

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE



Diseño y construcción de banco de ensayo para
demostración de fenómenos de sedimentación de
partículas en tubería

Christian Andrés Mora Tobar

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO

Profesor Guía: Dr. -Ing. Miriam Roth Kliem
Profesor Correferente: PhD. Rodrigo Cassineli

Mayo 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Diseño y construcción de banco de ensayo para demostración de fenómenos de sedimentación de partículas en tubería

Nombre del candidato(a): Christian Andrés Mora Tobar

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: Santiago San Joaquín; Departamento: DIMEC

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Miriam Roth, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 07/07/2025

; Firma: Miriam Roth

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 07/07/2025

; Firma: [Firma]

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

A mi padre Luis, mi madre Inés y mi hermano Luis Alejandro, por el esfuerzo constante y silencioso que realizaron para brindarme todo lo necesario y permitirme estudiar en una universidad tan prestigiosa como la que me formó.

A mi mami Eliana que siempre estuvo presente en mi proceso de estudiante dándome apoyo y amor incondicional.

A mi pareja Katherine cuya ayuda fue fundamental en las largas noches de estudio en donde estuvo presente en la mayoría de mi etapa universitaria.

A mis amigos de la Universidad que fueron un pilar fundamental en todos estos años.

Resumen

El presente trabajo de memoria de titulación tiene como finalidad el diseño y construcción de un banco de ensayo experimental y modular orientado al estudio del transporte de partículas en suspensión, abordando fenómenos hidráulicos como la sedimentación, la recirculación y el transporte suspendido en condiciones controladas. El sistema desarrollado permite modificar parámetros operativos tales como la velocidad del flujo, la inclinación de las tuberías y la configuración de válvulas, incorporando tubería transparente y secciones con ángulos ajustables para facilitar distintas configuraciones geométricas. Con el fin de comparar la velocidad teórica de sedimentación con los valores observados experimentalmente, se realizaron ensayos bajo diversas combinaciones de configuración e inclinación, utilizando partículas de 2,2 mm, 3,0 mm y 3,7 mm de diámetro, con una gravedad específica de 2,65 y una concentración de sólidos en peso del 3,91 %. Como parte del análisis, se elaboró una tabla de clasificación del tipo de transporte observado en cada tramo, definiéndose cuatro categorías principales: clasificación 1, como flujo con lecho móvil; clasificación 2, correspondiente a un flujo con lecho estacionario; clasificación 3, asociada a un flujo con dunas en forma de montículos; y clasificación 4, cuando se alcanza un transporte en suspensión, indicando un régimen de flujo altamente eficiente. Los resultados indican que la tubería abatible B alcanzó un transporte continuo en rangos de velocidad entre 2,60 y 2,74 m/s, mientras que la abatible A lo logró solo al final del ensayo, y la tubería horizontal DN50 no presentó un desempeño adecuado. En configuraciones de derivación parcial, las tuberías abatibles evidenciaron transporte sin sedimentación entre 0,96 y 1,0 m/s, en concordancia con los valores teóricos estimados. Asimismo, el ensayo de inclinación variable reveló que ángulos entre 45° y 60° incrementan los efectos de sedimentación y recirculación, y el ensayo de aireación demostró que la presencia de burbujas disminuye significativamente la eficiencia del arrastre.

Abstract

The present thesis project aims to design and construct a modular experimental test bench for the study of suspended particle transport, addressing hydraulic phenomena such as sedimentation, recirculation, and suspended transport under controlled conditions. The developed system allows for the modification of operational parameters such as flow velocity, pipe inclination, and valve configuration, incorporating transparent piping and sections with adjustable angles to facilitate a wide range of geometric configurations. In order to compare the theoretical sedimentation velocity with experimentally observed values, tests were conducted under various combinations of pipe configurations and inclinations, using particles of 2.2 mm, 3.0 mm, and 3.7 mm in diameter, with a specific gravity of 2.65 and a solid concentration by weight of 3.91%. As part of the analysis, a classification table was developed to categorize the type of transport observed in each section, defining four main categories: Class 1, corresponding to flow with mobile bed; Class 2, to stationary bed flow; Class 3, to flow with dune formations in the shape of mounds; and Class 4, representing suspended transport, indicating a highly efficient flow regime. The results show that the tilting pipe B achieved continuous transport within velocity ranges of 2.60 to 2.74 m/s, while pipe A reached this condition only at the end of the test, and the horizontal DN50 pipe did not achieve an adequate transport regime. In partial bypass configurations, the tilting pipes exhibited sedimentation-free transport between 0.96 and 1.0 m/s, in agreement with theoretical estimates. Additionally, the variable inclination test revealed that angles between 45° and 60° increase sedimentation and recirculation effects, and the aeration test demonstrated that the presence of bubbles significantly reduces transport efficiency.

Índice

Agradecimientos	2
Resumen.....	3
Abstract	4
Índice de imágenes	3
1. Introducción.....	5
1.1 Motivación	6
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo principal.....	7
1.2.2 Objetivos específicos.....	7
2. Estado del arte	8
2.1 Investigaciones actuales.....	8
2.1.1 Pérdidas de carga en el transporte de pulpa	8
2.1.2 Rendimiento de bombas de pulpa.....	12
2.1.3 Transporte de pulpa con diferentes tecnologías.....	16
3. Marco Teórico.....	21
3.1 Parámetros de la pulpa.....	21
3.1.1 Concentración de sólidos en peso	21
3.1.2 Concentración de sólido en volumen.....	22
3.1.3 Densidad de la pulpa.....	23
3.1.4 Factor límite FL	23
3.1.5 Velocidad de sedimentación	25
3.2 Tipos de flujos en el transporte de pulpa.....	27
3.2.1 Flujo homogéneo	27
3.2.2 Flujo heterogéneo	28
3.2.3 Flujo con dunas.....	28
3.2.4 Flujo con ondas o lecho estacionario.....	29
3.2.5 Flujo con lecho móvil	29
3.3 Altura del sistema	31
3.3.1 Velocidad del flujo	31
3.3.2 Número de Reynolds	31
3.3.3 Altura del sistema	33
3.3.4 Ecuación de Darcy – Weisbach	34
3.3.5 Factor de fricción de Colebrook – White.....	34
3.3.6 Pérdidas por singularidad	36
3.3.7 Leyes de afinidad.....	37
4. Desarrollo.....	39
4.1 Parámetros de diseño.....	39
4.1.1 Propiedades de la pulpa	39
4.1.2 Dimensiones del sistema	40
4.1.3 Selección de equipos	40
4.2 Diseño en software	41
4.2.1 Sistema de tuberías	41
4.2.2 Mesa abatible.....	43
4.2.3 Soporte tubería abatible	44
4.2.4 Silo de acrílico	45
4.2.5 Soporte de silo	46

4.2.6	Soporte de bomba	47
4.2.7	Soporte de válvula y descarga	48
4.3	Memoria de cálculo.....	49
4.3.1	Análisis de cargas estructurales	49
4.3.2	Parámetros iniciales para el calculo	54
4.3.3	Velocidad de sedimentación	55
4.3.4	Altura del sistema	63
4.3.5	Selección de bomba	66
4.4	Presupuesto	70
4.4.1	Lista de materiales	71
4.4.2	Fabricación	75
4.5	Armado	81
5.	<i>Mediciones experimentales</i>	<i>83</i>
5.1	Instrumentos de medición del banco de pruebas.....	83
5.2	Condiciones de operación antes de puesta en marcha.....	86
5.3	Plan de medición	87
5.3.1	Tabla de puntuación de sedimentación	87
5.3.2	Ensayo de circuito completo.....	88
5.3.3	Ensayo con derivación parcial	91
5.3.4	Ensayo con inclinación variable a diferentes caudales	92
5.3.5	Ensayo demostrativo de aireación	94
5.4	Resultados y análisis	95
5.4.1	Circuito completo	95
5.4.2	Derivación parcial.....	102
5.4.3	Inclinación variable a diferentes caudales	108
5.4.4	Fenómeno de aireación	126
5.5	Análisis teóricos de las mediciones experimentales	127
6.	<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	<i>130</i>
	<i>Bibliografía</i>	<i>136</i>
	<i>Anexo</i>	<i>138</i>
Anexo A	Planos de fabricación	138
Anexo B	Diagrama de fuerza y comando	146
Anexo C	Compra de materiales.....	148
Anexo D	Código de programación	155

Índice de imágenes

Imagen 2.1: Efecto de concentración de masa en la pérdida de presión (Xu, y otros, 2024).	9
Imagen 2.2: Efecto de velocidad de flujo sobre la pérdida de presión (Xu, y otros, 2024).	10
Imagen 2.3: Resultados de resistencia hidráulica (Bournaski, Berman, & Kril, 2017).	11
Imagen 2.4: Parámetros vs concentración (Duan, Lin, Chen, & Li, 2024).	13
Imagen 2.5: Tasa de erosión en la voluta (Duan, Lin, Chen, & Li, 2024).	13
Imagen 2.6: Banco de ensayo para bomba de pulpa (El-Agouz, Mohamed, & Nossir, 2020).	14
Imagen 2.7: Curva de eficiencia de la bomba (El-Agouz, Mohamed, & Nossir, 2020).	15
Imagen 2.8: Tubería en espiral	16
Imagen 2.9: Esquema de vibración (Zhang, Chen, Li, Wang, & Yu., 2023).	17
Imagen 2.10: Pérdida de carga en función de frecuencia de vibración (Zhang, Chen, Li, Wang, & Yu., 2023).	18
Imagen 2.11: Pérdida de carga en función de la concentración en volumen (Zhang, Chen, Li, Wang, & Yu., 2023).	19
Imagen 2.12: Pérdida de carga en función de la relación de velocidades (Zhang, Chen, Li, Wang, & Yu., 2023).	20
Imagen 3.1: Gráfico de Mc Elvain & Cave (Bouso & Martinez, 2023)	24
Imagen 3.2: Patrones de flujo en pulpa para tuberías horizontales (Banderas, 2016)	30
Imagen 4.1: Análisis de carga mesa abatible	50
Imagen 4.2: Modelación de desplazamiento para soporte de silo	51
Imagen 4.3: Modelación de desplazamiento para soporte de tubería abatible	52
Imagen 4.4: Modelación de desplazamiento para soporte de bomba	53
Imagen 4.5: Modelación de desplazamiento para soporte de válvula y descarga	54
Imagen 4.6: Mesa abatible	75
Imagen 4.7: Soporte silo con silo de acrílico	76
Imagen 4.8: Soporte vertical de válvula	77
Imagen 4.9: Estructura tubería abatible	78
Imagen 4.10: Estructura soporte de bomba	79
Imagen 4.11: Silo de acrílico	80
Imagen 4.12: Armado previo del banco de ensayo	81
Imagen 4.13: Banco de ensayo Clear loop	82
Imagen 5.1: Flujómetro electromagnético DN40 Delind	83
Imagen 5.2: Goniómetro	84
Imagen 5.3: Manómetro de 10 bar (EDR, s.f.)	84
Imagen 5.4: Variador de frecuencia Pumpdrive 2 Eco	85
Imagen 5.5: Disposición banco de ensayo	86
Imagen 5.6: Nivel de agua en silo	86
Imagen 5.7: Tubería horizontal DN50 y DN40	95
Imagen 5.8: Tubería abatible A y B	95
Imagen 5.9: Resultados medición circuito completo	100
Imagen 5.10: Resultados derivación parcial	105
Imagen 5.11: Generación de burbujas en silo y tubería	126
Imagen 5.12: Resultados tuberías abatibles	127
Imagen 6.1: Soporte de válvula y descarga	138
Imagen 6.2: Soporte de bomba	139
Imagen 6.3: Silo acrílico	139
Imagen 6.4: Perfil de soporte	140
Imagen 6.5: Mesa	140
Imagen 6.6: Soporte silo	141
Imagen 6.7: Sistema de tuberías	141
Imagen 6.8: Medidas generales del banco	142
Imagen 6.9: Ensamble del banco	142
Imagen 6.10: Caja protección	143
Imagen 6.11: Soporte tubería abatible	143
Imagen 6.12: Manivela polea superior	144

Imagen 6.13: Perfil cuadrado	144
Imagen 6.14: Polea inferior	145
Imagen 6.15: Rueda canal angular	145
Imagen 6.16: Seguro polea inferior	146
Imagen 6.17: Diagrama de disposición	146
Imagen 6.18: Diagrama de fuerza VDF.....	147
Imagen 6.19: Diagrama de fuerza flujómetro	147
Imagen 6.20: Diagrama de disposición en tablero.....	148
Imagen 6.21: Tubería de acrílico 40 mm y 50mm (Norglas, s.f.).....	148
Imagen 6.22: Codo 90° de acrílico de 50mm	149
Imagen 6. 23: Partículas de ensayo	149
Imagen 6.24: Codo 45° de 40mm.....	149
Imagen 6.25: Unión Tee de acrílico	150
Imagen 6.26: Unión americana de 50mm.....	150
Imagen 6.27: Buje de reducción de 50 a 40mm	150
Imagen 6.28: Unión giratoria de 50 mm.....	151
Imagen 6.29: Terminal PVC de 50mm x 2'	151
Imagen 6.30: Terminal PVC de 50mm x 1 ½'	151
Imagen 6.31: Terminal PVC de 40mm x 1 ¼'	152
Imagen 6.32: Brida PVC con manguita volante de 50mm	152
Imagen 6.33: Bomba Pedrollo NGA 1A	153
Imagen 6.34: Fuente de poder Autonics.....	153
Imagen 6.35: Interruptor automático Schneider (Schneider, s.f.).....	154
Imagen 6.36: Guardamotor Schneider	154

1. Introducción

En la industria minera, para transportar sólidos existen diferentes medios como correas transportadoras, sopladores o bombeo de pulpas. El bombeo de pulpa o transporte de sólidos en suspensión en tuberías es una técnica ampliamente utilizada debido a su eficiencia a la hora de transportar grandes volúmenes de material de manera continua y controlada. Sin embargo, presenta desafíos significativos, como la abrasión en tuberías y el riesgo de obstrucciones. Estos problemas están directamente relacionados con el diseño de los sistemas que generalmente son provocados por la poca consideración de la sedimentación de partículas, la cual debe mantenerse al mínimo para reducir el desgaste y prolongar la vida útil de las tuberías.

Un flujo de pulpa por tuberías varía según sus características, como la densidad y la granulometría, dependiendo de si se trata de mineral molido, relaves, ripios o concentrados. La diferencia principal es la densidad de la pulpa, la que afecta directamente a la gravedad específica. Entender estos aspectos no solo permite optimizar el diseño de los sistemas de transporte, sino también identificar nuevas oportunidades para desarrollar equipos eficientes, tecnológicamente más avanzados y adaptados a condiciones específicas, como el manejo de pulpas de alta densidad. Esto, a su vez, permite aumentar la competitividad de las empresas y reducir los costos operativos mediante una mejor gestión de los materiales transportados.

Este trabajo nace de la preocupación de una empresa de bombas y válvulas (KSB) con el propósito de diseñar un banco de ensayo que permita mostrar y estudiar los fenómenos de sedimentación de partículas en condiciones controladas, utilizando tuberías transparentes con ángulos de inclinación ajustables para observar el comportamiento del flujo. Este banco servirá como una herramienta educativa y experimental que no solo facilitará la comprensión de los fenómenos, sino que además servirá para la validación de algunos cálculos teóricos. Igualmente fomentará nuevas alianzas entre la empresa KSB y sus clientes, consolidando su liderazgo en innovación tecnológica dentro del sector.

