limpios.

Tabla 5: Valores de coeficiente de rugosidad para conductos nuevos y limpios.

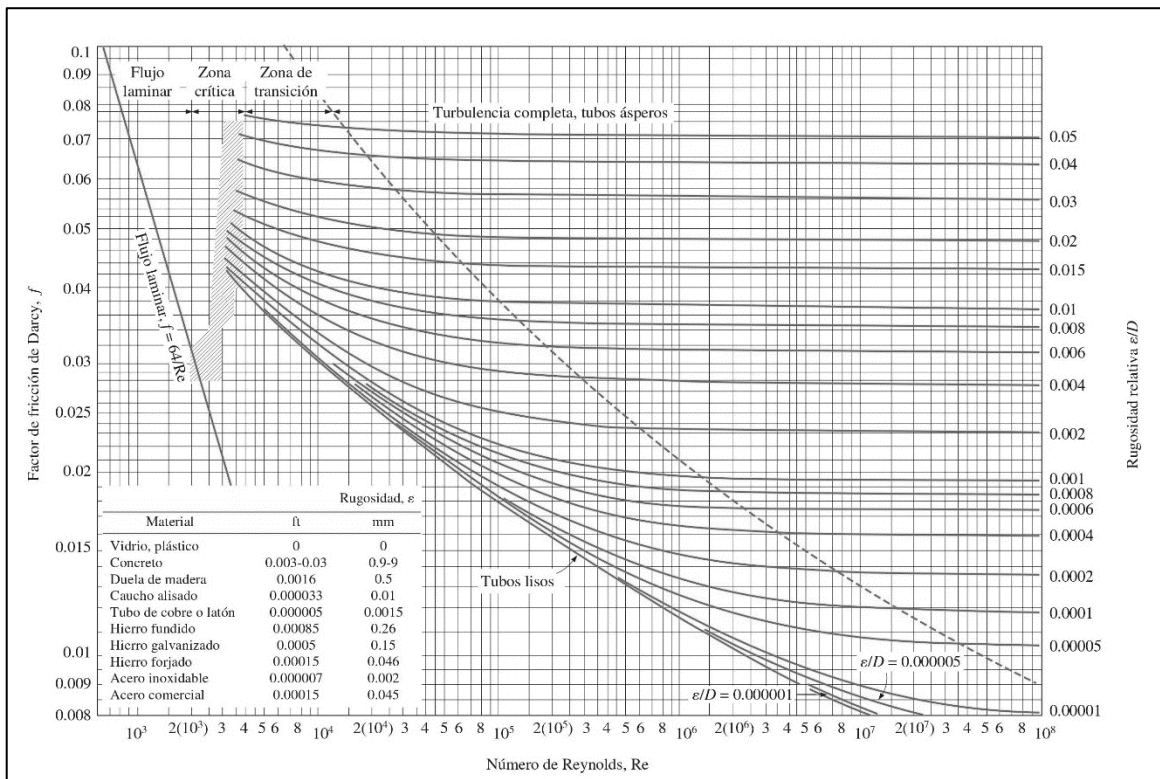
Material	Rugosidad ϵ	Rugosidad ϵ
	(m)	(pie)
Plástico	3×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Acero comercial o soldado	4.6×10^{-5}	5.0×10^{-6}

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Hierro dúctil recubierto	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Acero desnudo	1.9×10^{-3}	6×10^{-3}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	3.2×10^{-3}

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

Figura 9: Diagrama de Moody para flujos en sección circular.



Nota: Adaptado de Pao, R. H. F. (1961). *Fluid Mechanics, New York: Jhon Wiley p.284*.

2.12. Pérdidas primarias y secundarias de energía

Las pérdidas de energía h_{1-2} a lo largo de la línea de flujo en un sistema de tuberías están dadas por las pérdidas primarias ($h_{f_{1-2}}$) y menores ($h_{m_{1-2}}$). Es causada por el contacto del fluido hacia las paredes de la tubería y el cambio de dirección del flujo

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

respectivamente. En las pérdidas menores son ocasionados por accesorios y válvulas, tienen una constante K para cada caso

$$h_{1-2} = h_{f_{1-2}} + h_{m_{1-2}} \quad (2.28)$$

Donde:

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

$$h_m = K \frac{V^2}{2g} \quad (2.29)$$

Tabla 6: *Coficiente K para diferentes accesorios y válvulas.*

Accesorio	Coficiente K
Gate Valve	8
Knife Valve	8
Globe Valve	340
Angle Valve	55
Ball Valve	3
Butterfly Valve (2" to 8")	45
Butterfly Valve (10" to 14")	35
Butterfly Valve (16" to 24")	25
Plug Valve	18
Plug Valve 3-way (Through)	30
Plug Valve 3-way (Branch)	90
Swing Check Valve (Threaded)	100
Swing Check Valve (Flanged)	50

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Lift Check Valve	600
Foot Valve (Poppet Disc)	420
Foot Valve (Hinged Disc)	75
Tech Taylor Valve	3
Diaphragm Valve	66
Elbow 90°	30
Elbow 45°	16
Tee (Through)	20
Tee (Branch)	60

Nota: Adaptado de Crane, (1992). *Flujo de fluidos*.

2.13. Altura dinámica total

La altura dinámica total o en inglés total dynamic head (TDH). Es la carga de energía total del sistema en metros de columna de agua. Teniendo el punto 1 como inicio del sistema y el punto 2 de descarga se muestra la ecuación 2.29 y figura 10.

$$TDH = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) + h_f \quad (2.30)$$

Donde:

P : Presión estática del sistema.

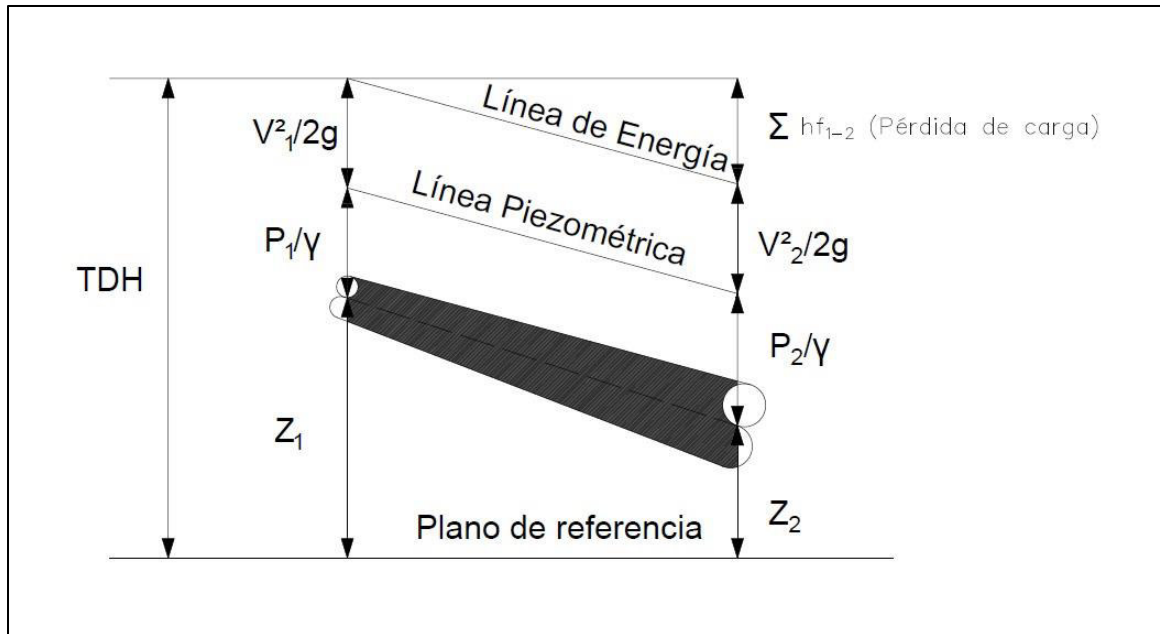
ρ : Densidad del fluido.

g : Aceleración de la gravedad.

Z : Altura

h_f : Perdidas por fricción del sistema.

Figura 10: TDH para un sistema de tuberías.



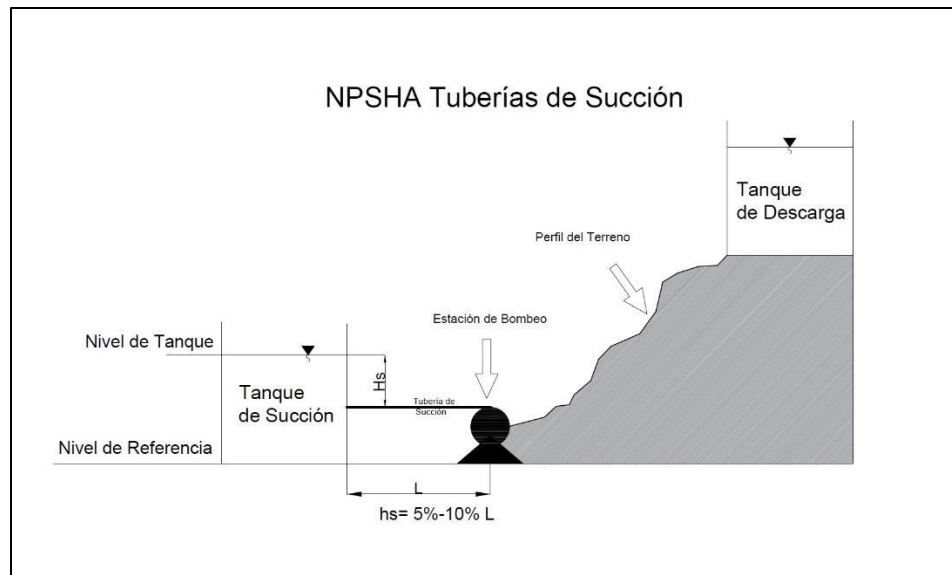
Nota: Elaboración propia

2.14. 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 11.

Figura 11: Esquema para el cálculo del NPSHa.



Nota: Elaboración propia.

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

$$NPSH_A = P_{Atm} + P_v + H_s - h_s \quad (2.31)$$

Donde:

P_{Atm} : Presión atmosférica del líquida a una altura Z [mca] .

P_v : Presión de vapor del líquido [mca].

H_s : Altura estática de succión [mca].

h_s : Pérdidas en la tubería de succión L [mca].

2.15. Potencia hidráulica (BHP)

La potencia consumida de los equipos de bombeo de agua en un sistema de tuberías se resume en la ecuación 2.31

$$BHP = \frac{\rho \times g \times Q \times ADT}{745 \times \eta_B} \quad (2.32)$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

ρ : Densidad $[\frac{kg}{m^3}]$.

g : Aceleración gravitatoria $[\frac{m}{s^2}]$.

Q : Caudal $[\frac{m^3}{s}]$.

ADT : Altura dinámica total $[mca]$.

η_B : Eficiencia de la bomba.

2.16. Profundidad de flujo normal-Ecuación de Manning

Se utilizará la ecuación de Manning para calcular la profundidad de flujo normal en el régimen de flujo en superficie libre el cual se considerará en la línea de flujo de las pozas mencionadas en la figura 2.

$$Q = \frac{J^{0.5} \times A \times R_h^{\frac{2}{3}}}{n} \quad (2.33)$$

Donde:

Q : Flujo volumétrico $[\frac{m^3}{s}]$.

A : Área de la sección transversal $[m^2]$.

J : Pendiente.

n : Coeficiente de rugosidad de Manning. Para HDPE es 0.012.

R_H : Radio hidráulico = $\frac{A}{P_m} [m]$.

P_m : Perímetro mojado $[m]$.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 7: *Coeficiente de rugosidad de Manning*

Material de tubería	Promedio
HDPE	0.012

Nota: De acuerdo al criterio "Design Criteria Civil". Las Bambas Project (junio 2020).