1.1 Motivación

El transporte de pulpa en procesos industriales, como los utilizados en minería y procesamiento de minerales, representa un desafío técnico considerable debido a los fenómenos complejos involucrados, como la sedimentación de partículas y el desgaste de los equipos de transporte. En este contexto, la necesidad de comprender mejor estos fenómenos ha impulsado el desarrollo de un banco de ensayo capaz de simular las condiciones reales de transporte de pulpa. Este proyecto tiene como objetivo proporcionar una herramienta experimental que permita analizar y optimizar los procesos relacionados.

Este proyecto fue requerido específicamente por la empresa KSB, líder en la fabricación de bombas y soluciones de transporte de fluidos industriales. KSB busca profundizar su comprensión de los fenómenos asociados al transporte de pulpa para poder adaptarlos a las necesidades de sus clientes. El banco de ensayo es un recurso clave para estudiar los efectos de parámetros como la concentración de sólidos, la velocidad de flujo, la sedimentación de las partículas y la granulometría, permitiendo así el desarrollo de soluciones más robustas y adaptadas a diferentes condiciones operativas.

Además, el banco de ensayo facilita el estudio detallado de la sedimentación de partículas, un fenómeno crítico que afecta directamente la eficiencia y la vida útil de los equipos de transporte. Comprender cómo se comportan las partículas en suspensión y cómo interactúan con los sistemas de bombeo permite optimizar tanto el diseño de los equipos como los procesos asociados. Este proyecto no solo fortalece la posición de KSB en el mercado, sino que también contribuye al avance del conocimiento técnico en el campo del transporte de pulpa, generando beneficios tanto para la industria como para la academia.

Este proyecto permite explicar y demostrar estos fenómenos en distintos escenarios, como ferias de tecnología, universidades y visitas a instalaciones mineras. También puede utilizarse para capacitar al personal y ayudarles a comprender cómo estos fenómenos se manifiestan en la operación real.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

- Diseñar un banco de ensayo móvil y transportable para demostrar y analizar los fenómenos que se presentan en el transporte de pulpa en la minería.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudiar fenómenos de flujo a analizar y definir parámetros de operación
- Realizar un diseño de un sistema de tuberías para un banco de ensayo utilizando el software Autodesk Inventor.
- Diseñar estructuras de soporte para el banco de ensayo
- Determinar a través de cálculos teóricos los parámetros hidráulicos y mecánicos necesarios para luego seleccionar una bomba adecuada para el sistema.
- Fabricar e implementar el banco de ensayo diseñado en Autodesk Inventor, asegurando que permita un análisis efectivo de la sedimentación de partículas.
- Diseñar plan detallado de medición, especificando los instrumentos y metodologías necesarias para analizar la sedimentación de partículas.

2. Estado del arte

En la actualidad existen diversos desarrollos para estudiar los fenómenos de transporte de pulpa en tuberías y otros factores importantes el proceso. Algunos de ellos se comentan en el presente capítulo. Así mismo, se comentan las normas en las cuales se debe basar el desarrollo del banco de ensayo.

2.1 Investigaciones actuales

Existen diversas investigaciones actuales relacionadas con el transporte de pulpa en la industria minera. Estos estudios abordan temas clave como la optimización de las tuberías, la mejora del desempeño de las bombas de pulpa y la reducción de pérdidas de presión en los sistemas de tuberías. Mediante enfoques experimentales y simulaciones, estas investigaciones ofrecen soluciones innovadoras para enfrentar los desafíos asociados a la sedimentación de partículas, el desgaste de los equipos y la eficiencia del transporte.

2.1.1 Pérdidas de carga en el transporte de pulpa

A continuación, se presentan investigaciones actuales relacionadas con el transporte de pulpa, un proceso clave en la industria minera. Estos estudios se centran en analizar y optimizar aspectos críticos como las pérdidas de presión, la sedimentación de partículas y la eficiencia del flujo en sistemas de transporte. Utilizando enfoques experimentales y herramientas avanzadas como simulaciones computacionales, estas investigaciones buscan mejorar el diseño y funcionamiento de tuberías, bombas y otros componentes.

El estudio experimental de las leyes de pérdida de presión de tuberías con pulpa de gran tamaño durante el proceso de transporte (Xu, y otros, 2024), identifica las condiciones óptimas para minimizar las pérdidas de presión y optimizar el transporte de residuos. En los experimentos, se analizó el impacto de la concentración en masa y la velocidad del flujo en las pérdidas de presión en la tubería.

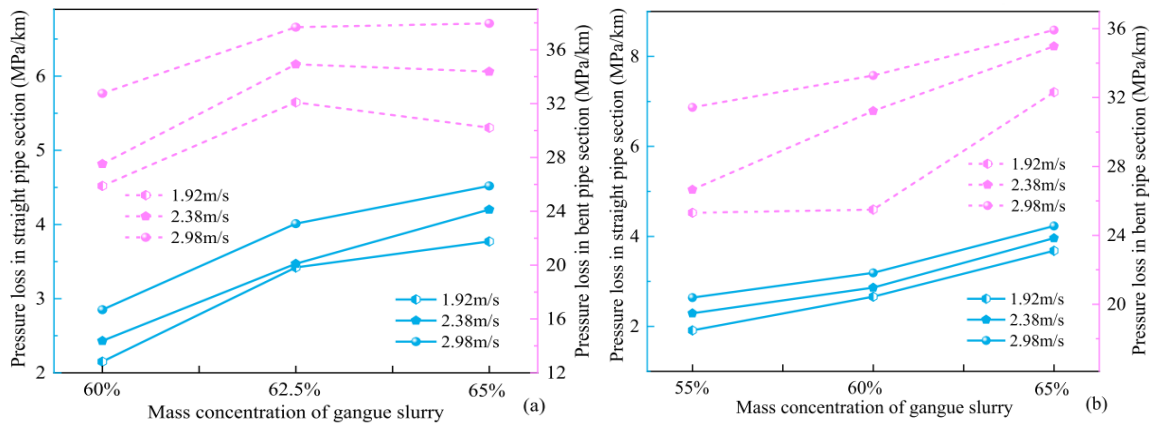


Imagen 2.1: Efecto de concentración de masa en la pérdida de presión (Xu, y otros, 2024).

La Imagen 2.1 representa el efecto de la concentración de masa en la pérdida de presión de la pulpa durante el transporte por tubería: (a) pulpa de 0 a 5 mm (b) pulpa de 0 a 2 mm.

El estudio del impacto de la concentración en masa de la pulpa muestra cómo la concentración de masa de pulpa influye en la pérdida de presión tanto en tramos rectos como curvos de tuberías. Se analizaron dos rangos de tamaño de partícula: entre 0–5 mm y 0–2 mm, a diferentes velocidades de flujo (1.92 m/s, 2.38 m/s y 2.98 m/s).

En el caso de partículas de 0–5 mm, la pérdida de presión en tramos rectos aumenta progresivamente con la concentración. En tramos curvos, la pérdida también crece, pero alcanza un máximo a 62.5% y luego disminuye ligeramente a 65%, lo que sugiere que esta última concentración es más favorable.

Para partículas de 0–2 mm, la pérdida de presión sigue aumentando tanto en tramos rectos como curvos al incrementar la concentración. Por lo que se recomienda mantenerla en 60% para evitar aumentos excesivos en la pérdida de carga.

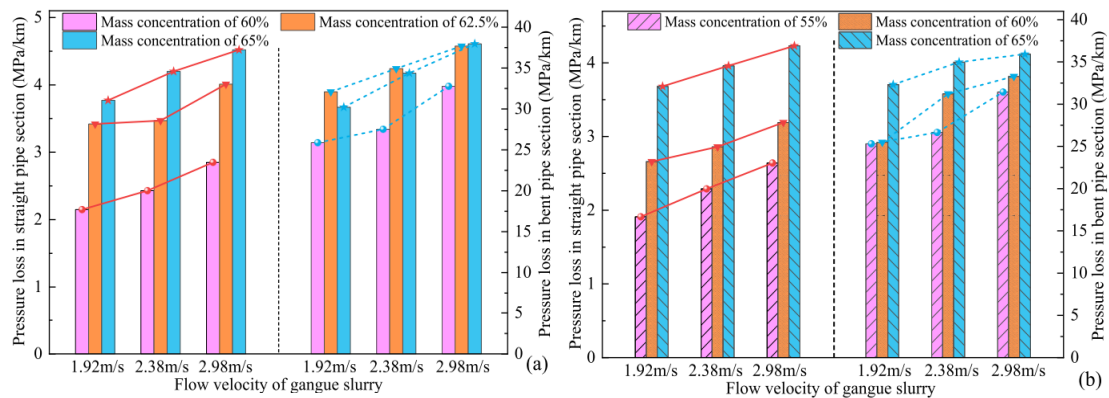


Imagen 2.2: Efecto de velocidad de flujo sobre la pérdida de presión (Xu, y otros, 2024).

La Imagen 2.2 presenta el efecto de la velocidad de flujo sobre la pérdida de presión en la tubería con pulpa: (a) pulpa de 0 a 5 mm, (b) pulpa de 0 a 2 mm. El cual muestra cómo influye la velocidad de flujo en la pérdida de presión de pulpa de ganga con diferentes tamaños de partícula (0–5 mm y 0–2 mm) y concentraciones de masa. Se observa que al aumentar la velocidad del flujo, la pérdida de presión en tramos rectos y curvos de la tubería también aumenta, debido al incremento en la fricción interna y con las paredes del conducto. Esto implica una mayor resistencia al transporte y, por lo tanto, una mayor demanda energética.

En los tramos rectos, la relación entre presión y velocidad es más lineal y uniforme en el caso de la pulpa con partículas de 0–2 mm, a una concentración de masa del 60%, la pérdida de presión pasa de 1.91 MPa/km a 2.64 MPa/km al aumentar la velocidad de 1.92 m/s a 2.98 m/s, lo que representa un aumento del 38.22%. En cambio, para partículas de 0–5 mm, en ese mismo rango de velocidad, la pérdida aumenta de 2.15 MPa/km a 2.85 MPa/km, un 32.56% más.

En los tramos curvos, el comportamiento depende más de la concentración. Para la pulpa de 0–5 mm, cuando la concentración es de 62.5% o 65%, la relación con la velocidad es casi lineal. Sin embargo, con una concentración del 60%, el aumento no es uniforme: entre 1.92 m/s y 2.38 m/s la presión crece solo un 6.34 %, pero entre 2.38 m/s y 2.98 m/s sube un 19.04%. En el caso con partículas de 0–2 mm, la presión en tramos curvos también aumenta

constantemente con la velocidad. Por ejemplo, a 62.5%, sube de 25.49 MPa/km a 33.28 MPa/km entre 1.92 m/s y 2.98 m/s, con incrementos del 22.48% y 6.60%, respectivamente. El estudio concluye que, bajo distintas combinaciones de tamaño de partícula y concentración de masa, la pérdida de presión se incrementa significativamente con la velocidad. Por ello, se recomienda mantener la velocidad lo más baja posible, siempre por sobre la velocidad crítica para evitar sedimentación, con el fin de reducir el desgaste de tuberías y el consumo energético, asegurando un transporte eficiente y estable de la pulpa.

Por otro lado, un estudio realizado por Bournaski (Bournaski, Berman, & Kril, 2017) analiza los resultados experimentales y teóricos del transporte de pulpa por tuberías en la industria minera de Bulgaria, el cual, se destaca la importancia histórica de la minería en las montañas Ródope, que ha sido un pilar económico desde tiempos prehistóricos y romanos. Actualmente, operan cuatro plantas de enriquecimiento de minerales en la región, una de estas es Assarel-Medet, la más grande a cielo abierto en Los Balcanes, donde utilizan transporte hidráulico para manejar los residuos mineros. Los autores subrayan la necesidad de optimizar los sistemas de transporte hidráulico para satisfacer la creciente demanda de la actual industria minera.

En esta investigación se realizaron experimentos en laboratorio para medir las pérdidas hidráulicas en tuberías horizontales que transportan concentrado de pirita. Los parámetros son la densidad del sólido $\rho_s = 4400 \text{ kg/m}^3$, el diámetro promedio de las partículas $d_s = 0,0483 \text{ mm}$, distribución del tamaño de partículas en un 50% bajo los 0,0275 mm (d_{50}) y en un 85% bajo los 0,06 mm (d_{85}) diámetros de partícula.

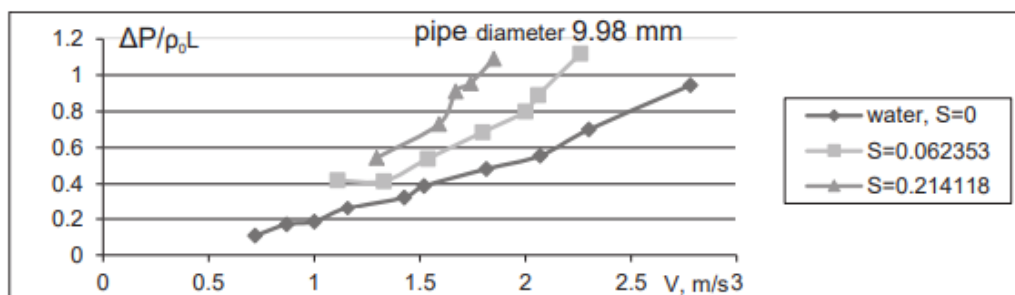


Imagen 2.3: Resultados de resistencia hidráulica (Bournaski, Berman, & Kril, 2017).

Donde S representa la concentración volumétrica promedio de sólidos en la mezcla. Los resultados obtenidos para una tubería de 9,98 mm de diámetro demuestran que propiedades como la densidad del concentrado y la distribución del tamaño de partículas influyen de manera significativa en la resistencia hidráulica del sistema, reflejada en el aumento del gradiente de presión. Este comportamiento confirma que, a mayor concentración de sólidos, mayor será la resistencia al flujo. Por ejemplo, al comparar el caso del agua pura ($S = 0$) con una mezcla que contiene un 21.4 % de sólidos en volumen ($S = 0.214118$), se observa un incremento notable en la pérdida de presión adimensional para una misma velocidad de flujo, lo que evidencia la necesidad de un mayor requerimiento energético para mantener el transporte bajo condiciones más concentradas.

2.1.2 Rendimiento de bombas de pulpa

A continuación se muestran los estudios realizados por diferentes universidades con el fin de investigar cómo afecta el transporte de pulpas en la eficiencia de la bomba.

El estudio de revisión del rendimiento hidráulico y las características de desgaste por erosión de la bomba centrífuga para lodos estudio (Duan, Lin, Chen, & Li, 2024) muestra los avances que se han realizado en investigación sobre cómo las partículas en suspensión afectan a las bombas de pulpa, combinando experimentos físicos y simulaciones numéricas los efectos estudiados son el rendimiento hidráulico y las características de desgaste (erosión).

Para analizar el impacto de las partículas, se llevaron a cabo experimentos visuales como fotografía de alta velocidad (HSI) y velocimetría por imágenes de partículas (PIV), que permitieron observar el movimiento y la velocidad de las partículas dentro de la bomba. Estas observaciones se complementaron con simulaciones CFD que replicaron el comportamiento del flujo sólido-líquido bajo diferentes condiciones. Estos métodos ayudaron a identificar áreas críticas de desgaste y probar modificaciones en el diseño de las bombas.

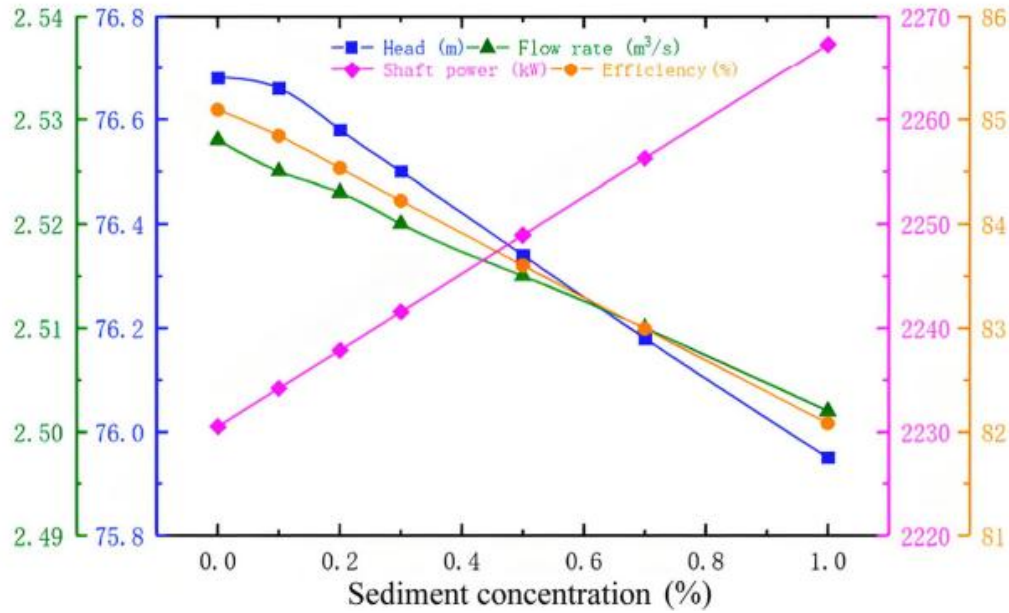


Imagen 2.4: Parámetros vs concentración (Duan, Lin, Chen, & Li, 2024)

En la Imagen 2.4 se muestra la variación del rendimiento hidráulico de una bomba centrífuga en función de la concentración de sedimentos. Se observa que al aumentar el contenido sólido (%), disminuyen la altura manométrica, el caudal y la eficiencia, mientras que la potencia al eje se incrementa, evidenciando un mayor requerimiento energético para mantener el funcionamiento.

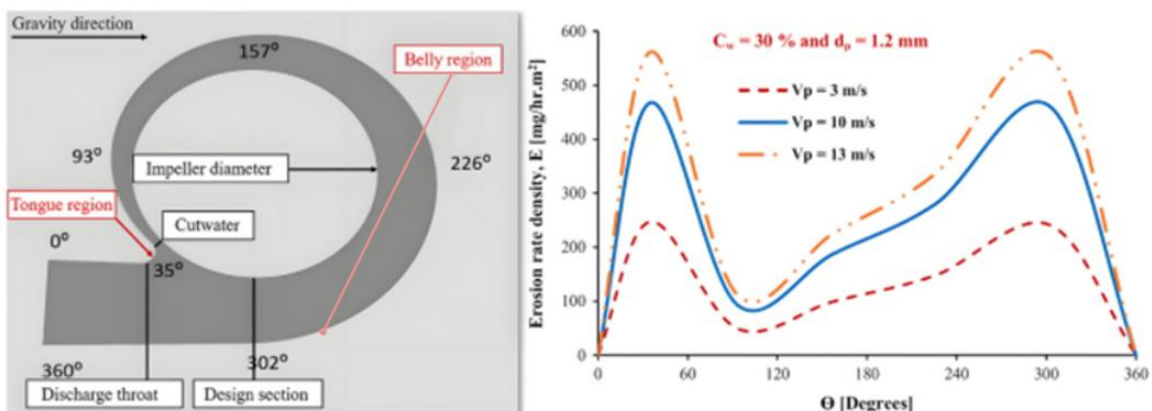


Imagen 2.5: Tasa de erosión en la voluta (Duan, Lin, Chen, & Li, 2024).

La Imagen 2.5 muestra la distribución del desgaste por erosión en la carcasa de voluta de una bomba centrífuga de pulpa, con énfasis en dos zonas críticas: de 0° a 60° y 280° a 310°.

El gráfico de la derecha representa la densidad de tasa de erosión (E) en función del ángulo de la voluta (0° a 360°), para tres velocidades de flujo: 3 m/s, 10 m/s y 13 m/s, con un porcentaje de concentración en masa del 30% y diámetro promedio de partícula de 1,3 mm. Se observa que, a mayor velocidad, la erosión es significativamente mayor, especialmente en los sectores de 0°–60° (tongue) y 180°–240° (belly). También se menciona que el desgaste en la carcasa de voluta es incluso mayor que en el impulsor, debido a la mayor concentración de energía y turbulencia en esa región, ya que el tipo de desgaste en el tongue predomina el impacto y deformación, mientras que en el belly predomina el corte por deslizamiento.

Una de las investigaciones recientes sobre el transporte de pulpas fue realizada en la Universidad de Tanta, Egipto (El-Agouz, Mohamed, & Nossir, 2020). Este estudio consistió en el desarrollo de una investigación experimental enfocada en el comportamiento de bombas de pulpa bajo diferentes condiciones de operación. Para ello, se utilizó un circuito cerrado de ensayo, cuyo diseño se presenta a continuación.



Imagen 2.6: Banco de ensayo para bomba de pulpa (El-Agouz, Mohamed, & Nossir, 2020).

Este diseño para experimentación contempla el motor y la bomba centrífuga, un variador de frecuencia de la bomba con el cual se puede ir variando la velocidad del flujo, tuberías de succión y descarga, un contenedor de la pulpa, válvulas de control y un motor que va dentro del contenedor con el fin de que no se sedimente los sólidos de la pulpa. Los parámetros utilizados para el experimento son: La variación de la velocidad del flujo, el tipo de tubería, el tipo de pulpa y la concentración de sólidos en esta, con esto se pudieron obtener datos de la eficiencia de la bomba en función del caudal y el tipo de pulpa.

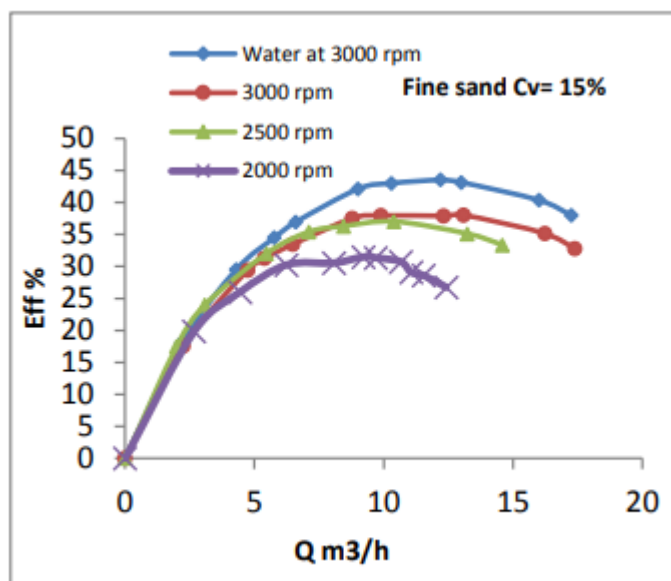


Imagen 2.7: Curva de eficiencia de la bomba (El-Agouz, Mohamed, & Nossir, 2020).

El gráfico de la Imagen 2.7 muestra que, al utilizar agua pura como fluido de trabajo y operar a 3000 rpm, la bomba alcanza su mayor eficiencia, con un valor cercano al 44 % a un caudal aproximado de 12 m³/h. Sin embargo, al incorporar una pulpa de arena fina con partículas de 250 μm y una concentración volumétrica del 15%, se observa que, aunque la eficiencia aumenta con la velocidad del flujo desde 2000 rpm, esta se mantiene aproximadamente un 10 % por debajo de la eficiencia obtenida con agua. Esta diferencia refleja el impacto que tiene la presencia de sólidos sobre el rendimiento hidráulico de la bomba.

De esto se puede determinar cuánto afecta la pulpa a la eficiencia del sistema y como esta se puede comparar con el diseño del banco de ensayo que se ira a diseñar para validar los resultados comparando ambos experimentos y proporcionar información útil en caso de que se requiera extrapolar los resultados a gráficos adimensionales.

2.1.3 Transporte de pulpa con diferentes tecnologías

En esta sección se describen las principales alternativas utilizadas para el transporte de pulpas, y las diferentes investigaciones realizadas para minimizar las pérdidas de cargas.

La Universidad de Ligh Industry, realizo un análisis de las características de transporte por tubería y método de optimización de los parámetros estructurales en el sistema de circulación de pulpa con estructura en espiral (Sun, y otros, 2024), el cual presentapresenta un estudio detallado sobre la aplicación de una estructura espiral en tuberías para mejorar el transporte de pulpas en sistemas de circulación de pulpa. La investigación establece un modelo numérico de acoplamiento sólido-fluido basado en la dinámica de fluidos computacional (CFD) y el método de elementos discretos (DEM), cuya validez se confirma mediante comparación con datos experimentales. A través de un método de optimización multiobjetivo utilizando el modelo de aproximación Kriging, se determinaron los parámetros estructurales óptimos para la tubería espiral, lo que resultó en un aumento del 19% en la velocidad de flujo de la pulpa y una reducción del 19% en la acumulación de piedras dentro de la tubería.

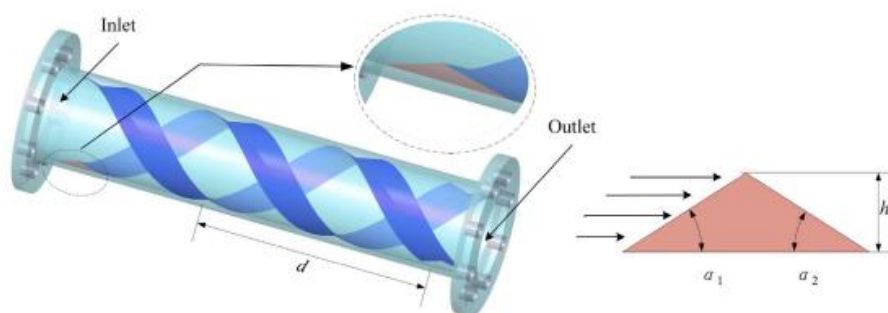


Imagen 2.8: Tubería en espiral

El estudio también destaca la importancia del ángulo frontal de la estructura espiral, que tuvo el mayor impacto en las características de transporte, seguido por el paso y la altura de la espiral. Además, se diseñó y utilizó un banco de pruebas para validar los resultados del modelo numérico, mostrando una alta consistencia con los datos experimentales. La investigación concluye que la implementación de una estructura espiral en tuberías de sistemas de circulación de escudos de lodo no solo mejora la capacidad de transporte y reduce la acumulación de partículas, sino que también proporciona una solución efectiva para los desafíos asociados con la construcción de túneles en condiciones geológicas complejas.

Otro estudio desarrollado por la Universidad Jiao Tong de Shanghai analizó la reducción de la resistencia hidráulica en el transporte de pulpa de grano fino altamente concentrada, mediante la aplicación de vibración mecánica como mecanismo de fluidización inducida (Zhang, Chen, Li, Wang, & Yu., 2023).

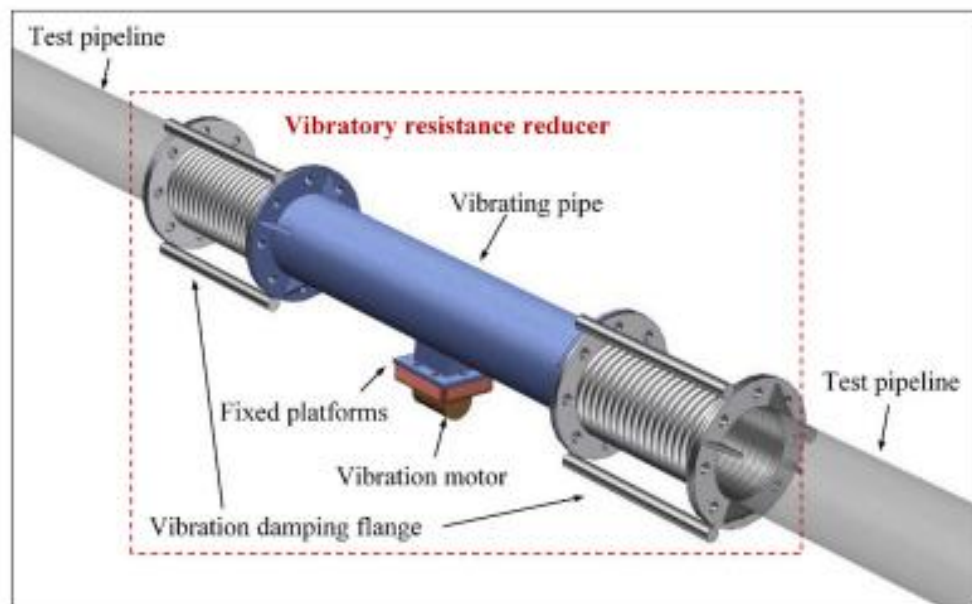


Imagen 2.9: Esquema de vibración (Zhang, Chen, Li, Wang, & Yu., 2023)

El estudio introduce un método innovador de reducción de resistencia al transporte de pulpas mediante la fluidización inducida por vibración, evaluando de forma cuantitativa los factores que influyen en esta mejora hidráulica. En particular, se estudió el efecto de la frecuencia de vibración aplicada, la concentración volumétrica de sólidos en la pulpa y la velocidad de

transporte, observándose que la acción vibratoria puede reducir significativamente la viscosidad aparente y las pérdidas de carga. Este enfoque propone una alternativa técnica para mejorar la eficiencia en el transporte de pulpas densas, especialmente en aplicaciones donde el riesgo de sedimentación es elevado

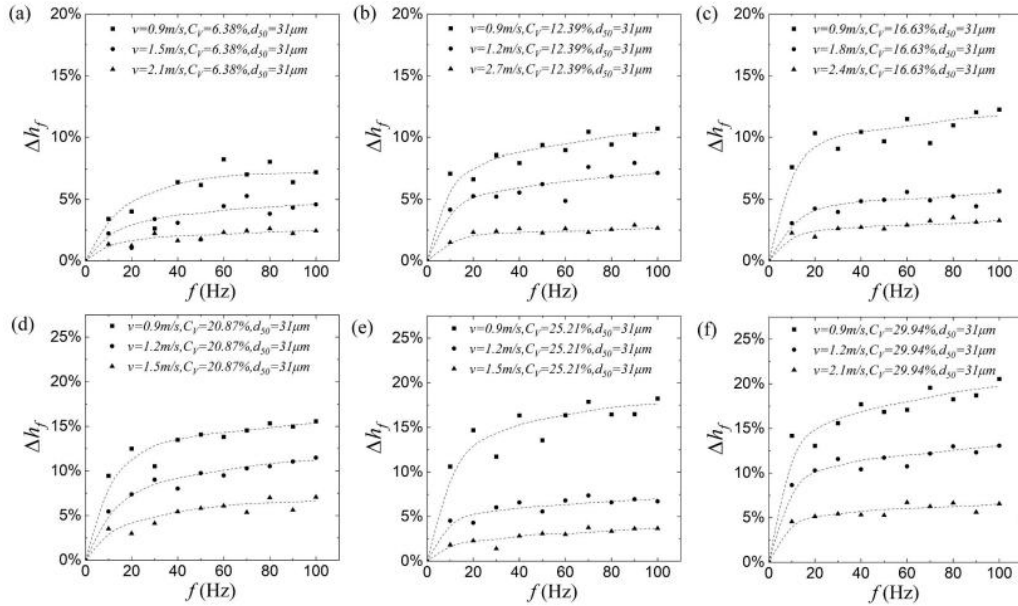


Imagen 2.10: Pérdida de carga en función de frecuencia de vibración (Zhang, Chen, Li, Wang, & Yu., 2023).