Capítulo III-Descripción del Problema

3.1. Descripción del problema

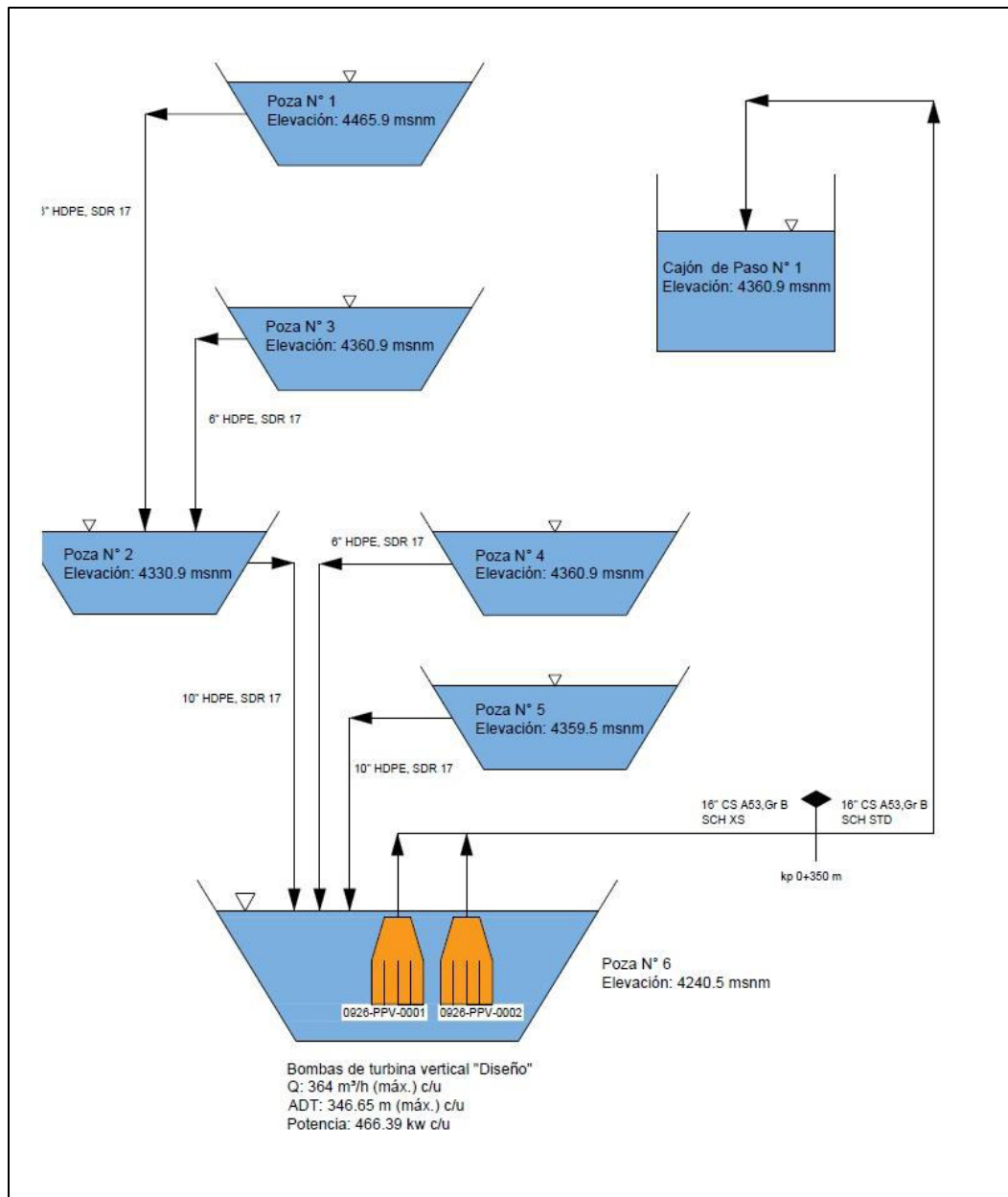
En todo proyecto minero se utilizan pozas para almacenamiento de agua para utilizarlo en diferentes procesos en la minería o para servicios como el sistema contra incendios. Las pozas se encuentran en diferentes elevaciones debido al perfil del terreno en el que se encuentra el proyecto.

Para el transporte del agua contenida en las pozas se puede utilizar un sistema de impulsión del agua mediante una bomba o varias bombas (dependiendo de los requerimientos hidráulicos del sistema) o también puede ser por gravedad. En la presente monografía técnica las pozas N°1, N°2, N°3, N°4, N°5 desembocan en la poza N°6 mediante un sistema de tuberías de HDPE que actúan como acueductos ya que el fluido agua se encuentra a superficie libre, es decir no se encuentran totalmente llenas y considerando que nos encontramos en la etapa de factibilidad de ingeniería ya se tienen seleccionados los diámetros de las tuberías que conectan las pozas, los diámetros son de 6" SDR17 y de 10" SDR de material HDPE pero analizaremos el tirante hidráulico si los diámetros están correctamente seleccionados.

Posterior a ello, el fluido agua una vez que se encuentre en la poza N°6 es impulsada mediante un sistema de tuberías hacia el cajón de N°1, ya que se encuentra a mayor elevación, se calcularán los parámetros hidráulicos requeridos para la selección de la bomba y el diámetro de la tubería. Ver figura 12 en donde se tiene el esquema de la descripción del sistema.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Figura 12: Esquema de operación del desaguado del tajo Chalcobamba.



Nota: Elaboración propia.

Capítulo IV-Bases y Criterio de Diseño

4.1. Datos de entrada

- Condiciones del sitio:

Tabla 8: *Condiciones del sitio para el sistema.*

Propiedad	Valor
Temperatura ambiente promedio ¹	16.1 [°C]
Presión atmosférica ²	59.7 [kPa]

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

- Consideraciones hidráulicas:

Tabla 9: *Consideraciones hidráulicas para el sistema.*

Propiedad	CS	HDPE
Tasa de corrosión ¹ [$\frac{mm}{año}$]	0.2	-
Rugosidad ² [mm]	0.5 (nuevo)	0.05 (nuevo)

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.*

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

- Propiedades del fluido:

Tabla 10: *Propiedades de transporte de agua fresca para el sistema.*

Propiedad	Valor
Temperatura de operación ¹	15 [°C]
Densidad del fluido	999,2 [$\frac{kg}{m^3}$]
Viscosidad dinámica	1.1 [cP]
Gravedad específica	1.05
Presión de vapor	1.71 [kPa]
Cantidad de sólidos	< 1000 [ppm]
Módulo de Bulk	3.19×10^5 [psi]

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

- Vida útil: El diseño contempla una vida útil del proyecto de 20 años.

4.2. Escenarios de operación

En la figura 12 se muestra el esquema de operación del sistema de la presente monografía técnica. En la tabla 11 se muestra el resumen de los caudales de acuerdo al balance hidrológico y muestra el resumen de los caudales bombeados de las pozas N°1, N°2, N°3, N°4, N°5 y N°6 de acuerdo al siguiente orden:

- El caudal de la Poza N°2 (Ver figura 12) recoge los caudales de la Poza N°1 y Poza N°3.
- El caudal de la Poza N°6, recoge los caudales de la Poza N°2, la Poza N°4 y la Poza N°5.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

- Finalmente, el caudal de la Poza N°6 recogerá los caudales de la Poza N°1, Poza N°2, Poza N°3, Poza N°4 y Poza N°5.

El caudal de diseño de bombeo de la Poza N°6, corresponde al caudal considerando 02 bombas en operación en paralelo y el valor del caudal nominal depende de la curva de la bomba con 01 bomba en operación.

Existen 02 escenarios:

- Escenario 01: Época húmeda + transición (enero-abril y octubre).
- Escenario 02: Época seca (mayo-setiembre).

Tabla 11: Caudales de acuerdo a estudio hidrológico (caudales con trasvase entre Pozas).

Poza de Colección	Condiciones Operacionales Promedio (m ³ /h)					
	Escenario 01 ¹			Escenario 02 ²		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
Poza 01	3.6	12.6	32.4	0	0.36	1.08
Poza 02	23.4	79.92	204.12	0	1.8	9.72
Poza 03	6.84	23.4	59.4	0	0.72	3.24
Poza 04	6.84	22.68	57.24	0	0.72	3.24
Poza 05	24.48	79.2	198.72	0.36	3.96	12.96
Poza 06	138.24	323.28	728.64	58.68	68.76	97.2

Nota: Caudales de acuerdo a la memoria de cálculo civil e hidráulico. Las bambas, junio 2018.

1. Escenario 01: Época húmeda + transición (enero-abril y octubre). Stantec 2021.

2. Escenario 02: Época seca (mayo-setiembre). Stantec 2021.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

4.3. Condiciones de instalación de las estaciones de bombas

La tabla 12 muestran las condiciones de instalación de los niveles de inicio y descarga para el análisis del estado estable del sistema

Tabla 12: *Condiciones de instalación de los sistemas de impulsión y descarga de agua de desaguado del tajo.*

Parámetro	Elevación
Elevación del nivel de la Poza N°1	4465.9 msnm
Elevación del nivel de la Poza N°2	4330.9 msnm
Elevación del nivel de la Poza N°3	4360.9 msnm
Elevación del nivel de la Poza N°4	4360.9 msnm
Elevación del nivel de la Poza N°5	4359.5 msnm
Elevación del nivel de la Poza N°6	4240.5 msnm
Elevación de las Bombas	
-0926-PPV-0001	4240.5 msnm
-0926-PPV-0002	

Nota: Datos topográficos. Las Bambas octubre 2018.

4.4. Escenarios para el desaguado del tajo Chalcobamba

En la figura 12 y los caudales presentados en la tabla 11 muestran los esquemas de operación y flujos de desaguado del tajo Chalcobamba. A continuación, se presentan los escenarios para el desaguado del tajo en mención:

- De Poza N°1 a Poza N°2. Evaluación hidráulica de sistema a superficie libre, acueducto.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

- De Poza N°2 a Poza N°6. Evaluación hidráulica de sistema a superficie libre, acueducto.
- De Poza N°3 a Poza N°2. Evaluación hidráulica de sistema a superficie libre, acueducto.
- De Poza N°4 a Poza N°6. Evaluación hidráulica de sistema a superficie libre, acueducto.
- De Poza N°5 a Poza N°6. Evaluación hidráulica de sistema a superficie libre, acueducto.
- De Poza N°6 a cajón de paso N°1. Evaluación hidráulica de sistema de impulsión en estado estable.

Capítulo V-Diseño hidráulico

5.1. Estación de inicio Poza N°1

De acuerdo con el esquema presentado en la figura 12 y los caudales mostrados en la tabla 11, se presenta la evaluación hidráulica de acueducto (tubería a superficie libre) para el desaguado de la Poza N°1 en dirección a la Poza N°2.

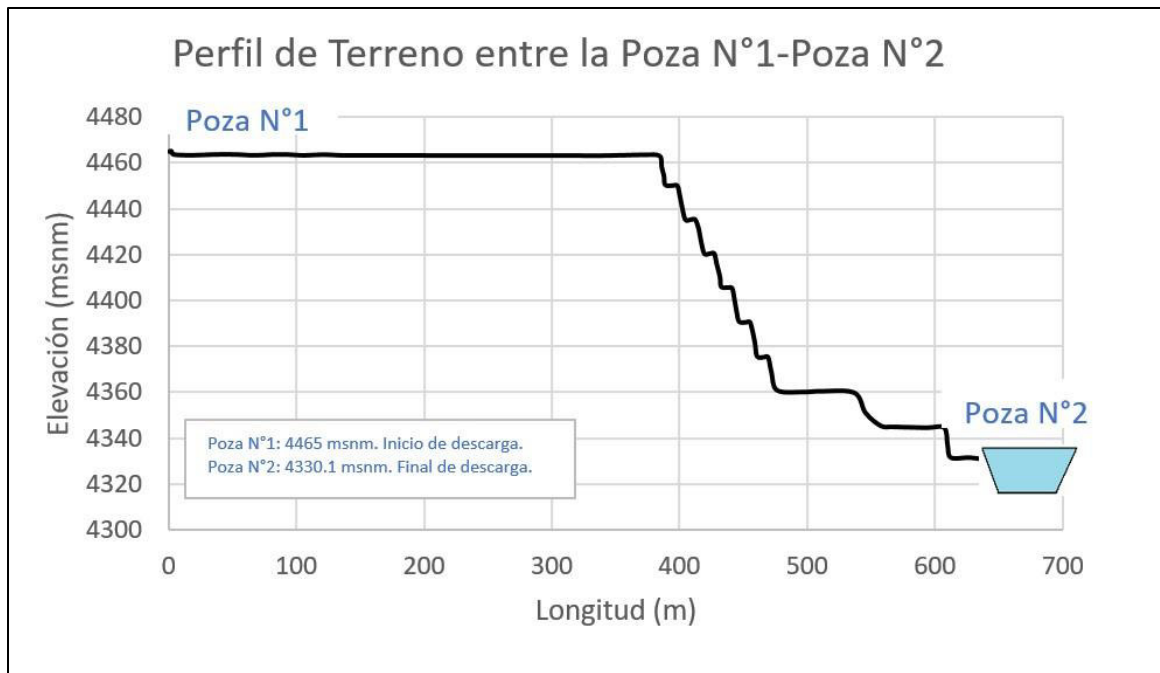
Tabla 13: *Parámetros hidráulico del acueducto Poza N°1 hacia Poza N°2.*

Parámetros	Valor
Progresiva [m]	0-650
Longitud [m]	749
Material	HDPE-SDR17
OD	6"
wt	0.39
Caudal escenario 01	3.6 _{Min.} - 12.6 _{Prom.} - 32.4 _{Nom.}
Caudal escenario 02	0.0 _{Min.} - 0.36 _{Prom.} - 1.08 _{Nom.}
Elevación del nivel de la Poza N°1	4465.9 msnm
Elevación del nivel de la Poza N°2	4330.9 msnm

Nota: Caudales de acuerdo a la memoria de cálculo civil e hidráulico. Las bombas, junio 2018.