La Imagen 2.10 presenta cómo varía la reducción de la pérdida de carga (Δh_f) en el transporte de pulpa cuando se aplica una frecuencia de vibración mecánica a la tubería para diferentes porcentajes de concentración de sólidos en volumen. Los resultados muestran que, independientemente de la velocidad del flujo y la concentración volumétrica de la pulpa, la vibración mecánica permite reducir la pérdida de resistencia hidráulica. Se puede ver que en el grafico C, con una concentración en volumen de 16,63%, y una velocidad de 0,9 m/s, una frecuencia de vibración de 100 Hz permite reducir la pérdida de carga en más de un 12%. En conjunto, los resultados de los gráficos demuestran que la frecuencia de vibración tiene un efecto real y significativo en la reducción de la pérdida de carga en el transporte de pulpas, especialmente cuando la concentración de sólidos es elevada, pero también, cuando las velocidades de flujo son menores obtienen mayores beneficios con la vibración.

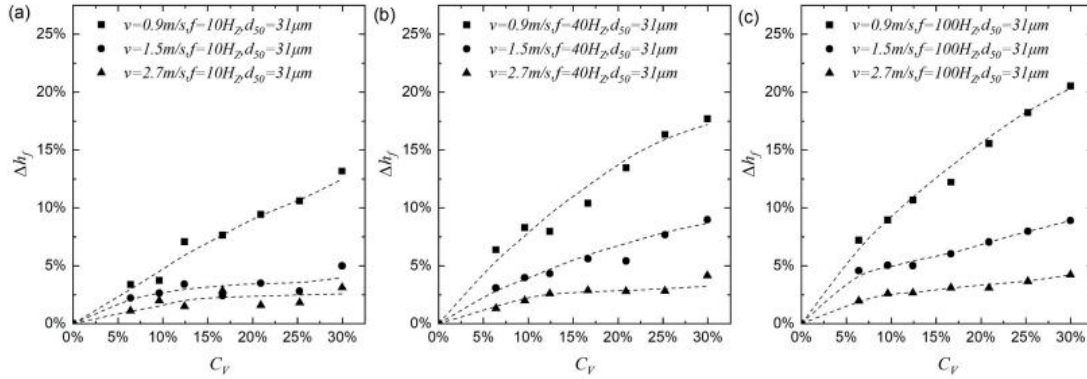


Imagen 2.11: Pérdida de carga en función de la concentración en volumen (Zhang, Chen, Li, Wang, & Yu., 2023).

Se observa en la Imagen 2.11 cómo varía la reducción de la pérdida de carga (Δh_f) en función de la concentración volumétrica de pulpa (C_v), para un tamaño de partículas $d_{50} = 31\mu\text{m}$, considerando tres frecuencias de vibración: 10 Hz (a), 40 Hz (b) y 100 Hz (c), y tres velocidades de flujo diferentes en cada caso.

En general, se observa que a medida que aumenta la concentración de pulpa, también lo hace la efectividad de la vibración para reducir la resistencia hidráulica del sistema. Esto se debe a que, con mayores concentraciones, la pulpa tiende a presentar más floculación y deposición, lo que genera una distribución no uniforme, especialmente con acumulación cerca del fondo de la tubería. Esta acumulación incrementa la viscosidad y la pérdida de carga. Sin embargo, al aplicar vibración, estas estructuras tienden a romperse y dispersarse, lo que facilita el flujo y reduce la resistencia.

Comparando los tres gráficos, se concluye que la frecuencia de vibración es un factor crítico: a mayor frecuencia, mayor es la capacidad de reducir la resistencia al flujo, particularmente en pulpas de alta concentración. Además, la velocidad de flujo influye inversamente en el efecto: velocidades más bajas muestran mayor sensibilidad y beneficio ante la vibración. Finalmente, los datos confirman que, a medida que aumenta la concentración en volumen de la pulpa se vuelve más susceptible a la fluidización, y por ende, se obtiene un mayor impacto de la vibración en la reducción de pérdida de carga.

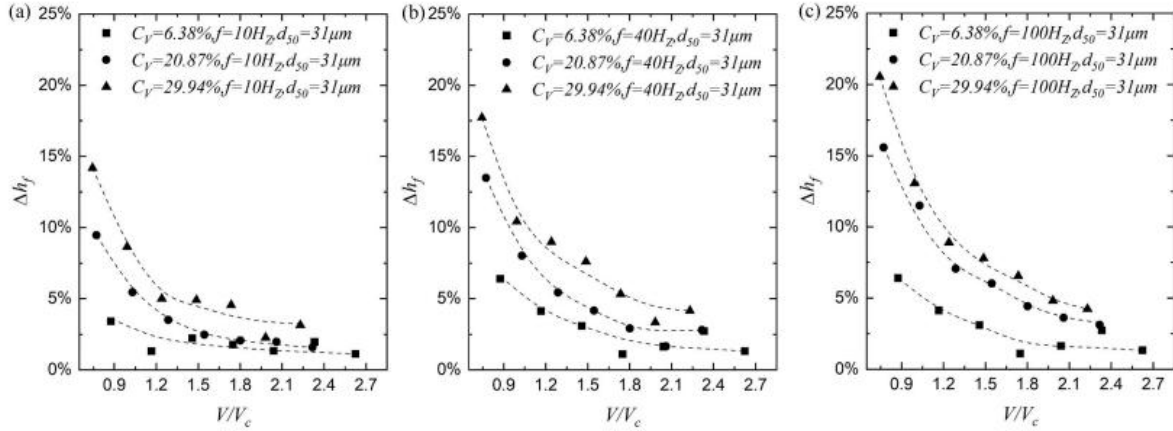


Imagen 2.12: Pérdida de carga en función de la relación de velocidades (Zhang, Chen, Li, Wang, & Yu., 2023).

Se observa en la Imagen 2.12 cómo la eficiencia de la vibración para reducir la pérdida de carga (Δhf) en el transporte de pulpa disminuye a medida que aumenta la relación entre la velocidad real de transporte y la velocidad crítica de sedimentación (V/V_c). Esta relación adimensional refleja la capacidad del flujo para mantener las partículas en suspensión. Valores bajos de V/V_c indican una mayor tendencia a la sedimentación, mientras que valores altos representan condiciones de flujo más eficientes.

Comparando los tres gráficos, se concluye que el efecto de la vibración en la reducción de pérdida de carga es más efectivo a una baja relación de velocidad, es decir, cuando el flujo está cercano a la sedimentación. Además, aunque frecuencias altas como 100 Hz tienen el mayor impacto puntual, la frecuencia de 40 Hz ofrece un mejor rendimiento sostenido en un rango más amplio de condiciones operativas.

Finalmente, a mayor concentración de pulpa, el beneficio de la vibración se incrementa en todos los casos, confirmando su utilidad principalmente en sistemas con alta carga de sólidos y trayectos largos donde la sedimentación es más probable. Por lo que estos resultados indican que la vibración mecánica es más efectiva cuando se aplica en zonas donde V/V_c es bajo, ya que es allí donde el flujo presenta mayores pérdidas de carga debido a sedimentación.

3. Marco Teórico

Para dar inicio al desarrollo del trabajo, es fundamental comprender y analizar en profundidad los conceptos que conforman la base teórica y metodológica. Estos fundamentos no solo permiten definir los criterios técnicos, sino que también orientan las decisiones asociadas al diseño, construcción y operación del banco de ensayo.

3.1 Parámetros de la pulpa

Los parámetros fundamentales para caracterizar una pulpa son: la concentración de sólidos en peso, la concentración de sólidos en volumen, la densidad de la pulpa. Estos valores son esenciales para caracterizar el comportamiento de la pulpa durante su transporte, ya que influyen directamente en variables críticas como la velocidad límite, las pérdidas por fricción y la eficiencia del sistema de bombeo las cuales son necesarias contemplar para el diseño del banco de ensayo.

Para calcular los parámetros necesarios para el diseño del banco se tomará como guía el trabajo realizado por Juan Luis Bouso y Pedro Martínez (Bouso & Martinez, 2023), el cual se mostrará en los siguientes subíndices.

3.1.1 Concentración de sólidos en peso

Se define como la proporción del peso de los sólidos presentes en la mezcla respecto al peso total de la pulpa (sólido más líquido). Este parámetro se expresa comúnmente como un porcentaje y es una medida clave para caracterizar la densidad y las propiedades reológicas de la pulpa, el cual se utiliza la siguiente fórmula.

$$C_W = \frac{w_s}{w_t} \quad (3.1)$$

Donde:

C_W : Concentración de sólidos en peso

w_s : Peso del sólido [kg]

w_T : Peso total de pulpa [kg]

Este parámetro, aplicado al transporte de pulpas, se relaciona con el comportamiento del flujo, ya que afecta directamente propiedades como la viscosidad aparente, la densidad de la mezcla y su tendencia a la sedimentación. Su correcta evaluación es fundamental en el diseño hidráulico de sistemas de impulsión, ya que condiciona la velocidad mínima de arrastre y las pérdidas de carga a lo largo de la conducción en la selección de equipos de bombeo impactando directamente en la eficiencia energética y la operación continua del sistema.

3.1.2 Concentración de sólido en volumen

La concentración de sólidos en volumen en una pulpa se define como la proporción del volumen ocupado por los sólidos respecto al volumen total de la mezcla (sólidos más líquidos). Este parámetro se expresa generalmente como un porcentaje y es esencial para evaluar las propiedades hidráulicas y de transporte de la pulpa en sistemas industriales. En el documento de bombeo de pulpas con diferentes procedimientos (Bouso & Martinez, 2023) , se incluye una tabla que permite determinar la concentración volumétrica de sólidos a partir de distintas ecuaciones, según las variables disponibles y las condiciones del sistema.

Estas ecuaciones permiten determinar de manera precisa la proporción de sólidos en relación con el volumen total de la pulpa, considerando las características específicas de la mezcla. Para calcular la concentración de sólidos en volumen, se debe emplear la siguiente ecuación, seleccionada de las fórmulas disponibles en el texto (Bouso & Martinez, 2023).

$$C_v = \frac{c_w * \rho_l}{\rho_s - (C_w * (\rho_s - \rho_l))} \quad (3.2)$$

Donde:

C_v : Concentración del sólido en volumen

ρ_l : Densidad del líquido [kg/m³]

ρ_s : Densidad del sólido [kg/m³]

C_w : Concentración del sólido en peso [%]

Este parámetro resulta esencial para llevar a cabo el cálculo posterior de la densidad de la pulpa ya que influye directamente en la capacidad del sistema para movilizar la mezcla de manera eficiente. Además, es crucial para determinar la velocidad mínima que debe

mantenerse en el flujo con el fin de evitar la sedimentación de partículas dentro de las tuberías, lo cual podría generar obstrucciones y afectar el rendimiento operativo del sistema.

3.1.3 Densidad de la pulpa

La densidad de la pulpa es una propiedad física que describe la relación entre la masa total de la pulpa (sólidos y líquido) y el volumen total que ocupa. Por lo que si se obtiene la concentración de sólido en volumen, se puede calcular la densidad de la pulpa utilizando la siguiente ecuación.

$$\rho_p = C_v * (\rho_s - \rho_l) + \rho_l \quad (3.3)$$

Donde:

C_v : Concentración del sólido en volumen

ρ_p : Densidad de la pulpa [kg/m³]

ρ_l : Densidad del líquido [kg/ m³]

ρ_s : Densidad del sólido [kg/ m³]

La densidad de la pulpa es un parámetro clave para evaluar la eficiencia del transporte, ya que influye en la energía requerida para movilizar el material y también por esto interviene en el cálculo para poder determinar de manera precisa el caudal que se requiere dentro del sistema de tuberías.

3.1.4 Factor límite FL

El factor límite FL es un coeficiente adimensional utilizado para calcular la velocidad límite de sedimentación de partículas en sistemas de transporte de pulpas. Este parámetro representa la influencia combinada del tamaño de las partículas, la concentración de sólidos y las propiedades del fluido sobre el comportamiento del flujo en una tubería. Es un componente clave en la ecuación de Durand para determinar la velocidad mínima que evita la sedimentación de partículas sólidas, asegurando que estas permanezcan en suspensión durante el transporte.

El factor límite se obtiene del gráfico de Mc Elvain & Cave el cual está en función del tamaño de partículas y el porcentaje de concentración de sólidos en volumen.

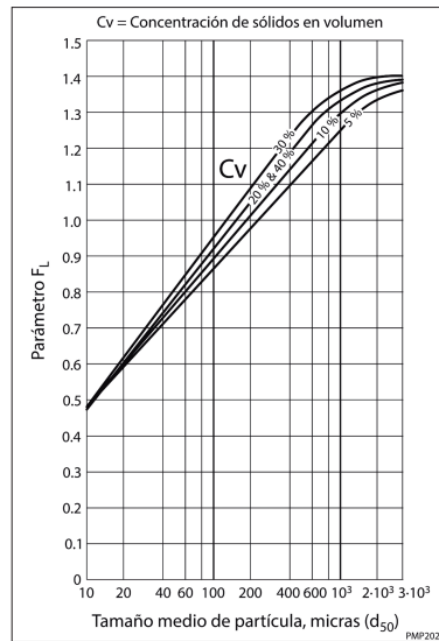


Imagen 3.1: Gráfico de Mc Elvain & Cave (Bouso & Martinez, 2023)

El parámetro FL requiere conocer ciertos datos clave de la mezcla, como el tamaño promedio de las partículas y la concentración de sólidos en volumen. Estos valores permiten acceder al factor límite, un coeficiente que refleja las propiedades del flujo en función de las características de la pulpa.

Se comienza trazando una línea vertical desde el tamaño promedio de las partículas en el eje de las coordenadas o eje “x”, hasta que se encuentre con la curva del porcentaje de concentración de sólidos en volumen, una vez encontrado se procede a trazar una línea horizontal desde el punto de intersección hacia la izquierda encontrando de esta manera el valor del factor límite.

3.1.5 Velocidad de sedimentación

La velocidad límite de sedimentación de partículas es la velocidad mínima que debe mantener el flujo dentro de una tubería para evitar que las partículas sólidas suspendidas en una pulpa se depositen en el fondo por lo que la sedimentación ocurre cuando la velocidad del flujo no es suficiente para contrarrestar la acción de la gravedad sobre las partículas sólidas, lo que genera la acumulación de estas en el fondo de la tubería. Mantener una velocidad igual o superior a esta velocidad límite asegura que las partículas permanezcan en suspensión y sean transportadas eficientemente junto con el fluido. Este concepto es crucial en el diseño de sistemas de transporte de pulpas, ya que ayuda a garantizar un flujo eficiente, minimizar el riesgo de obstrucciones y reducir el desgaste de los equipos.