En la figura 13 se muestra el perfil del terreno ubicado entre la Poza N°1 y la Poza N°2:

Figura 13: Perfil del terreno comprendidas entre Poza N°1 y Poza N°2.



Nota: Elaboración propia.

5.1.1. Resultados hidráulicos, tubería a superficie libre entre la Poza N°1 y N°2

De acuerdo a los parámetros de caudales indicados en la tabla 13 y los criterios de diseño mostrados en la sección 2.16, se muestran las verificaciones hidráulicas de las tuberías como acueducto (tubería a superficie libre).

La tabla 14 se muestran los resultados hidráulicos del acueducto considerando los caudales mínimos, nominales y máximos para el escenario 01 y escenario 02 indicados en la tabla 13 y considerando pendiente de 1.9% que representa la pendiente mínima del trayecto, ver figura 13.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 14: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 1.9%.

Característica	Símbolo	Unidad	Escenario 01			Escenario 02	
			Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Caudal de agua	Q	m ³ /h	3.6	12.6	32.4	0.4	1.1
Diámetro externo	D_e	mm	168	168	168	168	168
HDPE SDR	SDR		17	17	17	17	17
Espesor de paredes	e	mm	10	10	10	10	10
Diámetro interno	D_i	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pendiente de fondo	J	%	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Rugosidad de Manning	n		0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Tirante normal ²	Y_n	m	0.021	0.021	0.021	0.007	0.012
Área normal	A_n	m ²	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000
Velocidad normal	V_n	m/s	0.650	0.930	1.210	0.320	0.450
Superficie libre normal	T_n	m	0.100	0.130	0.150	0.060	0.080
Perímetro húmedo	p_n	m	0.120	0.160	0.220	0.070	0.090
Radio hidráulico	R_h	m	0.010	0.020	0.030	0.000	0.010
Profundidad relativa	Y_n/D_i	%	14%	27%	44%	5%	8%
Número de Froude ¹	Fr		1.7	1.8	1.7	1.5	1.6

Nota 1: Caudal para un evento extremo eventual en época húmeda.

Nota 2: Se evaluó el tirante de la tubería, considerando las velocidades y número de Froude (Min.

1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Se verifica que las pendientes menores a 1.9% generan un tirante de flujo máximo a 44% del diámetro de la tubería para condición del caudal máximo (32.4 m³/h). De acuerdo a los criterios indicados en la sección 1.6, las profundidades están en el rango de los valores recomendados (entre 65% y 30%).

Así mismo, en la tabla 14, se muestran los resultados hidráulicos considerando los flujos de la tabla 13, y la pendiente de mayor valor de acuerdo al perfil mostrado en la figura 13.

Tabla 15: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02, en los tramos con pendiente 275%.

Característica	Símbolo	Unidad	Escenario 01			Escenario 02	
			Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Caudal de agua	Q	m ³ /h	3.6	12.6	32.4	0.4	1.1
Diámetro externo	D_e	mm	168	168	168	168	168
HDPE SDR	SDR		17	17	17	17	17
Espesor de paredes	e	mm	10	10	10	10	10
Diámetro interno	D_i	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pendiente de fondo	J	%	275.0	275.0	275.0	275.0	275.0
Rugosidad de Manning	n		0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Tirante normal ²	Y_n	m	0.007	0.012	0.019	0.002	0.004
Área normal	A_n	m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Velocidad normal	V_n	m/s	3.660	5.360	7.130	1.800	2.530
Superficie libre normal	T_n	m	0.060	0.080	0.100	0.040	0.050

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Perímetro húmedo	p_n	m	0.060	0.090	0.110	0.040	0.050
Radio hidráulico	R_h	m	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000
Profundidad relativa	Y_n/D_i	%	4%	8%	13%	2%	3%
Número de Froude ¹	Fr		17.5	19.0	20.1	14.8	16.1

Nota 1: Caudal para un evento extremo eventual en época húmeda.

Nota 2: Se evaluó el tirante de la tubería, considerando las velocidades y número de Froude (Min. 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

Se verifica que las pendientes de 275%, considerando los flujos de los escenarios 01 y 02, generan tirantes por debajo de 13% del llenado de tubería, que de acuerdo con los criterios indicados en la sección 1.6, están por debajo de los valores recomendados (entre 65% y 35%), esto debido a la variabilidad de flujos en las cuales se evaluó el tirante de la tubería, Teniendo en consideración estas restricciones, se evaluó el diámetro óptimo, considerando el número de Froude (min, 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

5.2. Estación de la Poza N°2 hacia la Poza N°6

De acuerdo con el esquema presentado en la figura 12 y los caudales mostrados en la tabla 11, se presenta la evaluación hidráulica de acueducto (tubería a superficie libre) para el desaguado de la Poza N°2 en dirección a la Poza N°6.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

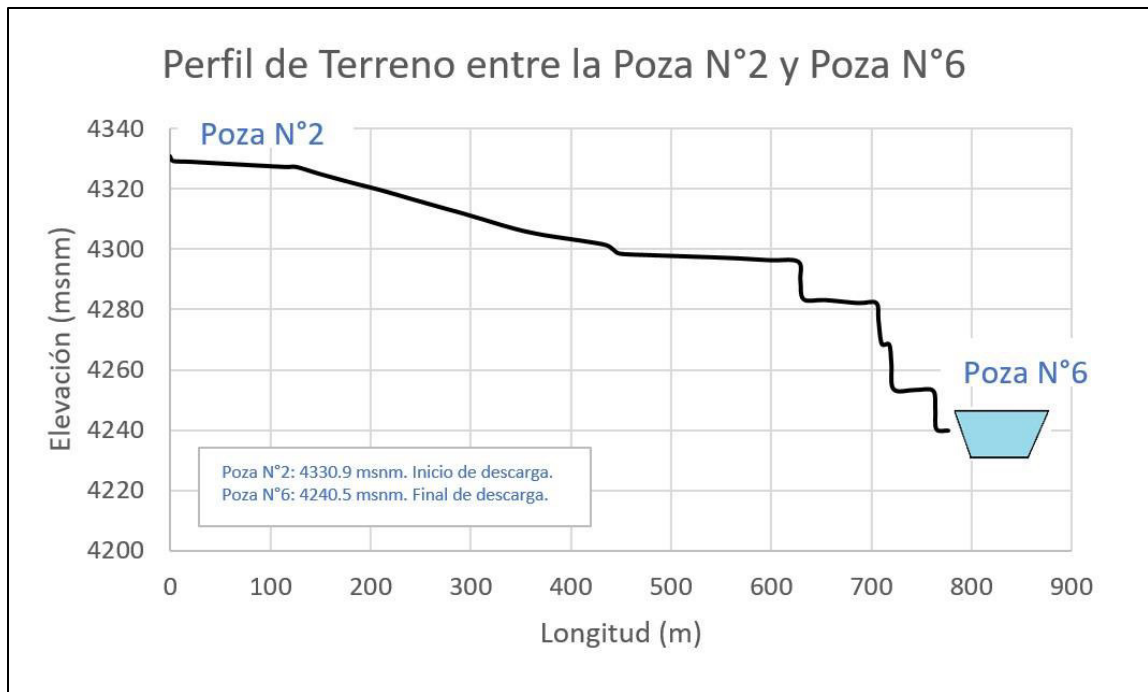
Tabla 16: *Parámetros hidráulico del acueducto Poza N°2 hacia Poza N°6.*

Parámetros	Valor
Progresiva [m]	0-780
Longitud [m]	826
Material	HDPE-SDR17
OD	10"
wt	0.632
Caudal escenario 01	23.4 _{Min.} – 79.92 _{Prom.} – 204.10 _{Nom.}
Caudal escenario 02	0.0 _{Min.} – 1.8 _{Prom.} – 9.72 _{Nom.}
Elevación del nivel de la Poza N°2	4330.9 msnm
Elevación del nivel de la Poza N°6	4240.5 msnm

Nota: Caudales de acuerdo a la memoria de cálculo civil e hidráulico. Las bombas, junio 2018.

En la figura 14 se muestra el perfil del terreno ubicado entre la Poza N°2 y la Poza N°6:

Figura 14: Perfil del terreno comprendidas entre la Poza N°2 y Poza N°6



Nota: Elaboración propia.

5.2.1. Resultados hidráulicos, tubería a superficie libre entre la Poza N°2 y N°6

De acuerdo a los parámetros de caudales indicados en la tabla 16 y los criterios de diseño mostrados en la sección 2.16, se muestran las verificaciones hidráulicas de las tuberías como acueducto (tubería a superficie libre).

La tabla 17 se muestran los resultados hidráulicos del acueducto considerando los caudales mínimos, nominales y máximos para el escenario 01 y escenario 02 indicados en la tabla 16 y considerando pendiente mínima de 1.5% que representa la pendiente mínima del trayecto, ver figura 14.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 17: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 1.5%.

Característica	Símbolo	Unidad	Escenario 01			Escenario 02	
			Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Caudal de agua	Q	m ³ /h	23.4	79.9	204.1	1.8	9.7
Diámetro externo	D_e	mm	273	273	273	273	273
HDPE SDR	SDR		17	17	17	17	17
Espesor de paredes	e	mm	16	16	16	16	16
Diámetro interno	D_i	m	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Pendiente de fondo	J	%	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Rugosidad de Manning	n		0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Tirante normal ²	Y_n	m	0.049	0.092	0.162	0.014	0.032
Área normal	A_n	m ²	0.010	0.020	0.030	0.000	0.000
Velocidad normal	V_n	m/s	0.980	1.380	1.740	0.450	0.750
Superficie libre normal	T_n	m	0.190	0.230	0.230	0.110	0.160
Perímetro húmedo	p_n	m	0.230	0.320	0.460	0.120	0.180
Radio hidráulico	R_h	m	0.030	0.050	0.070	0.010	0.020
Profundidad relativa	Y_n/D_i	%	20%	38%	67%	6%	13%
Número de Froude ¹	Fr		1.7	1.7	1.5	1.5	1.6

Nota 1: Caudal para un evento extremo eventual en época húmeda.

Nota 2: Se evaluó el tirante de la tubería, considerando las velocidades y número de Froude (Min. 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Se verifica que las pendientes menores a 1.5% generan un tirante de flujo mayor a 67% del diámetro de la tubería para condición del caudal máximo (204.1 m³/h). Esto debido a la variabilidad de los flujos, en las cuales se evaluó el tirante de la tubería.

Teniendo en consideración estas restricciones, se evaluó el diámetro óptimo, considerando el número de Froude (min, 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

Asimismo, en la tabla 18, se muestran los resultados hidráulicos considerando los flujos de la tabla 16, y pendiente la de mayor valor de acuerdo al perfil mostrado en la figura 14.

Tabla 18: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 275%.

Característica	Símbolo	Unidad	Escenario 01			Escenario 02	
			Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Caudal de agua	Q	m ³ /h	23.4	79.9	204.1	1.8	9.7
Diámetro externo	D_e	mm	273.1	273.1	273.1	273.1	273.1
HDPE SDR	SDR		17	17	17	17	17
Espesor de paredes	e	mm	16	16	16	16	16
Diámetro interno	D_i	m	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Pendiente de fondo	J	%	275.0	275.0	275.0	275.0	275.0
Rugosidad de Manning	n		0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Tirante normal ²	Y_n	m	0.014	0.025	0.040	0.004	0.009
Área normal	A_n	m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Velocidad normal	V_n	m/s	6.040	8.760	11.600	2.760	4.630
Superficie libre normal	T_n	m	0.110	0.150	0.180	0.060	0.090
Perímetro húmedo	p_n	m	0.120	0.160	0.200	0.060	0.100
Radio hidráulico	R_h	m	0.010	0.020	0.020	0.000	0.010
Profundidad relativa	Y_n/D_i	%	6%	10%	16%	2%	4%
Número de Froude ¹	Fr		19.8	21.3	22.4	16.5	18.6

Nota 1: Caudal para un evento extremo eventual en época húmeda.

Nota 2: Se evaluó el tirante de la tubería, considerando las velocidades y número de Froude (Min. 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

Se verifica que las pendientes de 275%, considerando los flujos de los escenarios 01 y 02, generan tirantes por debajo de 16% del llenado de tubería, que de acuerdo con los criterios indicados en la sección 1.6, están por debajo de los valores recomendados (entre 65% y 35%), esto debido a la variabilidad de flujos, en las cuales se evaluó el tirante de la tubería, y el diámetro con menor impacto de tal manera que pueden tener valores mayores al número de Froude de 1.4 (valor mínimo de 16.5).

5.3. Estación de la Poza N°3 hacia la Poza N°2

De acuerdo con el esquema presentado en la figura 12 y los caudales mostrados en la tabla 11, se presenta la evaluación hidráulica de acueducto (tubería a superficie libre) para el desaguado de la Poza N°3 en dirección a la Poza N°2.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

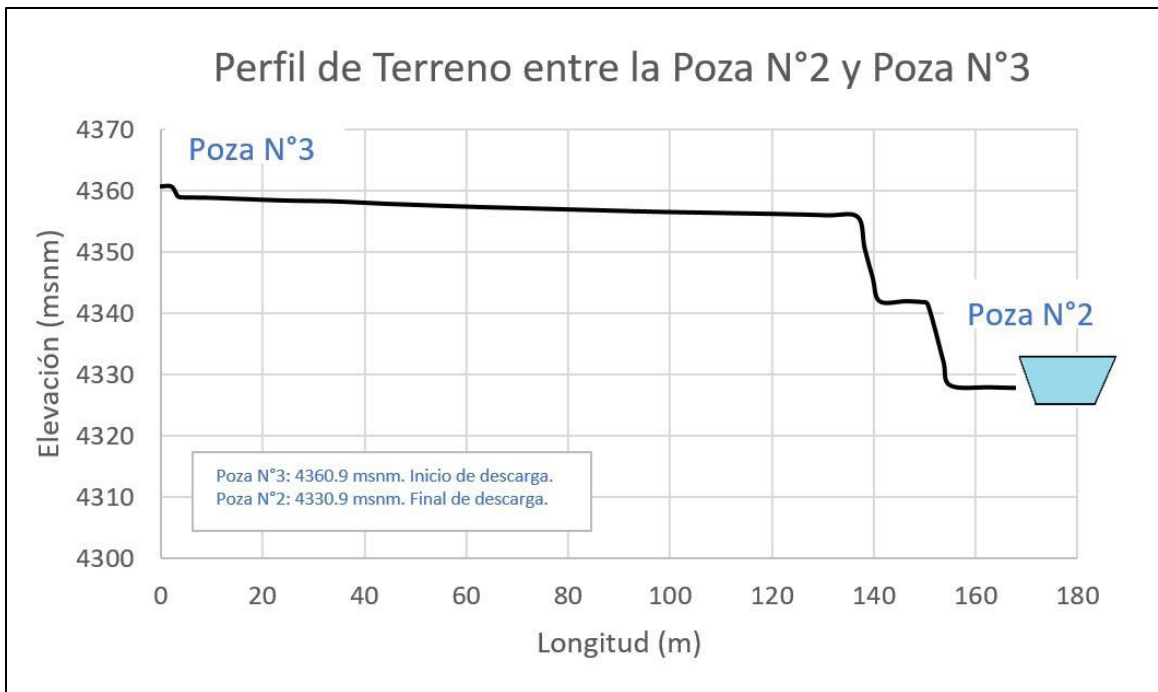
Tabla 19: *Parámetros hidráulico del acueducto Poza N°3 hacia Poza N°2.*

Parámetros	Valor
Progresiva [m]	0-170
Longitud [m]	193
Material	HDPE-SDR17
OD	6"
wt	0.39
Caudal escenario 01	6.84 Min. – 23.4 Prom. – 59.4 Nom.
Caudal escenario 02	0.0 Min. – 0.72 Prom. – 3.24 Nom.
Elevación del nivel de la Poza N°3	4360.9 msnm
Elevación del nivel de la Poza N°2	4330.9 msnm

Nota: Caudales de acuerdo a la memoria de cálculo civil e hidráulico. Las bombas, junio 2018.

En la figura 15 se muestra el perfil del terreno ubicado entre la Poza N°3 y la Poza N°2:

Figura 15: Perfil del terreno comprendidas entre la Poza N°3 y Poza N°2.



Nota: Elaboración propia.

5.3.1. Resultados hidráulicos, tubería a superficie libre entre la Poza N°3 y N°2

De acuerdo a los parámetros de caudales indicados en la tabla 19 y los criterios de diseño mostrados en la sección 2.16, se muestran las verificaciones hidráulicas de las tuberías como acueducto (tubería a superficie libre).

La tabla 20 se muestran los resultados hidráulicos del acueducto considerando los caudales mínimos, nominales y máximos para el escenario 01 y escenario 02 indicados en la tabla 19 y considerando pendiente mínima de 1.8% que representa la pendiente mínima del trayecto, ver figura 15.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 20: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 1.8%.

Característica	Símbolo	Unidad	Escenario 01			Escenario 02	
			Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Caudal de agua	Q	m ³ /h	6.8	23.4	59.4	0.7	3.2
Diámetro externo	D_e	mm	168	168	168	168	168
HDPE SDR	SDR		17	17	17	17	17
Espesor de paredes	e	mm	10	10	10	10	10
Diámetro interno	D_i	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pendiente de fondo	J	%	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Rugosidad de Manning	n		0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Tirante normal ²	Y_n	m	0.030	0.056	0.097	0.010	0.021
Área normal	A_n	m ²	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000
Velocidad normal	V_n	m/s	0.770	1.090	1.370	0.390	0.610
Superficie libre normal	T_n	m	0.120	0.140	0.140	0.070	0.100
Perímetro húmedo	p_n	m	0.140	0.200	0.280	0.080	0.110
Radio hidráulico	R_h	m	0.020	0.030	0.040	0.010	0.010
Profundidad relativa	Y_n/D_i	%	20%	38%	66%	7%	14%
Número de Froude ¹	Fr		1.7	1.7	1.5	1.5	1.6

Nota 1: Caudal para un evento extremo eventual en época húmeda.

Nota 2: Se evaluó el tirante de la tubería, considerando las velocidades y número de Froude (Min. 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Se verifica que la pendiente menor 1.8% genera un tirante de flujo máximo de 66% del diámetro de la tubería para condición del caudal máximo (59.4 m³/h). Esto debido a la variabilidad de los flujos, en las cuales se evaluó el tirante de la tubería.

Teniendo en consideración estas restricciones, se evaluó el diámetro óptimo, considerando el número de Froude (min, 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

Asimismo, en la tabla 21, se muestran los resultados hidráulicos considerando los flujos de la tabla 19, y pendiente la de mayor valor de acuerdo al perfil mostrado en la figura 15.

Tabla 21: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 289.1%.

Característica	Símbolo	Unidad	Escenario 01			Escenario 02	
			Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Caudal de agua	Q	m ³ /h	6.8	23.4	59.4	0.7	3.2
Diámetro externo	D_e	mm	168	168	168	168	168
HDPE SDR	SDR		17	17	17	17	17
Espesor de paredes	e	mm	10	10	10	10	10
Diámetro interno	D_i	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pendiente de fondo	J	%	289.1	289.1	289.1	289.1	289.1
Rugosidad de Manning	n		0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Tirante normal ²	Y_n	m	0.009	0.016	0.025	0.003	0.006
Área normal	A_n	m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Velocidad normal	V_n	m/s	4.540	6.580	8.690	2.270	3.620
Superficie libre normal	T_n	m	0.070	0.100	0.120	0.040	0.060
Perímetro húmedo	p_n	m	0.070	0.100	0.120	0.040	0.060
Radio hidráulico	R_h	m	0.010	0.010	0.020	0.000	0.000
Profundidad relativa	Y_n/D_i	%	6%	11%	17%	2%	4%
Número de Froude ¹	Fr		18.8	20.3	21.2	16.0	17.9

Nota 1: Caudal para un evento extremo eventual en época húmeda.

Nota 2: Se evaluó el tirante de la tubería, considerando las velocidades y número de Froude (Min. 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

Se verifica que las pendientes de 289.1%, considerando los flujos de los escenarios 01 y 02, generan tirantes por debajo de 17% del llenado de tubería, que de acuerdo con los criterios indicados en la sección 1.6, están por debajo de los valores recomendados (entre 65% y 35%), esto debido a la variabilidad de flujos, en las cuales se evaluó el tirante de la tubería, y el diámetro con menor impacto de tal manera que pueden tener valores mayores al número de Froude de 1.4 (valor mínimo de 16).

5.4. Estación de la Poza N°4 hacia la Poza N°6

De acuerdo con el esquema presentado en la figura 12 y los caudales mostrados en la tabla 11, se presenta la evaluación hidráulica de acueducto (tubería a superficie libre) para el desaguado de la Poza N°4 en dirección a la Poza N°6.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

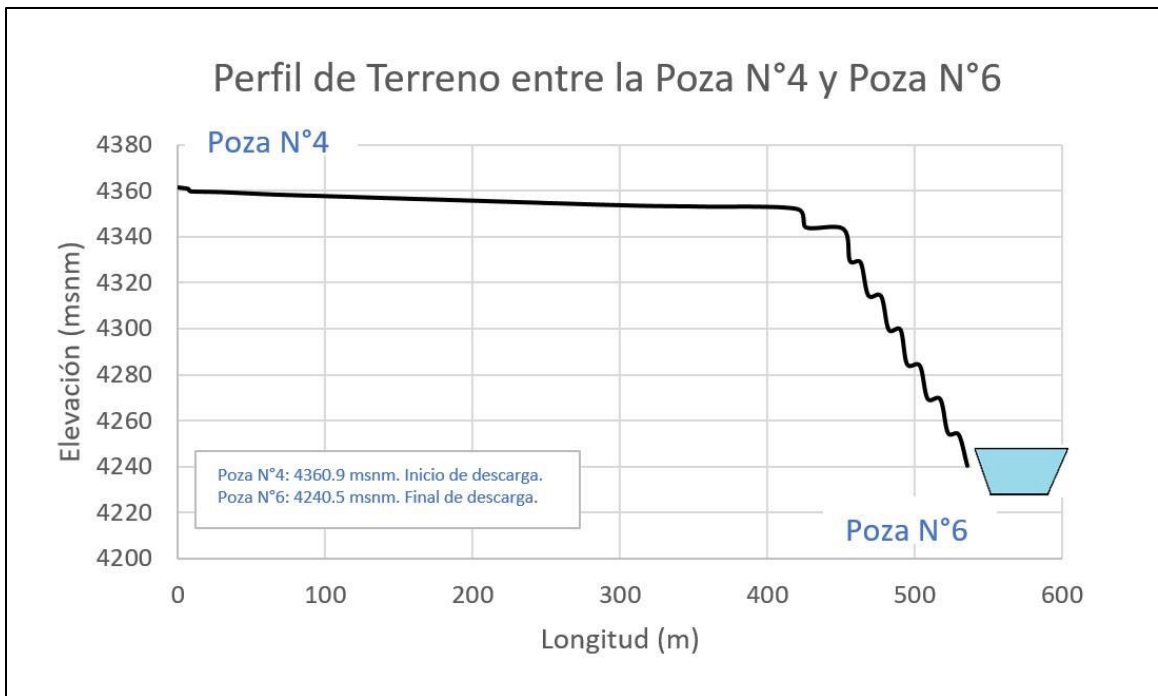
Tabla 22: *Parámetros hidráulico del acueducto Poza N°4 hacia Poza N°6..*

Parámetros	Valor
Progresiva [m]	0-540
Longitud [m]	624
Material	HDPE-SDR17
OD	6"
wt	0.39
Caudal escenario 01	6.84 Min. – 22.68 Prom. – 57.24 Nom.
Caudal escenario 02	0.0 Min. – 0.72 Prom. – 3.24 Nom.
Elevación del nivel de la Poza N°4	4360.9 msnm
Elevación del nivel de la Poza N°6	4240.5 msnm

Nota: Caudales de acuerdo a la memoria de cálculo civil e hidráulico. Las bombas, junio 2018.