Para obtener este valor de velocidad límite se puede utilizar la ecuación de Durand - McElvain & Cave (Bouso & Martinez, 2023):

$$V_l = F_l * \sqrt{2 * g * D_{int} * \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}} = F_l * \sqrt{2 * g * D_{int} * (SG - 1)} \quad (3.4)$$

Donde:

V_l : Velocidad límite de sedimentación de partículas [m/s]

ρ_l : Densidad del líquido [kg/m³]

ρ_s : Densidad del sólido [kg/m³]

D_{int} : Diámetro interno de tubería [m]

SG: Gravedad específica del sólido

g : Aceleración de gravedad [m/s²]

F_l : Factor límite FL

Esta ecuación combina las propiedades físicas de la pulpa y las características geométricas del sistema para determinar la velocidad mínima que asegura que las partículas permanezcan en suspensión. Este método es ampliamente utilizado en la industria minera y de transporte de pulpas, ya que permite diseñar sistemas más eficientes y reducir en otros equipos los riesgos de sedimentación y obstrucción.

Una alternativa para obtener la velocidad de sedimentación de partículas cuando la concentración de sólidos en volumen es menor al 5% de la pulpa y no se puede obtener el factor FL del gráfico de Mc Elvain & Cave (Bouso & Martinez, 2023), es utilizar la fórmula que se muestra en el libro *Slurry transport using centrifugal pumps* (Wilson, Eddie, Sellgren, & Clift, 2006), la cual compara la velocidad límite de sedimentación de partículas nominal y la velocidad máxima. La velocidad nominal se calcula como:

$$V_{sm_{nom}} = 8,8 * \left(\mu_s * \frac{(SG_s - SG_f)}{0,66 * SG_f} \right)^{0,55} * \frac{D_{int}^{0,7} * d_{mm}^{1,75}}{d_{mm}^2 + 0.11 D_{int}^{0,7}} \quad (3.5)$$

Donde:

d_{mm} : Diámetro de partícula [mm]

D_{int} : Diámetro interno de tubería [m]

μ_s : Coeficiente de fricción estático

SG_s : Gravedad específica del sólido

SG_f : Gravedad específica del fluido

Por otro lado (Wilson, Eddie, Sellgren, & Clift, 2006) mencionan que la velocidad máxima de sedimentación de partícula se determina bajo la siguiente ecuación:

$$V_{sm_{max}} = \left(\frac{0,018}{f_f} \right)^{0,13} * \sqrt{2gD_{int} * \left(\frac{SG_s}{SG_f} - 1 \right)} \quad (3.6)$$

Donde:

f_f : Factor de fricción de Darcy - Weisbach

g : Aceleración de gravedad [m/s²]

D_{int} : Diámetro interno de tubería [m]

SG_s : Gravedad específica del sólido [SG]

SG_f : Gravedad específica del fluido

Finalmente según Wilson (Wilson, Eddie, Sellgren, & Clift, 2006) se selecciona la menor velocidad de estas como la velocidad límite de sedimentación de partícula.

3.2 Tipos de flujos en el transporte de pulpa

El “Slurry” en inglés o Pulpa, se define como una mezcla compuesta por partículas sólidas, y comúnmente agua. Es utilizada principalmente para facilitar el transporte, manejo y procesamiento de los minerales extraídos tanto en minería como en otras industrias. Su consistencia puede variar desde fluida hasta altamente viscosa, dependiendo de la proporción de sólidos presentes en la mezcla, distribución granulométrica de las partículas, densidad. El comportamiento depende del tamaño de la tubería, nivel de turbulencia, temperatura, viscosidad absoluta del líquido, el ángulo de inclinación y fricción interna de tubería.

El flujo de pulpa no se debe considerar igual que un flujo monofásico ya que es una mezcla de partículas en suspensión, por lo que se necesita de un límite de velocidad de flujo para que las partículas no sedimenten en las tuberías, el cual difiere de un flujo monofásico. La interacción entre las partículas y el líquido, así como entre las partículas mismas, da lugar a fenómenos como sedimentación, desgastes en el sistema (ejemplo: tuberías, válvulas y bombas), y altas variaciones en la presión y velocidad del flujo. Estas propiedades hacen que el diseño y la operación de sistemas de transporte de pulpa sean más complejos que los de flujos monofásicos.

A continuación y basándose en el libro “*Slurry transport using centrifugal pumps*” (Wilson, Eddie, Sellgren, & Clift, 2006) se definen los siguientes flujos que se encuentran en el transporte de pulpa por tuberías. Así mismo, en la Imagen 3.2 es posible observar dichos flujos.

3.2.1 Flujo homogéneo

En términos generales, un flujo homogéneo se caracteriza por mantener una distribución uniforme de partículas sólidas en la mezcla, sin sedimentación visible durante su desplazamiento en régimen turbulento. Este tipo de flujo suele presentarse cuando las partículas tienen un tamaño menor a 40 μm y la concentración en peso de sólidos supera el 40 %, condiciones que favorecen la suspensión completa del material sólido dentro del líquido.

Para determinar si un flujo puede considerarse homogéneo, diversos autores han propuesto diferentes criterios y supuestos técnicos. Por ejemplo, Tamburrino (Tamburrino, 2015) reúne hipótesis de varios investigadores que utilizan parámetros como el número de Stokes, combinaciones entre el diámetro de la tubería y la velocidad media del flujo, así como la densidad relativa de los sólidos. Además, se consideran indicadores granulométricos como el diámetro bajo el cual se encuentra el 50 % o el 85 % de las partículas, evaluados a partir del ábaco de Mc Elvain & Cave (Bouso & Martinez, 2023). Estas herramientas permiten evaluar con mayor precisión las condiciones bajo las cuales el flujo puede comportarse como homogéneo en contextos reales de transporte de pulpas, este flujo se puede observar en la Imagen 3.2.

3.2.2 Flujo heterogéneo

Este tipo de flujo se caracteriza por la presencia de partículas de mayor tamaño en comparación con el flujo homogéneo. Debido a esta composición, se observa una mayor tendencia a la sedimentación de partículas, especialmente en condiciones donde la velocidad del flujo no es suficientemente alta para mantenerlas en suspensión. Aunque el flujo puede contener partículas de variados tamaños, aquellas de mayor dimensión y densidad requieren velocidades críticas más elevadas para evitar su asentamiento en el fondo de la tubería, la referencia visual se puede observar en la Imagen 3.2.

3.2.3 Flujo con dunas

Cuando la velocidad del flujo comienza a disminuir, basándose en el libro de ingeniería de fluidos (Banderas, 2016), se inicia la sedimentación de partículas sin que se interrumpa completamente el transporte. En esta fase se produce un fenómeno conocido como formación de dunas, que pueden ser transversales o longitudinales. Estas aparecen cuando la velocidad cae por debajo del umbral de sedimentación, dando lugar a estructuras alargadas cuya anchura equivale aproximadamente a 0,1 veces el diámetro de la tubería y cuya longitud varía entre 1 y 3 veces dicho diámetro, este fenómeno se puede observar en la Imagen 3.2.

Este tipo de comportamiento también se conoce como flujo en saltos. A velocidades aún más bajas, se desarrollan dunas más compactas y altas, con menor longitud pero mayor altura, lo cual también es llamado un como flujo estratificado.

3.2.4 Flujo con ondas o lecho estacionario

A medida que la velocidad del líquido disminuye, las partículas sólidas tienden a depositarse, formando un lecho estacionario en el fondo de la tubería. En la zona del centro de la tubería las partículas se desplazan lentamente, deslizándose sobre dicho lecho. En la parte superior, el líquido fluye libremente a una velocidad mayor en comparación con el lecho estacionario, arrastrando partículas que generan ondas u olas que se desplazan en la dirección del flujo, similares a dunas transversales. Este patrón de comportamiento es conocido como flujo con lecho estacionario y se puede observar en la Imagen 3.2.

3.2.5 Flujo con lecho móvil

Cuando velocidad del flujo disminuye aún más, las partículas llegan a ocupar toda el área de flujo dentro de la tubería. En estas condiciones, la parte superior del flujo se mueve de forma lenta, mientras que la sección inferior permanece completamente estática. Si la velocidad del líquido continúa reduciéndose, el movimiento de las partículas se detiene por completo, lo que puede generar el bloqueo total de la tubería. Este fenómeno también es conocido como flujo en fase densa continua, a continuación se podrá observar los patrones de cada flujo.

Luego de haber descrito los regímenes de flujo y abordado los criterios de diseño hidráulico, se presenta a continuación la Imagen 3.2 que resume su comportamiento dentro de la tubería. Esta ilustración permite identificar, de forma clara, cómo varían las condiciones del flujo según la velocidad y la concentración de sólidos, y cómo se manifiestan visualmente en el interior del sistema de transporte. Su análisis es útil para reforzar la comprensión de los fenómenos observados en la operación real.

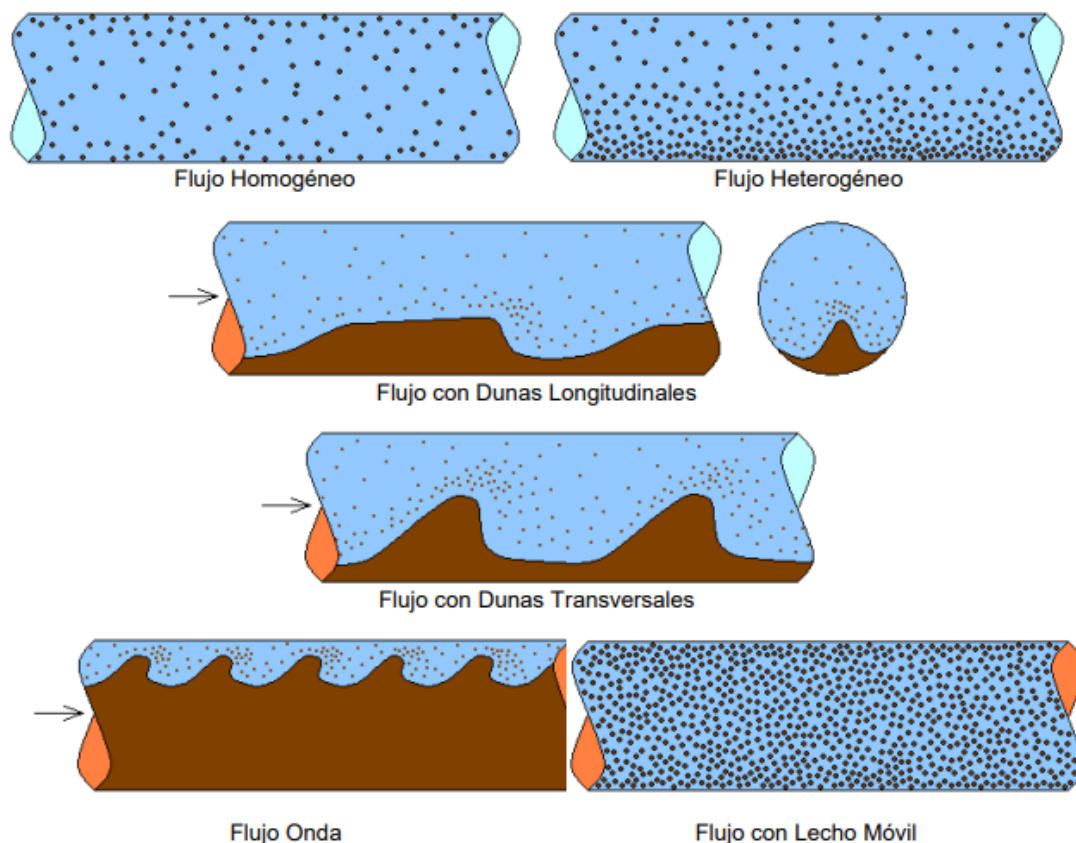


Imagen 3.2: Patrones de flujo en pulpa para tuberías horizontales (Banderas, 2016)

La Imagen 3.2 resume visualmente los distintos regímenes de flujo de pulpas, los cuales dependen principalmente de la velocidad del fluido en la tubería y de la concentración de sólidos en la mezcla. Comprender estos comportamientos es fundamental para un diseño hidráulico eficiente, ya que una selección inadecuada de parámetros como el caudal o el diámetro de tubería puede favorecer la formación de dunas, lechos móviles o sedimentación, lo que incrementa las pérdidas de carga y puede generar obstrucciones. Por ello, el conocimiento de estos fenómenos es clave tanto en el dimensionamiento de las tuberías como en la selección apropiada de bombas, con el fin de asegurar un transporte estable y continuo de la pulpa.

3.3 Altura del sistema

3.3.1 Velocidad del flujo

Cuando se desea conocer la velocidad media con la que fluye un líquido o gas a través de una tubería o ducto, es necesario conocer el área de la sección por donde pasa el flujo y el caudal, donde se obtiene la velocidad media del flujo. Mediante la ecuación 3.7 es posible obtener esta velocidad media

$$c = \frac{4Q}{\pi} * D_{int}^2 \quad (3.7)$$

Donde:

c : Velocidad media del fluido [m/s]

Q : Caudal [m³/h]

D_{int} : Diámetro interno de tubería [m]

3.3.2 Número de Reynolds

El Número de Reynolds es un valor adimensional que caracteriza el tipo de flujo en un sistema de transporte, ya sea laminar, transitorio o turbulento. Se utiliza para predecir cómo se comportará un fluido dentro de una tubería o conducto, basándose en la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido, y se calcula bajo la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho * c * D_{int}}{\mu} \quad (3.8)$$

Donde:

Re : Numero de Reynolds

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

D_{int} : Diámetro interno de tubería [m]

μ : Viscosidad dinámica del fluido [Pa*s]

c : Velocidad del flujo [m/s]

El número de Reynolds según el libro Mecánica de Fluidos (Cengel. & Cimbala, 2006) permite determinar cómo es el comportamiento del flujo dentro de una tubería, por lo que según el libro muestra que:

- Si el flujo es laminar ($Re < 2300$): El fluido se mueve de manera ordenada en capas paralelas, o dicho de otra forma según Cengel (Cengel. & Cimbala, 2006):

“En flujo laminar totalmente desarrollado... No hay movimiento en la dirección radial y por tanto el componente de velocidad en la dirección normal al flujo es cero en todas partes. No hay aceleración porque el flujo es estacionario y totalmente desarrollado”

- Si el flujo es turbulento ($Re > 4000$): El fluido tiene movimientos caóticos y mezcla intensa, el cual descrito por Cengel (Cengel. & Cimbala, 2006):

“El flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones aleatorias y rápidas de regiones giratorias de fluido, llamadas remolinos, a través del flujo... Los remolinos giratorios transportan masa, cantidad de movimiento y energía a otras regiones del flujo con mayor rapidez que la difusión molecular, y aumentan enormemente la masa, la cantidad de movimiento y la transferencia de calor”

- Si el flujo está en una región de transición ($2300 < Re < 4000$): Una zona intermedia donde el flujo puede ser inestable, el cual Cengel (Cengel. & Cimbala, 2006) describe como:

“En el flujo transicional, el flujo cambia entre laminar y turbulento de manera aleatoria.”

En pulpas también es posible saber cómo se puede comportar el flujo, si este se encuentra en el rango en que el fluido es newtoniano, es posible utilizar la misma fórmula pero con la densidad y viscosidad de la pulpa (Miedema & Ramnsdel, 2016).

3.3.3 Altura del sistema

En el diseño de sistemas de bombeo, uno de los parámetros fundamentales es la altura del sistema que representa la energía total que la bomba debe entregar al fluido para transportarlo desde un punto de succión hasta un punto de descarga. Según se describe en el documento *Selection of Centrifugal Pumps and Installations* (STERLINGSIHI, s.f.) la altura total está compuesta por tres formas principales de energía: energía de elevación (altura geométrica) la cual es la diferencia entre la altura de succión y descarga de la bomba (Δ_z), energía de presión, la cual es la diferencia entre la succión y descarga de la bomba, y energía dinámica la cual involucra la velocidad entre el punto donde la bomba succiona y el punto donde descarga, además de incluir las pérdidas de carga por fricción y también por accesorios que tiene el sistema.

Matemáticamente, la altura total (H) se expresa como:

$$H = \Delta_z + \frac{\Delta p}{\rho * g} + \frac{\Delta v}{2 * g} + h_f + h_s \quad (3.9)$$

Donde:

H: Carga total del sistema [mca]

Δ_z : Diferencia entre altura de succión y de descarga [m]

Δ_p : Diferencia de presión en la succión de la bomba y la descarga [Pa]

Δ_v : Diferencia de velocidad del flujo [m/s]

h_f : Perdidas de carga por fricción [mca]

h_s : Perdidas de carga por accesorios [mca]

Es una herramienta fundamental para entender el comportamiento de los fluidos en movimiento. Proporciona una relación clara entre las diferentes formas de energía en un flujo y es esencial en muchas aplicaciones de ingeniería, como el diseño de sistemas de transporte de fluidos, aviones, turbinas y más.

3.3.4 Ecuación de Darcy – Weisbach

Las pérdidas por factor de fricción representan la energía o presión que se disipa debido a la resistencia al flujo causada por la interacción entre el fluido en movimiento y las paredes internas de una tubería. Estas pérdidas se producen como resultado de:

1. La viscosidad del fluido, que genera una resistencia interna al flujo.
2. La rugosidad de la superficie interna de la tubería, que incrementa la resistencia al movimiento.

Estas pérdidas se cuantifican en términos de altura de columna de líquido o presión y son una de las principales contribuciones a la pérdida de energía en sistemas hidráulicos y se obtiene utilizando la fórmula de Darcy- Weisbach (Cengel. & Cimbala, 2006):

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D_{int}} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.10)$$

Donde:

h_f : Pérdidas de carga por fricción [mca].

f : Factor de fricción.

L : Longitud de la tubería [m].

D_{int} : Diámetro interno de la tubería [m].

v : Velocidad promedio del flujo en la tubería [m/s].

g : Aceleración de la gravedad [m/s²]

3.3.5 Factor de fricción de Colebrook – White

El factor de fricción de Colebrook-White es un parámetro que se utiliza para calcular las pérdidas de carga por fricción en sistemas de tuberías debido al movimiento de un fluido. Este factor tiene en cuenta el régimen de flujo (Re), la rugosidad de las paredes y el diámetro internos de la tubería. Esta fórmula es la más exacta y universal utilizada para obtener el factor de fricción.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71 * D_{int}} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad (3.11)$$

Donde:

f : Factor de fricción

ε : Rugosidad [m]

D_{int} : Diámetro interno de tubería [m]

Re : Numero de Reynolds

Cabe mencionar que la ecuación de Colebrook-White marcó un hito en la ingeniería hidráulica al proporcionar una solución precisa para obtener el factor de fricción y unificar los comportamientos para flujos turbulentos en tuberías lisas y en tuberías rugosas. Además, sirvió como base para redibujar el diagrama de Moody, desarrollado en 1944 (Cengel. & Cimbala, 2006), que simplificó su aplicación práctica en el diseño de sistemas de tuberías. Esta ecuación permitió a los ingenieros calcular de manera más eficiente las pérdidas de carga y diseñar sistemas de transporte de fluidos con un mayor nivel de precisión y confiabilidad.

Métodos numéricos

Los métodos numéricos son técnicas matemáticas que se utilizan para encontrar soluciones aproximadas a problemas complejos que no pueden resolverse de manera analítica, es decir, utilizando fórmulas exactas. Estos métodos convierten problemas matemáticos continuos en problemas discretos que pueden resolverse mediante cálculos iterativos por medio de computadoras.

Newton Raphson

El método de Newton-Raphson es un método numérico iterativo utilizado para encontrar aproximaciones a las raíces de una función. Es uno de los métodos más populares debido a su rapidez y simplicidad en la convergencia cuando se usa en problemas adecuados. Newton-Raphson se basa en la aproximación lineal de la función utilizando la derivada y una estimación inicial de la raíz (Charpra. & Canale, 2007):

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (3.12)$$

Donde:

X_n : Aproximación actual a la raíz.

X_{n+1} : Siguiente aproximación.

$f(X_n)$: Valor de la función evaluada en X_n

$f'(X_n)$: Derivada de la función evaluada en X_n

El proceso se repite hasta el error porcentual de las soluciones sea bajo o bajo un criterio ya definido, eso quiere decir que la diferencia entre X_{n+1} y X_n dividido X_{n+1} sea bajo en valor absoluto. Por otro lado, también se debe agregar un valor semilla para empezar la iteración.

3.3.6 Pérdidas por singularidad

Las pérdidas por singularidad se refieren a las pérdidas de energía que ocurren en un sistema de flujo debido a la presencia de componentes específicos que alteran el flujo uniforme en una tubería. Estas singularidades incluyen elementos como codos, válvulas, uniones, cambios de sección y otros accesorios que generan turbulencias, separaciones de flujo y recirculaciones, aumentando así la resistencia al flujo.

Estas pérdidas se suman a las pérdidas de energía por fricción en las tuberías y son un factor importante para considerar en el diseño y operación de sistemas de transporte de fluidos o pulpas.

Coefficiente de pérdida (K)

Los valores K , también conocidos como coeficientes de pérdida local, representan la resistencia adicional que los accesorios en un sistema de tuberías como codos, válvulas, reducciones, expansiones, uniones, entre otras, que se imponen al flujo de un fluido. Estos valores son adimensionales y cuantifican la pérdida de energía debida a la turbulencia y cambios en la dirección o velocidad del flujo causados por los accesorios. Cada tipo de accesorio tiene un valor K característico, que depende de su diseño, tamaño y condiciones de operación, la forma de calcular las pérdidas de carga que generan estos accesorios se muestran en el libro Mecánica de Fluidos (Cengel. & Cimbala, 2006) como:

$$h_s = K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.13)$$

Donde:

h_s : Pérdida de carga por accesorios [mca]

K : Valor K del accesorio.

v : Velocidad del flujo en la tubería [m/s]

g : Aceleración de la gravedad [m/s]

3.3.7 Leyes de afinidad

Las leyes de afinidad de las bombas centrífugas son principios fundamentales que describen la relación matemática entre el caudal, la altura de elevación y la potencia absorbida con respecto a los cambios en la velocidad de giro del impulsor. Estas leyes permiten predecir el comportamiento hidráulico de una bomba cuando su velocidad de rotación o el diámetro del impulsor varían, lo que es esencial para el dimensionamiento, ajuste y optimización del sistema de bombeo, como menciona Wilson (Wilson, Eddie, Sellgren, & Clift, 2006).

Caudal y velocidad de giro

Esta relación permite estimar cómo varía el caudal entregado al modificar la velocidad de rotación. A continuación, se presenta la expresión que describe esta proporcionalidad directa.

$$Q_2 = Q_1 * \frac{N_2}{N_1} \quad (3.14)$$

Donde:

Q_i = Caudal

N_i = Velocidad de giro

Esta ecuación establece que el caudal de una bomba es directamente proporcional a la velocidad de giro del impulsor, a lo que es igual, si la velocidad de la bomba aumenta, el caudal entregado por la bomba también aumentará en el mismo porcentaje.

Altura y velocidad de giro

Otro parámetro fundamental en el análisis del rendimiento de bombas centrífugas es la relación entre la altura manométrica y la velocidad de giro. Esta relación es no lineal y permite prever cómo se comporta la bomba al variar su régimen de rotación, lo que resulta esencial para dimensionar correctamente el sistema ante distintas condiciones operativas.

$$H_2 = H_1 * \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (3.15)$$

Donde:

$H_i = \text{Altura}$

$N_i = \text{Velocidad de giro}$

Esta ecuación indica que la altura desarrollada por la bomba es proporcional al cuadrado del cambio en la velocidad. Si la velocidad de giro de la bomba se duplica, la altura se cuadruplica.

Potencia y velocidad de giro

La relación entre la potencia requerida por la bomba y su velocidad de giro es crucial para evaluar el consumo energético del sistema, como la relación es cúbica, significa que aumentos moderados en la velocidad pueden traducirse en incrementos muy significativos en la potencia absorbida. A continuación, se presenta la expresión que cuantifica este comportamiento.

$$P_2 = P_1 * \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (3.16)$$

Donde:

$P_i = \text{Potencia [kW]}$

$N_i = \text{Velocidad de giro [rpm]}$

La potencia absorbida por la bomba es proporcional al cubo de la variación en la velocidad. Esto implica que pequeños incrementos en la velocidad pueden generar aumentos significativos en el consumo energético.

4. Desarrollo

4.1 Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño establecidos para el presente proyecto tienen como objetivo garantizar que el banco de ensayo sea capaz de simular las condiciones reales del transporte de pulpa, permitiendo el análisis y la medición de los fenómenos de sedimentación y flujo.

4.1.1 Propiedades de la pulpa

Los parámetros que se entregaron de la pulpa para considerar en el diseño del banco de ensayo son:

- **Tamaño de partículas:** La pulpa estará compuesta por esferas de vidrio macizas con diámetros de 2,2 mm, 3 mm y 3,7 mm. Se incorporarán 360 g de cada tamaño, garantizando una distribución uniforme de partículas para el análisis experimental
- **Gravedad específica del sólido (SGs):** Los sólidos transportados se considerarán con una gravedad específica de 2,65, que corresponde a esferas de vidrio no agujereadas.
- **Viscosidad dinámica:** La viscosidad será considerada como la del agua a temperatura ambiente como $\mu = 0,001 \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$ (Cengel. & Cimbala, 2006).

Tabla 4.1: Resumen propiedades de pulpa

Tamaño de partícula [mm]	Gravedad específica (SGs)	Viscosidad dinámica de pulpa [Pa*s]
2,2	2,65	0,001
3	2,65	
3,7	2,65	

4.1.2 Dimensiones del sistema

- **Diámetro interno de la tubería (D_{int}):** El sistema contará con tuberías de acrílico transparente de 44mm de diámetro interno con un espesor de 3 mm para permitir la observación directa de los fenómenos de sedimentación.
- **Dimensiones de la mesa:** La mesa destinada para soportar el banco de ensayo tendrá dimensiones de 2.2 x 1.5 metros, cumpliendo con los requerimientos de transportabilidad del sistema. Además, se especifica que la mesa debe ser plegable o desmontable, permitiendo un almacenamiento rápido y eficiente, optimizando el espacio necesario para su transporte y manejo.
- **Sección inclinada:** Se considero una sección ajustable el cual serán tuberías abatibles y se podrá ajustar a los 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90° para analizar el impacto de la pendiente en el flujo, la sedimentación y poder mostrar los tipos de flujos que se pueden encontrar en el transporte de pulpa.

4.1.3 Selección de equipos

- **Bomba:** La selección de la bomba se debe realizar en base a la altura del sistema y el caudal el cual se debe sustentar en base a los cálculos desarrollados. Mediante un VDF será posible regular la velocidad de sedimentación de partículas, además la bomba debe permitir el paso de sólidos mínimos de 5 mm para asegurar que las partículas no tengan impedimento en pasar por el rodete.
- **Instrumentos de medición:** Se debe considerar un manómetro y caudalímetro para monitorear las condiciones del flujo en tiempo real.
- **Sistema de tuberías:** Las tuberías serán de acrílico transparente para facilitar la observación de los fenómenos.
- **Material de estructuras:** Se considero acero galvanizado y laminado para la fabricación de estructuras que darán el soporte a partes críticas del banco de ensayo, así como también la fabricación de la mesa.

4.2 Diseño en software

4.2.1 Sistema de tuberías

El sistema de tuberías del banco de ensayo se diseña con el objetivo principal de garantizar un flujo eficiente y controlado de la mezcla con sólidos, cumpliendo con los estrictos requisitos operativos y experimentales del proyecto. Este sistema está compuesto por tramos de tuberías de acrílico transparente, con un diámetro interno de 50 mm y un espesor de pared de 3 mm, lo que permite una adecuada observación de los fenómenos de sedimentación. En ciertas secciones, se emplea un tramo con un diámetro exterior de 40 mm. Las tuberías, junto con los accesorios, como codos y uniones, se clasifican bajo la norma PN10, según lo establecido por el proveedor, garantizando así la resistencia necesaria para las presiones que se manejan dentro del sistema. Esta clasificación, aunque sobradamente dimensionada en comparación con las presiones reales del sistema, se elige por motivos de disponibilidad y facilidad de integración, lo que ofrece un margen adicional de seguridad.

El material acrílico se selecciona principalmente por sus características de ligereza, durabilidad y transparencia, atributos que resultan esenciales para el análisis experimental. La transparencia del acrílico facilita la observación continua de los fenómenos de sedimentación, lo que es crucial para estudiar el comportamiento de la pulpa bajo diferentes condiciones. Además, el acrílico es capaz de soportar condiciones de operación prolongadas, lo que asegura la estabilidad y longevidad del sistema sin comprometer la integridad de las tuberías, incluso durante las pruebas más exigentes. Esta elección de material, junto con su resistencia a la presión y a los impactos, contribuye a la fiabilidad y eficacia del banco de ensayo en su conjunto.

La longitud total del sistema de tuberías es de 11,4 metros, lo que permite la conexión y disposición adecuada de los diferentes módulos del banco de ensayo. Esta longitud se establece para garantizar una circulación de pulpa eficiente a través del sistema, minimizando las pérdidas de presión y maximizando la precisión de los resultados experimentales.