En la figura 16 se muestra el perfil del terreno ubicado entre la Poza N°4 y la Poza N°6:

Figura 16: Perfil del terreno comprendidas entre la Poza N°4 y Poza N°6.



Nota: Elaboración propia.

5.4.1. Resultados hidráulicos, tubería a superficie libre entre la Poza N°4 y N°6

De acuerdo a los parámetros de caudales indicados en la tabla 22 y los criterios de diseño mostrados en la sección 2.16, se muestran las verificaciones hidráulicas de las tuberías como acueducto (tubería a superficie libre).

La tabla 23 se muestran los resultados hidráulicos del acueducto considerando los caudales mínimos, nominales y máximos para el escenario 01 y escenario 02 indicados en la tabla 22 y considerando pendiente mínima de 1.8% que representa la pendiente mínima del trayecto, ver figura 16.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 23: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 1.8%.

Característica	Símbolo	Unidad	Escenario 01			Escenario 02	
			Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Caudal de agua	Q	m ³ /h	6.8	22.7	57.2	0.7	3.2
Diámetro externo	D_e	mm	168	168	168	168	168
HDPE SDR	SDR		17	17	17	17	17
Espesor de paredes	e	mm	10	10	10	10	10
Diámetro interno	D_i	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pendiente de fondo	J	%	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
Rugosidad de Manning	n		0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Tirante normal ²	Y_n	m	0.030	0.055	0.095	0.010	0.021
Área normal	A_n	m ²	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000
Velocidad normal	V_n	m/s	0.770	1.080	1.360	0.390	0.610
Superficie libre normal	T_n	m	0.120	0.140	0.140	0.070	0.100
Perímetro húmedo	p_n	m	0.140	0.190	0.280	0.080	0.110
Radio hidráulico	R_h	m	0.020	0.030	0.040	0.010	0.010
Profundidad relativa	Y_n/D_i	%	20%	37%	64%	7%	14%
Número de Froude ¹	Fr		1.7	1.7	1.5	1.5	1.6

Nota 1: Caudal para un evento extremo eventual en época húmeda.

Nota 2: Se evaluó el tirante de la tubería, considerando las velocidades y número de Froude (Min. 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Se verifica que las pendientes menores a 1.8% generan un tirante de flujo mayor a 64% del diámetro de la tubería para condición del caudal máximo (57.2 m³/h). De acuerdo a los criterios indicados en la sección 1.6, las profundidades están en el rango de los valores recomendados (entre 65% y 30%). Se evaluó el diámetro óptimo, considerando el número de Froude (min, 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

Asimismo, en la tabla 24 se muestran los resultados hidráulicos considerando los flujos de la tabla 22, y pendiente la de mayor valor de acuerdo al perfil mostrado en la figura 16.

Tabla 24: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 274.8%.

Característica	Símbolo	Unidad	Escenario 01			Escenario 02	
			Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Caudal de agua	Q	m ³ /h	6.8	22.7	57.2	0.7	3.2
Diámetro externo	D_e	mm	168	168	168	168	168
HDPE SDR	SDR		17	17	17	17	17
Espesor de paredes	e	mm	10	10	10	10	10
Diámetro interno	D_i	m	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Pendiente de fondo	J	%	274.8	274.8	274.8	274.8	274.8
Rugosidad de Manning	n		0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Tirante normal ²	Y_n	m	0.009	0.016	0.025	0.003	0.006
Área normal	A_n	m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Velocidad normal	V_n	m/s	4.460	6.410	8.450	2.230	3.550
Superficie libre normal	T_n	m	0.070	0.090	0.110	0.040	0.060
Perímetro húmedo	p_n	m	0.070	0.100	0.120	0.040	0.060
Radio hidráulico	R_h	m	0.010	0.010	0.020	0.000	0.000
Profundidad relativa	Y_n/D_i	%	6%	11%	17%	2%	4%
Número de Froude ¹	Fr		18.3	19.7	20.7	15.6	17.4

Nota 1: Caudal para un evento extremo eventual en época húmeda.

Nota 2: Se evaluó el tirante de la tubería, considerando las velocidades y número de Froude (Min. 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

Se verifica que las pendientes de 274.8%, considerando los flujos de los escenarios 01 y 02, generan tirantes por debajo de 17% del llenado de tubería, que de acuerdo con los criterios indicados en la sección 1.6, están por debajo de los valores recomendados (entre 65% y 35%), esto debido a la variabilidad de flujos, en las cuales se evaluó el tirante de la tubería, y el diámetro con menor impacto de tal manera que pueden tener valores mayores al número de Froude de 1.4 (valor mínimo de 20.7).

5.5. Estación de la Poza N°5 hacia la Poza N°6

De acuerdo con el esquema presentado en la figura 12 y los caudales mostrados en la tabla 11, se presenta la evaluación hidráulica de acueducto (tubería a superficie libre) para el desaguado de la Poza N°5 en dirección a la Poza N°6.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 25: *Parámetros hidráulico del acueducto Poza N°5 hacia Poza N°6..*

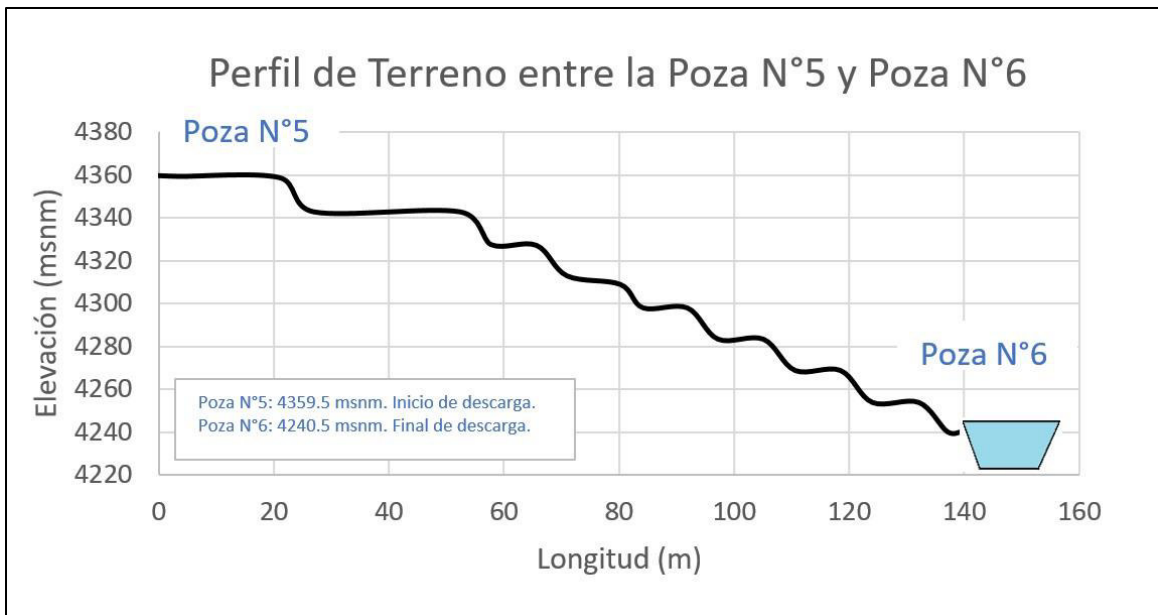
Parámetros	Valor
Progresiva [m]	0-140
Longitud [m]	224
Material	HDPE-SDR17
OD	10"
wt	0.632
Caudal escenario 01	24.48 Min. – 79.20 Prom. – 198.24 Nom.
Caudal escenario 02	0.0 Min. – 3.96 Prom. – 12.96 Nom.
Elevación del nivel de la Poza N°5	4359.5 msnm
Elevación del nivel de la Poza N°6	4240.5 msnm

Nota: Caudales de acuerdo a la memoria de cálculo civil e hidráulico. Las bombas, junio 2018.

En la figura 17 se muestra el perfil del terreno ubicado entre la Poza N°5 y la Poza N°6:

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Figura 17: Perfil del terreno comprendidas entre la Poza N°5 y Poza N°6.



Nota: Elaboración propia.

5.5.1. Resultados hidráulicos, tubería a superficie libre entre la Poza N°5 y N°6

De acuerdo a los parámetros de caudales indicados en la tabla 25 y los criterios de diseño mostrados en la sección 2.16, se muestran las verificaciones hidráulicas de las tuberías como acueducto (tubería a superficie libre).

La tabla 26 se muestran los resultados hidráulicos del acueducto considerando los caudales mínimos, nominales y máximos para el escenario 01 y escenario 02 indicados en la tabla 25 y considerando pendiente mínima de 1.5% que representa la pendiente mínima del trayecto, ver figura 17.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 26 :Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 1.5%.

Característica	Símbolo	Unidad	Escenario 01			Escenario 02	
			Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Caudal de agua	Q	m ³ /h	24.5	79.2	198.7	4	13
Diámetro externo	D_e	mm	273	273	273	273	273
HDPE SDR	SDR		17	17	17	17	17
Espesor de paredes	e	mm	16	16	16	16	16
Diámetro interno	D_i	m	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Pendiente de fondo	J	%	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Rugosidad de Manning	n		0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Tirante normal ²	Y_n	m	0.050	0.092	0.159	0.021	0.037
Área normal	A_n	m ²	0.010	0.020	0.030	0.000	0.000
Velocidad normal	V_n	m/s	0.990	1.380	1.730	0.570	0.820
Superficie libre normal	T_n	m	0.200	0.230	0.200	0.140	0.170
Perímetro húmedo	p_n	m	0.230	0.320	0.460	0.140	0.190
Radio hidráulico	R_h	m	0.030	0.050	0.070	0.010	0.020
Profundidad relativa	Y_n/D_i	%	21%	38%	66%	9%	15%
Número de Froude ¹	Fr		1.7	1.7	1.5	1.5	1.6

Nota 1: Caudal para un evento extremo eventual en época húmeda.

Nota 2: Se evaluó el tirante de la tubería, considerando las velocidades y número de Froude (Min. 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Se verifica que las pendientes menores a 1.5% generan un tirante de flujo mayor a 66% del diámetro de la tubería para condición del caudal máximo (198.7 m³/h). Esto debido a la variabilidad de los flujos, en las cuales se evaluó el tirante de la tubería.

Teniendo en consideración estas restricciones, se evaluó el diámetro óptimo, considerando el número de Froude (min, 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

Asimismo, en la tabla 27 se muestran los resultados hidráulicos considerando los flujos de la tabla 25, y pendiente la de mayor valor de acuerdo al perfil mostrado en la figura 17.

Tabla 27: Resultados de la evaluación del acueducto para flujos de los escenarios 01 y 02 en los tramos con pendiente 275.0%.

Característica	Símbolo	Unidad	Escenario 01			Escenario 02	
			Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Máximo
Caudal de agua	Q	m ³ /h	24.5	79.2	198.7	4	13
Diámetro externo	D_e	mm	273	273	273	273	273
HDPE SDR	SDR		17	17	17	17	17
Espesor de paredes	e	mm	16	16	16	16	16
Diámetro interno	D_i	m	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Pendiente de fondo	J	%	275.0	275.0	275.0	275.0	275.0
Rugosidad de Manning	n		0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
Tirante normal ²	Y_n	m	0.014	0.025	0.039	0.006	0.011
Área normal	A_n	m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Velocidad normal	V_n	m/s	6.130	8.740	11.510	3.520	5.050
Superficie libre normal	T_n	m	0.110	0.150	0.180	0.080	0.010
Perímetro húmedo	p_n	m	0.120	0.160	0.200	0.080	0.100
Radio hidráulico	R_h	m	0.010	0.020	0.020	0.000	0.010
Profundidad relativa	Y_n/D_i	%	6%	10%	16%	3%	4%
Número de Froude ¹	Fr		19.9	21.3	22.4	17.5	19.0

Nota 1: Caudal para un evento extremo eventual en época húmeda.

Nota 2: Se evaluó el tirante de la tubería, considerando las velocidades y número de Froude (Min. 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales del sistema.

Se verifica que las pendientes de 275.0%, considerando los flujos de los escenarios 01 y 02, generan tirantes por debajo de 16% del llenado de tubería, que de acuerdo con los criterios indicados en la sección 1.6, están por debajo de los valores recomendados (entre 65% y 35%), esto debido a la variabilidad de flujos, en las cuales se evaluó el tirante de la tubería, y el diámetro con menor impacto de tal manera que pueden tener valores mayores al número de Froude de 1.4 (valor mínimo de 17.5).