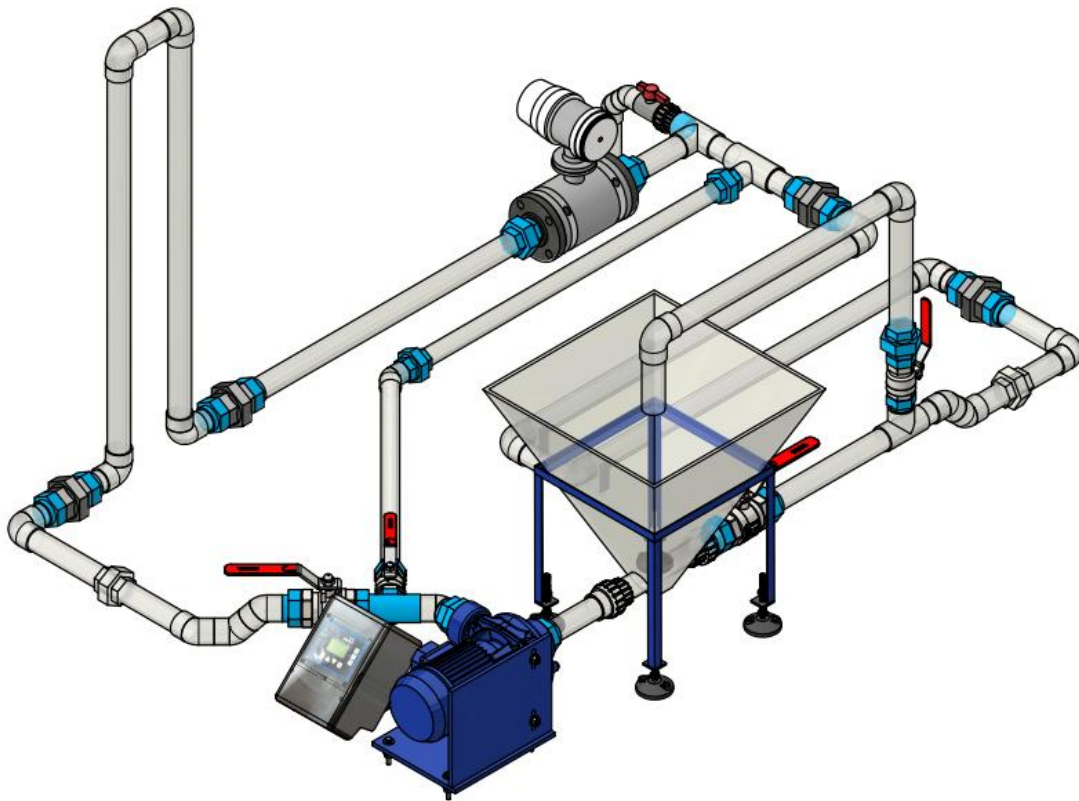


Imagen 4.1: Sistema de tuberías

El sistema de tuberías se diseña utilizando uniones americanas, como se puede observar en la Imagen 4.1: Sistema de tuberías, seleccionadas por su capacidad de asegurar un sellado hermético y, al mismo tiempo, permitir un desmontaje rápido para tareas de limpieza y mantenimiento. Este diseño incorpora un manómetro para monitorear la presión a la salida de la bomba, un caudalímetro electromagnético para medir el flujo volumétrico, y un variador de frecuencia encargado de regular la velocidad de la bomba, permitiendo un control preciso de las condiciones hidráulicas durante los ensayos experimentales.

También se considera una ramificación en el diseño de tuberías el cual contará con una variación en el diámetro de tubería pasando de 50mm a 40 mm para mostrar el efecto que tendrá el cambio de área interna en el transporte de pulpa y poder analizar su comportamiento dentro de una tubería.

4.2.2 Mesa abatible

La mesa abatible se diseña con el objetivo de proporcionar un soporte estructural robusto y estable para el banco de ensayo, permitiendo al mismo tiempo su fácil traslado y almacenamiento en espacios reducidos. Con dimensiones de 2,3 m de largo por 1,5 m de ancho, la estructura ofrece el espacio necesario para integrar correctamente todos los elementos del sistema, como el conjunto de tuberías, el silo de acumulación y los soportes técnicos asociados. Estas dimensiones fueron cuidadosamente definidas para mantener un equilibrio entre funcionalidad y portabilidad.

El diseño considera un mecanismo de plegado mediante escuadras abatibles, lo que permite reducir significativamente el volumen de la estructura cuando no está en uso. Esta característica es clave para facilitar el transporte del banco a distintas ubicaciones operativas, ya sea dentro de un entorno académico, industrial o de pruebas en terreno. Además, la configuración plegable contribuye a optimizar el uso del espacio disponible, evitando la necesidad de desmontar por completo el sistema en cada traslado. En conjunto, el diseño de la mesa responde tanto a criterios de eficiencia estructural como a requerimientos logísticos del proyecto.

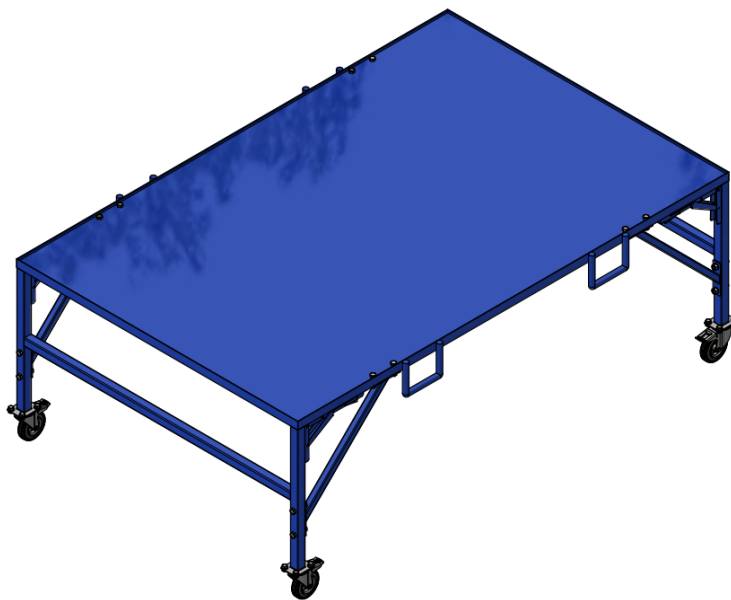


Imagen 4.2: Mesa abatible

Como se observa en la Imagen 4.2, la mesa se construye con perfiles de acero galvanizado debido a su alta resistencia mecánica y un tablero de acero al carbono de 5mm de espesor para otorgar durabilidad. Para mejorar la estabilidad, se añadieron refuerzos en las áreas críticas, como las uniones de las patas y la base.

4.2.3 Soporte tubería abatible

El soporte de tubería abatible se diseña para brindar estabilidad estructural y al mismo tiempo flexibilidad operativa al sistema de conducción, permitiendo ajustar la inclinación de las tuberías entre 0° y 90° en incrementos de 15° .

La inclinación de tuberías dentro del banco de ensayo es esencial para analizar cómo influye la pendiente en la sedimentación de partículas y en el comportamiento del flujo de pulpa dentro de la tubería durante los ensayos.

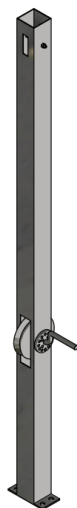


Imagen 4.3: Soporte tubería abatible

El soporte se fabrica con perfiles de acero galvanizado, lo que le otorga una alta resistencia mecánica y durabilidad, incluso bajo condiciones de operación exigentes. Sus puntos de fijación están reforzados con pernos que se anclan directamente a la mesa, permitiendo un ajuste preciso y seguro de la inclinación. Esta configuración no solo garantiza la estabilidad del sistema durante los ensayos, sino que también facilita su desmontaje y transporte, optimizando el espacio requerido para almacenamiento.

El diseño fue previamente modelado mediante software Inventor, lo que permite anticipar y corregir posibles interferencias con otros componentes del banco de ensayo, y asegura una integración estructural eficiente y funcional.

4.2.4 Silo de acrílico

El silo de acrílico se diseña para cumplir la función de almacenar y recircular el agua con partículas utilizadas en el banco de ensayo. Este componente es fundamental para garantizar un suministro constante de fluido al sistema, permitiendo un análisis continuo de los fenómenos de sedimentación y flujo.

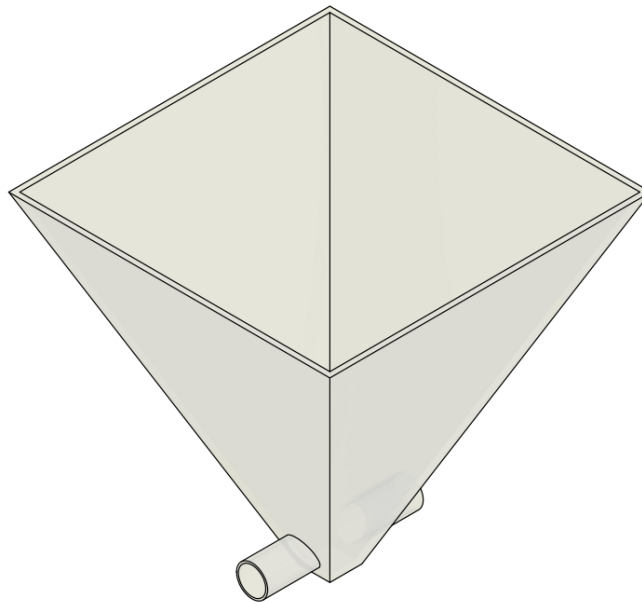


Imagen 4.4: Silo de acrílico

Con una capacidad de 50 litros, el silo presenta un diseño de pirámide truncada, con unión de tubería de 50 mm por ambos lados en la parte inferior, cuidadosamente posicionadas para evitar la acumulación de partículas en el fondo y facilitar la limpieza. El uso de acrílico transparente fue clave para permitir la observación del comportamiento de la pulpa en su interior.

El diseño del silo representa un desafío significativo, tanto en su modelado 3D, como en su posterior fabricación. Durante el proceso de diseño mediante software, es necesario realizar múltiples ajustes para integrar adecuadamente las entradas y salidas de tubería, asegurando su alineación con el resto del sistema. En la etapa de fabricación, se requiere un esfuerzo adicional para garantizar que los ángulos del silo sean precisos.

4.2.5 Soporte de silo

El soporte del silo se diseña para proporcionar una base estable y segura para el componente, garantizando que pueda soportar el peso total del silo lleno, el cual se considera en 30 kg, incluyendo el agua con partículas y la estructura del propio silo. Fabricado en acero galvanizado, el soporte cuenta con un diseño robusto que incluye refuerzos en las uniones críticas para prevenir deformaciones durante la operación. Este diseño asegura que el silo mantenga su posición y alineación con el sistema de tuberías.



Imagen 4.5: Soporte de silo

Una característica clave del soporte es la incorporación niveladores de altura, que permiten nivelar la estructura y asegurarse de que quede perfectamente alineada con la línea de tuberías del sistema. Este ajuste es fundamental para evitar inclinaciones indeseadas en el silo que puedan generar acumulación de partículas en las paredes internas o problemas de conexión

con las tuberías de entrada y salida. El diseño general se realiza con atención a los detalles, garantizando que el soporte del silo cumpla con los requisitos técnicos y operativos establecidos para el banco de ensayo, en el Planos de fabricación se puede observar el plano técnico de fabricación.

4.2.6 Soporte de bomba

El soporte de bomba se diseña para proporcionar una base estable y segura para este componente, garantizando que pueda soportar el peso total de la bomba de 10kg, incluyendo tanto el equipo como las vibraciones generadas durante su operación. Fabricado en acero galvanizado, el soporte presenta un diseño robusto con placas reforzadas en las uniones críticas, evitando deformaciones o desplazamientos durante el funcionamiento del banco de ensayo. Este diseño asegura que la bomba se mantenga firmemente alineada con el sistema de tuberías, permitiendo una transmisión hidráulica eficiente.

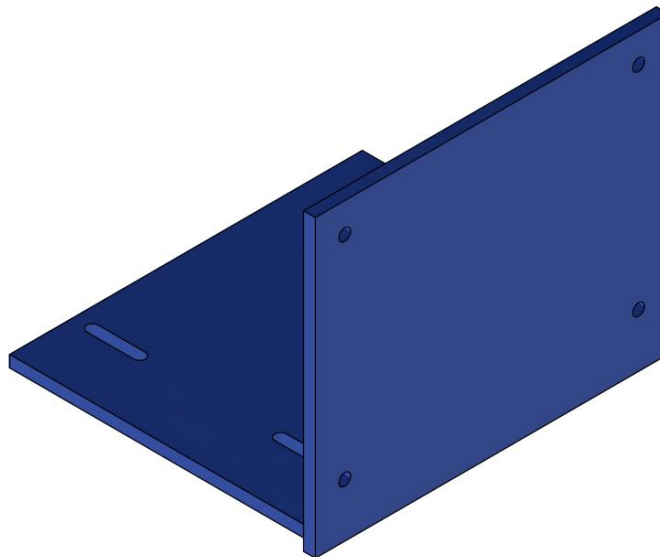


Imagen 4.6: Soporte de bomba

Una característica clave del soporte es la inclusión de ranuras alargadas en la base, las cuales permiten ajustar la posición de montaje para garantizar la correcta alineación con las conexiones hidráulicas. Este ajuste es fundamental para evitar esfuerzos innecesarios en las tuberías y para facilitar las tareas de mantenimiento y montaje. El diseño general fue

realizado con atención a los detalles técnicos, asegurando que el soporte de bomba cumpla con los requisitos operativos y estructurales establecidos para el banco de ensayo. En el Planos de fabricación se puede observar el plano técnico de fabricación.

4.2.7 Soporte de válvula y descarga

El soporte destinado a la válvula de control y al tramo de descarga es concebido con el objetivo de mantener estos componentes en una posición fija y alineada, asegurando su correcto funcionamiento durante la operación del banco de ensayo.



Imagen 4.7: Soporte de válvula y descarga

El soporte fue fabricado en acero al carbono y presenta un diseño tipo voladizo, el cual incorpora una barra de refuerzo diagonal que mejora su comportamiento estructural frente a cargas puntuales concentradas y vibraciones generadas por el paso continuo del fluido a través del sistema. Esta configuración permite una mejor distribución de esfuerzos, minimizando el riesgo de deformaciones o inestabilidades. La base perforada está diseñada para una fijación directa y segura a la estructura principal de apoyo, lo que previene desplazamientos laterales o rotaciones indeseadas que podrían comprometer la integridad del sistema hidráulico durante la operación. El plano de fabricación correspondiente puede consultarse en el Anexo A, donde se detalla bajo su respectiva designación técnica.

4.3 Memoria de cálculo

4.3.1 Análisis de cargas estructurales

Para el desarrollo del diseño del banco de ensayo, se emplea el software Autodesk Inventor, seleccionado por su capacidad de generar modelos tridimensionales precisos, ensamblajes complejos y planos técnicos detallados. Este enfoque optimiza los tiempos de planificación y asegura la precisión y consistencia requeridas para la fabricación y el montaje de cada componente. La utilización de diseño asistido por software permite anticipar y resolver posibles interferencias de montaje, tales como la altura de las tuberías, la ubicación de la bomba sobre su soporte, los espacios requeridos para el flujómetro, la disposición de las tuberías abatibles y la posición de las válvulas.

En el Anexo A se incluyen los planos técnicos del sistema completo, así como los correspondientes a los elementos individuales del banco de ensayo. En estos se destacan las partes más relevantes del sistema, proporcionando una visión integral y clara de su estructura y funcionalidad, lo que facilita la comprensión del modo en que se integran y operan todos los elementos del diseño. Además, se ejecutan modelaciones de cargas estáticas en las estructuras más críticas del banco, con énfasis en aquellas que pueden estar sometidas a mayores esfuerzos durante su operación.

Con el objetivo de verificar el comportamiento estructural de la mesa abatible incorporada al banco de ensayo, se realiza un análisis de carga considerando las condiciones reales de uso. Este análisis contempla el peso propio de la estructura, la carga distribuida generada por el equipo de ensayo y las solicitaciones asociadas al abatimiento. Se considera una carga de diseño de 128 kg, bajo una configuración de carga estática en estado límite de servicio, a fin de evaluar la deformación y la resistencia de los elementos principales. A continuación, se presenta la Tabla 4.2 de pesos que debe soportar la mesa y el análisis estructural efectuado mediante el software Inventor, el cual permite identificar zonas críticas, cuantificar desplazamientos máximos y validar la integridad del diseño en función de los requerimientos de operación y seguridad.