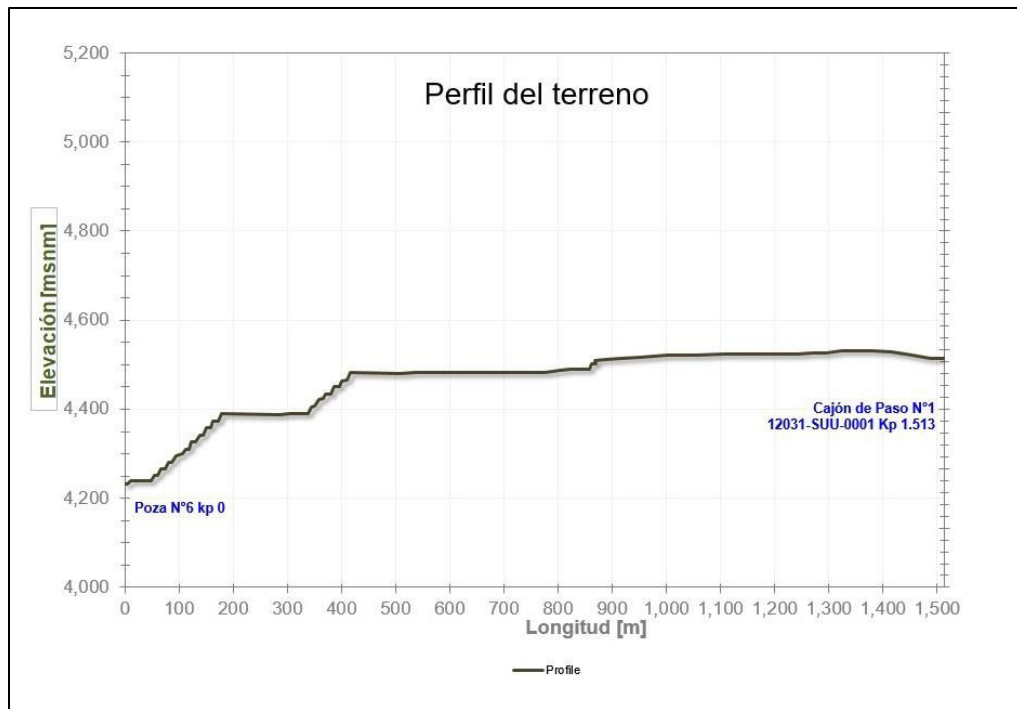
5.6. Estación de bombeo Poza N°6 hacia cajón de Paso N°1

De acuerdo con el esquema presentado en la Figura 12, se presentan las siguientes evaluaciones hidráulicas para el desaguado de la Poza N°6.

5.6.1. Perfil del terreno

En la figura 18 se muestra el perfil del terreno desde la Poza N°6 hasta el cajón de Paso N°1 con tag 12031-SUU-001

Figura 18: Perfil del terreno de la tubería de impulsión.



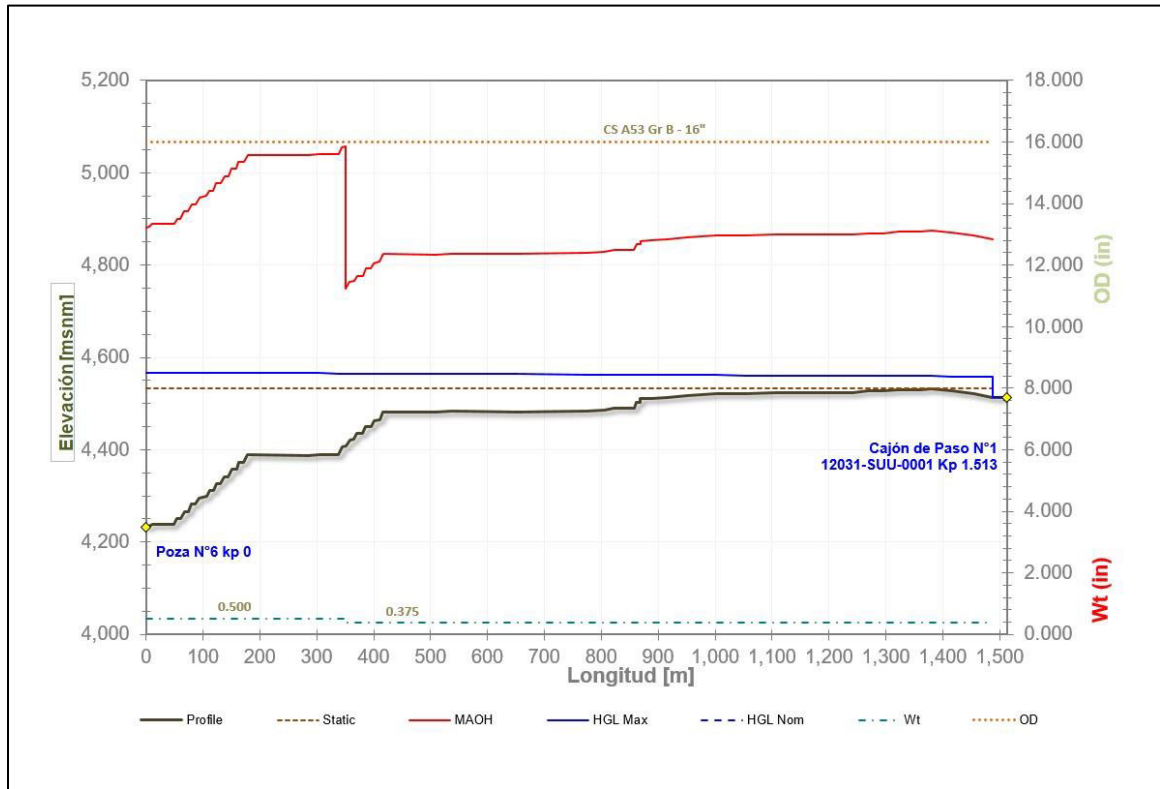
Nota: Elaboración propia.

5.6.2. Evaluación del perfil hidráulico en estado estable

La figura 19 muestra el perfil hidráulico del sistema en condiciones de operación de diseño del desaguado en la Poza N°6 (02 bombas en operación, sin stand by).

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Figura 19: Gradiente hidráulico de tuberías de acero al carbono 16", 02 bombas operando en paralelo y caudal de diseño 728.6 m³/h.

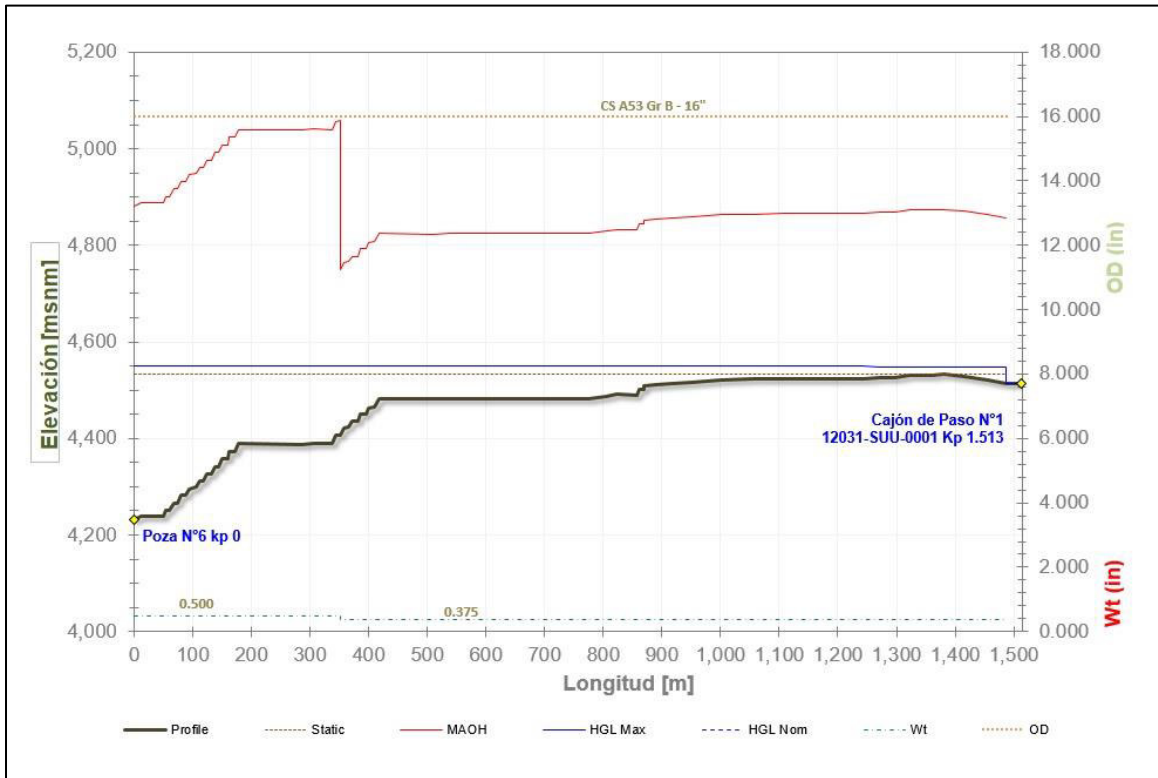


Nota: Elaboración propia.

La figura 20, muestra el perfil hidráulico del sistema en condiciones de operación de diseño del desaguado en la Poza N°6 (01 bomba en operación, sin stand by).

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Figura 20: Gradiente hidráulico de tuberías de acero al carbono 16", 01 bombas operando en paralelo y caudal de diseño 377.0 m³/h.



Nota: Elaboración propia.

5.7. Cálculo de parámetros hidráulicos de la Poza N°6 hacia Cajón de paso N°1

5.7.1. Para 01 bomba en operación

Para 01 bomba en operación tenemos el caudal nominal de 377.0 m³/h y los siguientes datos de entrada. Ver tabla 28 y tabla 29.

Tabla 28: Datos de ingreso para 01 bomba tramo 1.

Tramo 1 desde 0 m hasta 350 m. (ASTM A53 Gr. B- Sch XS)	
Z ₁ (m)	4231
Z ₂ (m)	4408
T (°C)	16

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

ε (m)	0.001968504
μ (N.s/m ²)	0.001106028
ρ (kg/m ³)	999.01
L (m)	350
Q (m ³ /s)	377
DN	16
OD (in)	16
Wt (in)	0.5

Nota: Elaboración propia.

Tabla 29: *Datos de ingreso para 01 bomba tramo 2.*

Tramo 2 desde 350 m hasta 1535 m (ASTM A53 Gr. B Sch-STD)	
Z1 (m)	4408
Z2 (m)	4549
T (°C)	16
ε	0.001968504
μ (N.s/m ²)	0.001106028
ρ (kg/m ³)	999.01
L (m)	1185
Q (m ³ /s)	377
DN	16
OD (in)	16
Wt (in)	0.375

Nota: Elaboración propia.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

- Diámetro interno (D_i):

$$D_i(m) = OD \times 2wt \times 0.0254$$

- Para 1er. tramo:

$$D_i = 16 \times 2(0.5) \times 0.0254 = 0.381 \text{ m}$$

- Para tramo 2:

$$D_i = 16 \times 2(0.375) \times 0.0254 = 0.387 \text{ m}$$

- Velocidad (V):

Para hallar la velocidad en los respectivos tramos tenemos:

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

- Para tramo 1:

$$V = \frac{4 \times 377}{3600\pi(0.381)^2} = 0.92 \frac{m}{s}$$

- Para tramo 2:

$$V = \frac{4 \times 377}{3600\pi(0.387)^2} = 0.89 \frac{m}{s}$$

- Reynolds (Re):

De la ecuación 2.23 tenemos:

$$Re = \frac{\rho V D_i}{\mu} \quad (2.23)$$

- Para tramo 1:

$$Re = \frac{999.01 \times 0.92 \times 0.381}{0.0011} = 316103$$

- Para tramo 2:

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

$$Re = \frac{999.17 \times 0.89 \times 0.387}{0.0011} = 310921$$

- Factor de fricción (f):

Se observa que los números de Reynolds son mayores a 4000. Para hallar el factor de fricción utilizaremos la ecuación 2.27 (Colebrook-white) mediante proceso iterativo:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (2.27)$$

Pasos para la solución de f :

1. Asignaremos al lado izquierdo de la ecuación 2.27 un valor α .
2. Asignaremos al lado derecho de la ecuación 2.27 un valor β .
3. Se estima un valor f^1 .
4. El f^1 es evaluado en α y en β .
5. La diferencia entre α y β tiene que converger a 0.
6. De lo contrario si no converge seleccionar un f^2 y repetir los pasos 4 y 5 hasta converger a 0

- Para tramo 1:

- $f^1 = 1$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^1}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^1}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.381)} + \frac{2.51}{316103\sqrt{1}}\right)$$

$$\beta = 5.649$$

$$|\alpha - \beta| = |1 - 5.649| = 4.648 \quad (\text{Asignar un nuevo valor } f^2)$$

- $f^2 = 0.1$

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.1}} = 3.162$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^2}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.381)} + \frac{2.51}{316103\sqrt{0.1}}\right)$$

$$\beta = 5.638$$

$$|\alpha - \beta| = |3.162 - 5.638| = 2.476 \quad (\text{Asignar un nuevo valor } f^3)$$

○ $f^3 = 0.0309$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^3}} = \frac{1}{\sqrt{0.0309}} = 5.682$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^2}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.381)} + \frac{2.51}{316103\sqrt{0.0309}}\right)$$

$$\beta = 5.626$$

$$|\alpha - \beta| = |5.682 - 5.626| = 0.056 \quad (\text{ok})$$

Se resuelve el factor de fricción en el tramo 1 es $f = 0.0309$

- Para tramo 2:

○ $f^1 = 1$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^1}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^1}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.387)} + \frac{2.51}{310921\sqrt{1}}\right)$$

$$\beta = 5.663$$

$$|\alpha - \beta| = |1 - 5.663| = 4.663 \quad (\text{Asignar un nuevo valor } f^2)$$

○ $f^2 = 0.1$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.1}} = 3.162$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^2}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.387)} + \frac{2.51}{310921\sqrt{0.1}}\right)$$

$$\beta = 5.652$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

$$|\alpha - \beta| = |3.162 - 5.652| = 2.489 \quad (\text{Asignar un nuevo valor } f^3)$$

○ $f^3 = 0.0308$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^3}} = \frac{1}{\sqrt{0.0308}} = 5.696$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^2}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.387)} + \frac{2.51}{310921\sqrt{0.0308}}\right)$$

$$\beta = 5.639$$

$$|\alpha - \beta| = |5.696 - 5.639| = 0.056 \quad (\text{ok})$$

Se resuelve el factor de fricción en el tramo 2 es $f = 0.0308$

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

De la ecuación 2.25 tenemos la ecuación de Darcy-Weisbach que nos indica las pérdidas ocasionadas por fricción de la tubería. Considerar que se desprecia las pérdidas secundarias o también conocidas pérdidas por accesorios.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (2.25)$$

- Para tramo 1:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.0309 \times \frac{350}{0.381} \times \frac{0.92^2}{2 \times 9.81} = 1.223 \text{ m}$$

- Para tramo 2:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.0308 \times \frac{1185}{0.0387} \times \frac{0.89^2}{2 \times 9.81} = 3.795 \text{ m}$$

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

$$h_f = h_{f_{\text{Tramo 1}}} + h_{f_{\text{Tramo 2}}} = 1.223 + 3.795 = 5.019 \text{ m}$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

$$h_f = 5.019 \text{ m}$$

- Cálculo del TDH para 01 bomba y $Q = 377 \text{ [m}^3/\text{h]}$:

De la ecuación 2.30 $TDH = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) + h_f$ en donde la presión estática es igual a 0 por ser depósitos y están a presión atmosférica tenemos la diferencia de cotas y las pérdidas por fricción.

$$TDH = 4549\text{m} - 4231\text{m} + 5.019 \text{ m}$$

$$TDH = 323.019 \text{ m}$$

- Cálculo de la potencia útil:

Potencia útil:

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

Donde:

Pot: Potencia útil (hp)

SG: Gravedad específica del agua a 16 °C

n: Eficiencia

$$Pot = 0.999 \times \frac{377}{3.6} \times \frac{323.02}{76 \times 0.816} = 599.4 \text{ hp}$$

$$Pot = \frac{599.4}{1.341} = 446.98 \text{ kw}$$

- Cálculo del NPSH:

Considerando los valores señalados en la tabla 30 del ambiente:

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Tabla 30: *Parámetros para hallar el NPSH*

Parámetros de ambiente	Valores
T (°C)	16.1
μ (kg/m.s)	0.00111
ρ (kg/m ³)	999.01
Pv (mca)	0.163
Patm (mca)	6.11

Nota: Calculado de acuerdo al estándar ISO 2533.

Tenemos de la ecuación 2.20

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

Donde:

$$P_A \text{ (Presión atmosférica)} = 6.11 \text{ mca}$$

$$P_v \text{ (Presión de vapor)} = 0.163 \text{ m}$$

$$H_s \text{ (Altura estática de succión)} = 0.80 \text{ m}$$

$$\Delta h_s \text{ (Pérdida de carga en la succión)} = 1.00$$

$$NPSH_A = 6.11 + 0.163 + 0.80 - 1 = 6.073 \text{ m}$$

$$NPSH_A = 6.073 \text{ m}$$

5.7.2. Para 02 bomba en operación

De la misma forma como se hallaron los parámetros hidráulicos en la sección

5.7.1 para 01 bomba se realizan los cálculos para 02 bombas, caudal es $728.6 \frac{m^3}{h}$.

- Velocidad (V):

Para hallar la velocidad en los respectivos tramos tenemos:

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

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

- Para tramo 1:

$$V = \frac{4 \times 728.6}{3600\pi(0.381)^2} = 1.78 \frac{m}{s}$$

- Para tramo 2:

$$V = \frac{4 \times 728.6}{3600\pi(0.387)^2} = 1.72 \frac{m}{s}$$

- Reynolds (Re):

De la ecuación 2.23 tenemos:

$$Re = \frac{\rho V D_i}{\mu} \quad (2.23)$$

- Para tramo 1:

$$Re = \frac{999.01 \times 1.78 \times 0.381}{0.0011} = 610908$$

- Para tramo 2:

$$Re = \frac{999.17 \times 1.72 \times 0.387}{0.0011} = 600893$$

- Factor de fricción (f):

Se observa que los números de Reynolds son mayores a 4000. Para hallar el factor de fricción utilizaremos la ecuación 2.27 (Colebrook-white) mediante proceso iterativo:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2.27)$$

Pasos para la solución de f :

7. Asignaremos al lado izquierdo de la ecuación 2.27 un valor α .
8. Asignaremos al lado derecho de la ecuación 2.27 un valor β .

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

9. Se estima un valor f^1 .
10. El f^1 es evaluado en α y en β .
11. La diferencia entre α y β tiene que converger a 0.
12. De lo contrario si no converge seleccionar un f^2 y repetir los pasos 4 y 5 hasta converger a 0

- Para tramo 1:

○ $f^1 = 1$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^1}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^1}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.381)} + \frac{2.51}{316103\sqrt{1}}\right)$$

$$\beta = 5.65$$

$$|\alpha - \beta| = |1 - 5.649| = 4.65 \quad (\text{Asignar un nuevo valor } f^2)$$

○ $f^2 = 0.1$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.1}} = 3.162$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^2}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.381)} + \frac{2.51}{316103\sqrt{0.1}}\right)$$

$$\beta = 5.645$$

$$|\alpha - \beta| = |3.162 - 5.638| = 2.483 \quad (\text{Asignar un nuevo valor } f^3)$$

○ $f^3 = 0.0308$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^3}} = \frac{1}{\sqrt{0.0308}} = 5.695$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^3}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.381)} + \frac{2.51}{316103\sqrt{0.0308}}\right)$$

$$\beta = 5.639$$

$$|\alpha - \beta| = |5.682 - 5.266| = 0.0561 \quad (\text{ok})$$

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Se resuelve el factor de fricción en el tramo 1 es $f = 0.0308$

- Para tramo 2:

○ $f^1 = 1$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^1}} = \frac{1}{\sqrt{1}} = 1$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^1}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.387)} + \frac{2.51}{310921\sqrt{1}}\right)$$

$$\beta = 5.663$$

$$|\alpha - \beta| = |1 - 5.663| = 4.663 \quad (\text{Asignar un nuevo valor } f^2)$$

○ $f^2 = 0.1$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.1}} = 3.162$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^2}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.387)} + \frac{2.51}{310921\sqrt{0.1}}\right)$$

$$\beta = 5.659$$

$$|\alpha - \beta| = |3.162 - 5.652| = 2.497 \quad (\text{Asignar un nuevo valor } f^3)$$

○ $f^3 = 0.03067$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{f^3}} = \frac{1}{\sqrt{0.03067}} = 5.709$$

$$\beta = -0.86 \ln\left(\frac{\epsilon}{2.7D_i} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f^3}}\right) = -0.86 \ln\left(\frac{0.00197}{2.7(0.387)} + \frac{2.51}{310921\sqrt{0.03067}}\right)$$

$$\beta = 5.652$$

$$|\alpha - \beta| = |5.696 - 5.639| = 0.0564 \quad (\text{ok})$$

Se resuelve el factor de fricción en el tramo 2 es $f = 0.0308$

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

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

De la ecuación 2.25 tenemos la ecuación de Darcy-Weisbach que nos indica las pérdidas ocasionadas por fricción de la tubería. Considerar que se desprecia las pérdidas secundarias o también conocidas pérdidas por accesorios.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (2.25)$$

- Para tramo 1:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.0308 \times \frac{350}{0.381} \times \frac{1.78^2}{2 \times 9.81} = 4.548 \text{ m}$$

- Para tramo 2:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.0308 \times \frac{1185}{0.0387} \times \frac{1.72^2}{2 \times 9.81} = 14.109 \text{ m}$$

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

$$h_f = h_{f_{Tramo 1}} + h_{f_{Tramo 2}} = 4.548 + 14.109 = 18.6581 \text{ m}$$

$$h_f = 18.6581 \text{ m}$$

- Cálculo del TDH para 02 bomba y $Q = 728.6 \text{ [m}^3/\text{h]}$:

De la ecuación 2.30 $TDH = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (Z_1 - Z_2) + h_f$ en donde la presión estática es igual a 0 por ser depósitos y están a presión atmosférica tenemos la diferencia de cotas y las pérdidas por fricción.

$$TDH = 4559\text{m} - 4231\text{m} + 18.6581 \text{ m}$$

$$TDH = 346.658 \text{ m}$$

- Cálculo de la potencia útil para las 02 bombas en total:

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Potencia útil:

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

Donde:

Pot: Potencia útil (hp)

SG: Gravedad específica del agua a 16 °C

n: Eficiencia

$$Pot = 0.999 \times \frac{728.6}{3.6} \times \frac{346.658}{76 \times 0.811} = 1250.86 \text{ hp}$$

$$Pot = \frac{599.4}{1.341} = 932.788 \text{ kw}$$

$$Pot = 466.39 \text{ kw (por bomba)}$$

5.8. Resultados del análisis de la tubería de impulsión

En la tabla 31 se muestra el cuadro de resumen tanto del sistema de tubería de impulsión desde la Poza N°6 hasta el Cajón N°1 para 01 bomba y para 02 bombas:

Tabla 31: Resultados del análisis hidráulico de la tubería de impulsión.

Parámetros	Operación	
Desde [m]	0	350
Hasta [m]	350	1535
Material	CS A53, Gr B	CS A53, Gr B
OD [in]	16"	16"
wt [in]	0.5	0.375

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Caudal 01 bomba ² [$\frac{m^3}{h}$]	377 Nominal	
Caudal 02 bomba ² [$\frac{m^3}{h}$]	728.64 Diseño	
Velocidad 01 bomba [$\frac{m}{s}$]	0.92	0.89
Velocidad 02 bombas [$\frac{m}{s}$]	1.78	1.72

1. Caudales ponderados de la Poza N°6 hacia Cajón de paso N°1.
2. Caudales de acuerdo a 01 bomba operando y 02 bombas operando en paralelo.

5.9. Requerimiento de bombeo, bombas 0926-PPV-0001/0002

Los requerimientos hidráulicos para la bomba se muestran en la tabla 32:

Tabla 32: *Requerimiento de bombeo.*

Parámetro	01 Bomba	02 Bomba
Caudal total [$\frac{m^3}{h}$]	377	728.6
Caudal por bomba [$\frac{m^3}{h}$]	377	364.3
ADT [m]	323.02	346.65
Eficiencia de la Bomba [m]	81.6	81.1
BHP [kW]	446.98	466.39
NPSHr [m]	3.18	3.18
NPSHa [m]	6.073	6.073

Nota: Elaboración propia.

Conclusiones

- Se concluye que los flujos para el desaguado de las pozas del Tajo Chalcobamba (Poza N°1, Poza N°2, Poza N°3, Poza N°4 y Poza N° 5) dirigen sus flujos hacia la Poza N°6. El sistema de bombeo ubicado en La Poza N°6 presenta capacidad de evacuación del promedio ponderado de estos caudales de ingreso, las cuales son evacuados hacia el cajón de Paso N°1 con tag: 12031-SUU-0001, no presentando impacto en la capacidad de almacenamiento de la Poza N°6.
- El amplio rango de variabilidad de los flujos mínimo, promedio y máximo mostrados en la tabla 12 y teniendo en cuenta que los flujos máximos son eventuales y requerimiento de MLB (millones de libras) para un menor CAPEX, el sistema de bombeo ubicado en la Poza N°6, se dimensionaron con 02 bombas por cada estación y no presentan stand by. El sistema de bombeo opera con la condición de flujo nominal de acuerdo con la capacidad de cada curva de la bomba y cumplen con el requerimiento del flujo de diseño de acuerdo a la tabla 12 en operación en paralelo. Las potencias y rangos de operatividad de las bombas seleccionadas de la poza N°6, se muestran en la tabla 32.
- Los valores de los caudales nominales están sujetos a selección del comportamiento de la curva de cada bomba. Estos valores nominales, serán ajustados en las siguientes etapas de ingeniería. El valor del caudal nominal con una sola bomba cubre el rango de caudales menores a este y por consiguiente, se tendrán menores valores de tiempo de evacuación de la Poza N°6.
- Se concluye que para el tipo de bomba utilizado en la Poza N°6, se seleccionó las bombas tipo turbina vertical, que presentan mayores eficiencias con referente a

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

otros tipos de sistema de bombeo, las cuales representan una mayor eficiencia para los 20 años de operación del desaguado del Tajo Chalcobamba. Para este se consideró que las concentraciones de sólidos se encuentran por debajo de los 1000 ppm y diámetros de partículas de 0.075.

- Para los sistemas gravitatorios que inician en la Poza N°1, Poza N°2, Poza N°3, Poza N°4 y Poza N°5 con descarga en la Poza N°6, se determinó que los porcentajes de llenado de las tuberías en algunos casos son menores a 30% debido a la variabilidad de los flujos de acuerdo a las estaciones indicados en la tabla 12. Por esta variabilidad de flujos, se evaluaron tirantes de las tuberías para cada caso, considerando las velocidades y número de Froude (min. 1.4) de menor impacto para cubrir el rango de caudales en las tuberías, estas se pueden verificar en las siguientes tablas:

- Tabla 14, tabla 15 para la Poza N°1.
- Tabla 17 y tabla 18 para la Poza N°2.
- Tabla 20 y tabla 21 para la Poza N°3.
- Tabla 23 y tabla 24 para la Poza N°4.
- Tabla 26 y tabla 27 para la Poza N°5.

Recomendaciones

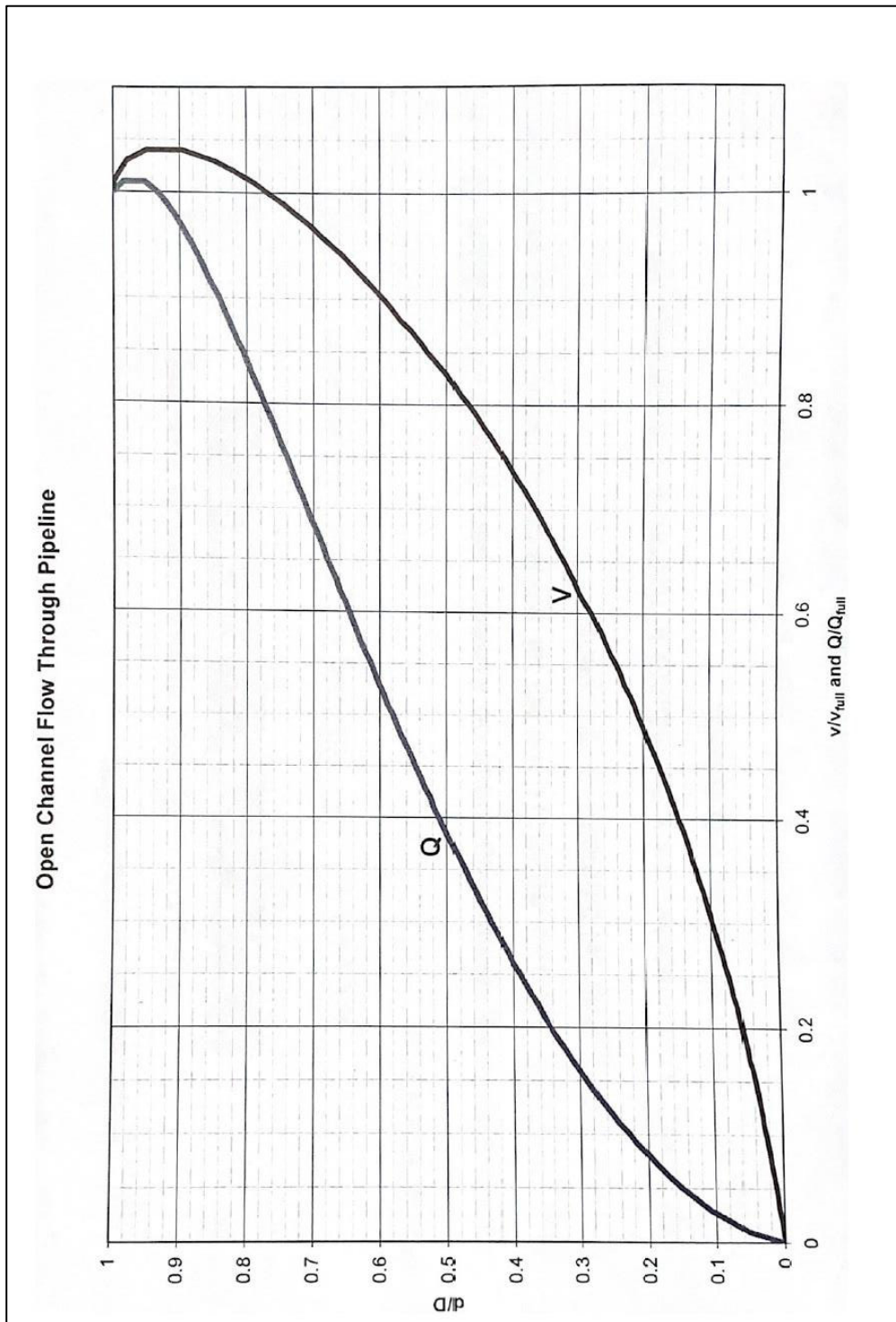
- Es recomendable para evitar cavitación en la tubería de succión considerar una altura de 0.80 m entre el eje de la bomba y el nivel de agua (altura de sumergencia) en la poza 06. Adicional a ello considerar 1 metro de pérdidas primarias para la tubería de succión. Ya que se recomienda un 10% de la longitud de la tubería, en nuestro caso la tubería de impulsión tiene una longitud de 10m.
- 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. Es decir $\frac{NPSH_A}{NPSH_r} = \frac{6.073 \text{ m}}{3.18 \text{ m}} = 1.91$ es mayor que 1.10. Estamos dentro del criterio.
- Es recomendable, tomar como caudal de diseño el caudal máximo expresado en la tabla 11 correspondiente a la Poza N°6 de $728 \text{ [m}^3/\text{h]}$ para los cálculos del sistema de tubería de impulsión.
- Para hallar el factor de fricción f implícito en la ecuación de Colebrooke-White utilizar el método iterativo dando valores para la convergencia del valor de f soportado en una hoja de cálculo Excel. El valor de f es muy sensible para longitudes largas, tratar de que la convergencia sea lo más cercano a cero.

Bibliografía

1. Fundamentals. (2017). ASHRAE Handbook Series.
2. Claudio Mataix (1986). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, segunda edición.
3. Robert L. Mott (1996). Mecánica de Fluidos aplicada 4ta edición.
4. Frank M. White (2003). Mecánica de fluidos 5ta edición.
5. Hidráulica de canales abiertos (1994). Ven Te Chow (1994).
6. E. Idelchik (2005). Handbook of hydraulic resistance, 4th revised and augmented edition.
7. Plastic Pipe Institute. (2014). Handbook of PE Pipe, 2nd Edition.
8. Documento “Technical Specification for General Site Conditions”. Las Bambas Project, febrero 2013.
9. Documento “Design Criteria for Piping”. Las Bambas Project, octubre 2013 – Perú.
10. Documento “Design Criteria for Water Pipelines”. Las Bambas Project, mayo 2011 – Perú.
11. Crane (2010). Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipes. Technical Paper No. 410 - Metric Edition.
12. Colebrook, C. F., White, C. M. (1937). Experiments with Fluid Friction in Roughened Pipes. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 161 (906). (pp. 367-381).

Anexos.

Anexo 1: Diagrama de flujo en canal abierto.



Nota: Adaptado de Ven Te Chow (1994). Hidráulica de canales abiertos.

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Anexo 2: Relación de estándares y dimensiones (SDR).

Based on Mean Diameter (D_m/t) (Same numerical value as ANSI Preferred Number, Series 10)	Based on Outside Diameter SDR = (D_o/t (Series 10 Number + 1))	Based on Inside Diameter SDR = (D_i/t (Series 10 Number - 1))
5.0	6.0	4.0
6.3	7.3	5.3
8.0	9.0	7.0
10.0	11.0	9.0
12.5	13.5	11.5
16.0	17.0	15.0
20.0	21.0	19.0
25.0	26.0	24.0
31.5	32.5	30.5
40.0	41.0	39.0
50.0	51.0	49.0
63.0	64.0	62.0

Nota: Adaptado de Plastic Pipe Institute (2014). Standard Specifications, Standard Test Methods and Codes for PE (Polyethylene) Piping Systems

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

Anexo 3: Espesores mínimos para tubería HDPE.

Nominal Metric Pipe Size (OD)	Dimension Ratio									
	32.5†	26.0†	21.0†	17.0†	15.5	13.5†	11.0†	9.3	9.0†	7.3†
110	3.4	4.2	5.2	6.5	7.1	8.1	10.0	11.8	12.2	15.1
160	4.9	6.2	7.6	9.4	10.3	11.9	14.5	17.2	17.8	21.9
200	6.2	7.7	9.5	11.8	12.9	14.8	18.2	21.5	22.2	27.4
250	7.7	9.6	11.9	14.7	16.1	18.5	22.7	26.9	27.8	34.2
280	8.6	10.8	13.3	16.5	18.1	20.7	25.5	30.1	31.1	38.4
315	9.7	12.1	15.0	18.5	20.3	23.3	28.6	33.9	35.0	43.2
355	10.9	13.7	16.9	20.9	22.9	26.3	32.3	38.2	39.4	48.6
400	12.3	15.4	19.0	23.5	25.8	29.6	36.4	43.0	44.4	54.8
450	13.8	17.3	21.4	26.5	29.0	33.3	40.9	48.4	50.0	61.6
500	15.4	19.2	23.8	29.4	32.3	37.0	45.5	53.8	55.6	68.5
560	17.2	21.5	26.7	32.9	36.1	41.5	50.9	60.2	62.2	76.7‡
630	19.4	24.2	30.0	37.1	40.6	46.7	57.3	67.7	70.0	86.3
710	21.8	27.7	33.8	41.8	45.8	52.6	64.5	76.3‡	78.9‡	97.3
800	24.6	30.8	38.1	47.1	51.6	59.3	72.7	86.0	88.9	109.6
900	27.7	34.6	42.9	52.9	58.1	66.7	81.8‡	96.8	100.0	123.3
1,000	30.8	38.5	47.6	58.8	64.5	74.1	90.9	107.5	111.1	137.0
1,200	36.9	46.2	56.1	70.6	77.4‡	88.9‡	109.1	129.0	133.3	164.4
1,400	43.1	53.8	66.7	82.4‡	90.3	103.7	127.3	150.5	155.6	191.8
1,600	49.2	61.5	76.2‡	94.1	103.2	118.5	145.5	172.0	177.8	219.2

Nota: Adaptado de American Water Works Association (2007).

CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DESAGUADO DEL TAJO CHALCOBAMBA

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		
Hormigón	Liso	0,00013	0,04	±60	
	Rugoso	0,007	2,0	±50	
Caucho	Liso	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*.