Tabla 4.2: Peso de cada ítem del banco de ensayo

Ítems	Peso [kg]
Bomba y estructura	15
Silo y estructura	15
Válvulas	7
Sistema de tuberías con agua	22
Instrumentos de medición	5
Total	64

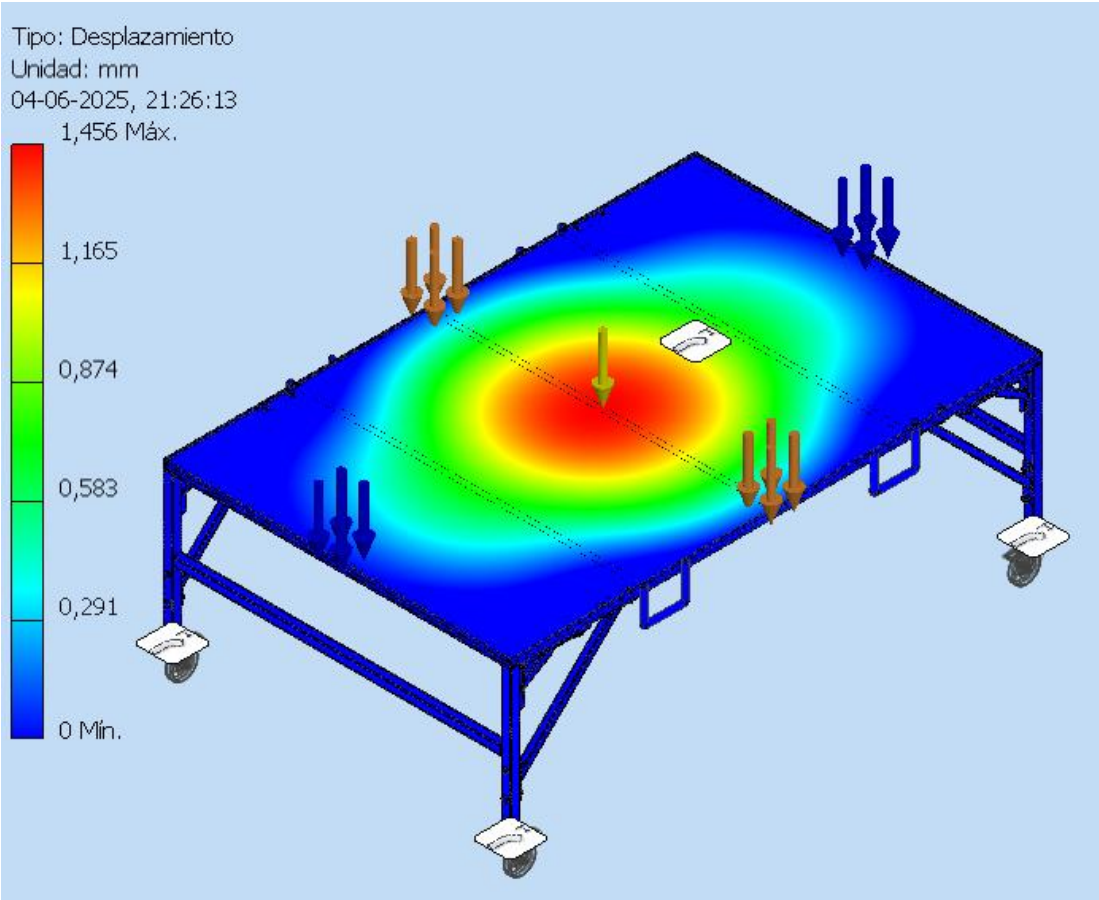
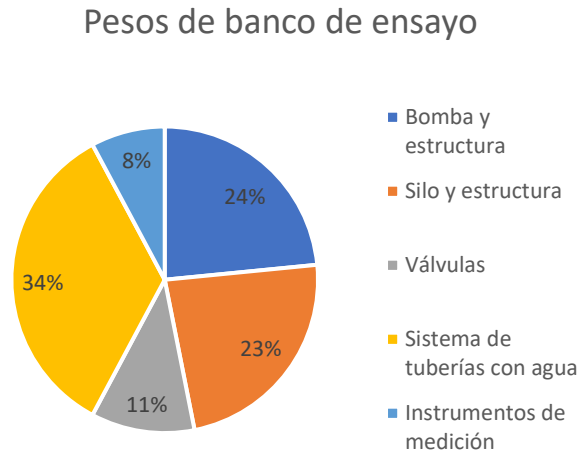


Imagen 4.1: Análisis de carga mesa abatible

La modelación de cargas estáticas en el software Autodesk Inventor, junto con la aplicación de una carga de diseño de 128 kg, demuestra que la estructura resiste adecuadamente tanto su peso propio como las fuerzas adicionales generadas durante el abatimiento y el soporte de componentes del sistema. La simulación identifica correctamente las zonas críticas de esfuerzo y los desplazamientos máximos, confirmando que el conjunto mantiene un adecuado factor de seguridad y cumple con los requisitos de estabilidad, funcionalidad y resistencia necesarios para su operación segura en condiciones reales de trabajo.

La **estructura de soporte del silo**, destinada a sostener tanto el silo de acrílico como el peso de la mezcla de pulpa durante la operación, es modelada considerando una carga axial concentrada de 30 kg aplicada en el centro de la estructura. Esta carga representa el peso combinado del silo y el volumen de pulpa contenido en su interior bajo condiciones normales de operación. Adicionalmente, se incorpora una carga distribuida a lo largo de los bordes inferiores, con el fin de simular el empuje transmitido hacia la base por efecto del peso y la geometría del sistema. Esta carga distribuida se cuantifica en 14,1 Pa aplicados sobre cada una de las vigas de soporte, dando como resultado una deflexión máxima de 0,002518 mm.

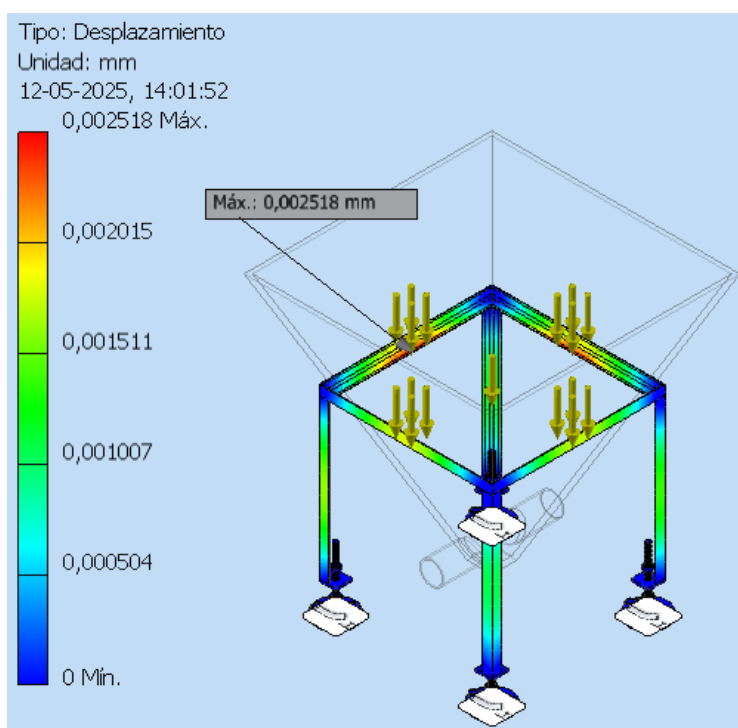


Imagen 4.2: Modelación de desplazamiento para soporte de silo

La **estructura de soporte de las tuberías abatibles**, cuya función principal es mantener la alineación y estabilidad de los tramos móviles del sistema, es modelada considerando un peso estimado de 5 kg, correspondiente al conjunto de tuberías y accesorios menores. Para representar condiciones operativas exigentes durante el ensayo hidráulico, se aplica una carga axial de diseño de 10 kg en las zonas de contacto con los soportes abatibles. Esta carga permite simular escenarios de máxima sollicitación, evaluando la resistencia y el comportamiento estructural del sistema frente a posibles esfuerzos durante la operación, dando como resultado una deflexión máxima de $1.083 \cdot 10^{-5} mm$.

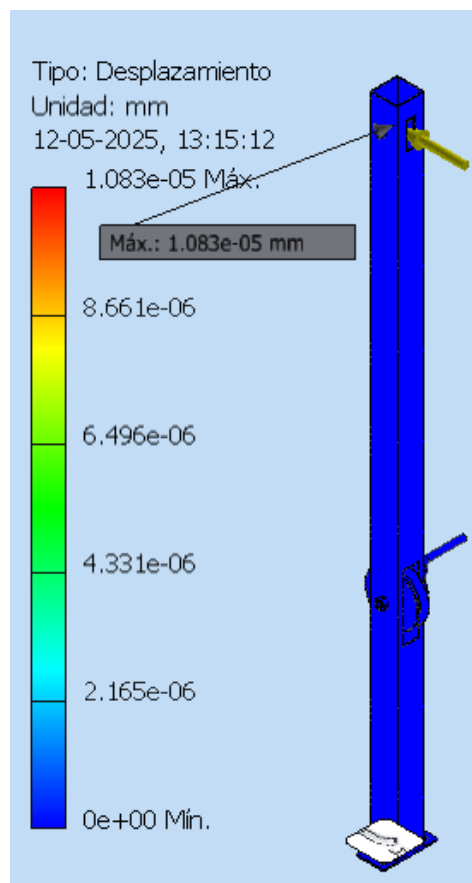


Imagen 4.3: Modelación de desplazamiento para soporte de tubería abatible

El soporte estructural de la bomba, cuya función es absorber las vibraciones generadas durante el funcionamiento del equipo, es evaluado mediante un análisis estructural que considera cargas axiales aplicadas en los puntos de anclaje. Se establece una carga de diseño de 15 kg, incorporando un factor de seguridad igual a 2, con el objetivo de garantizar que la

estructura no experimente deformaciones que puedan comprometer la alineación o el rendimiento operativo de la bomba, dando como resultado una deflexión máxima de 0,08757mm.

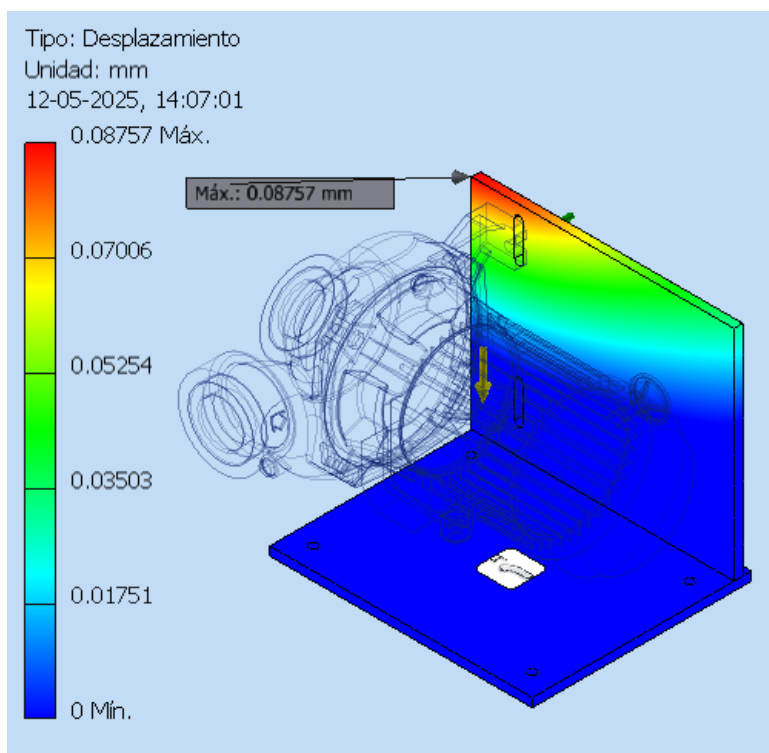


Imagen 4.4: Modelación de desplazamiento para soporte de bomba

El **soporte de la válvula y la descarga de la bomba**, cuya función es mantener en posición vertical la válvula de bola, se realiza un análisis estructural considerando una carga real de 5 kg, correspondiente al peso combinado de ambos componentes. En la simulación se aplica una carga axial de diseño de 10 kg sobre la interfaz de montaje, con el fin de representar tanto el peso estático como la carga adicional inducida por el paso del flujo durante la operación. Los resultados del análisis muestran una deflexión máxima de 0,3689 mm, valor que se encuentra dentro de los rangos admisibles para asegurar la estabilidad, funcionalidad y durabilidad del soporte durante el funcionamiento del sistema.

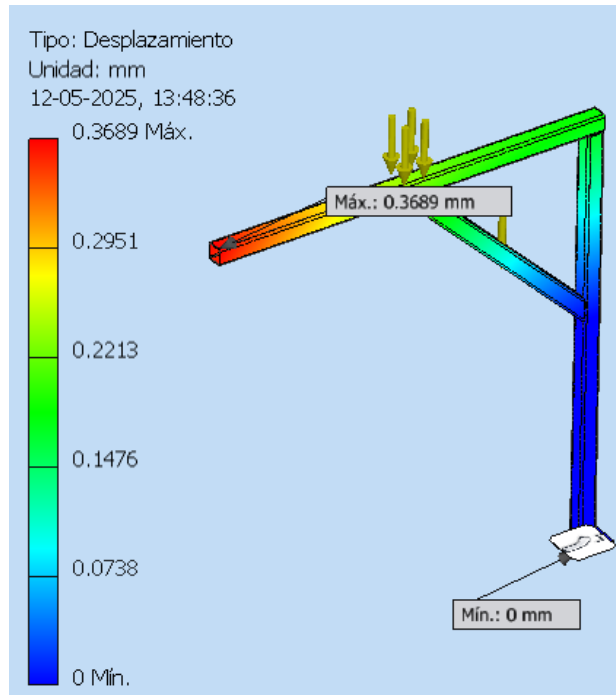


Imagen 4.5: Modelación de desplazamiento para soporte de válvula y descarga

Dado que estas estructuras no se encuentran sometidas a solicitaciones críticas como en el caso de la mesa principal, su modelación estructural se simplifica, centrándose en representar las condiciones más desfavorables de carga estática. Este enfoque permite verificar la resistencia y estabilidad de los elementos sin incurrir en una sobreestimación de su complejidad estructural, asegurando al mismo tiempo su correcto desempeño durante la operación del sistema.

4.3.2 Parámetros iniciales para el calculo

Los parámetros iniciales definidos en este apartado tienen como propósito justificar la altura total del sistema, determinar la velocidad límite de sedimentación de partículas y respaldar la selección de la bomba. Para ello, se consideran las pérdidas de carga asociadas al flujo de pulpa en las tuberías, las diferencias de presión a lo largo del sistema, las características hidráulicas del flujo y las propiedades físicas de la mezcla. Este cálculo constituye una etapa fundamental, ya que permite dimensionar correctamente el sistema y seleccionar una bomba que asegure un funcionamiento eficiente y continuo del banco de ensayo bajo condiciones reales de operación.

Tabla 4.3: Parámetros iniciales

Parámetro	Valor
Longitud de tubería	11,4 [m]
Diámetro interno	0,044 [m]
Gravedad específica del sólido (SGs)	2,65
Diámetros de sólidos	2,2; 3 y 3,7 [mm]
Pesos sólidos totales	1,08 [kg]
Viscosidad dinámica del agua	0,001 [Pa*s]

4.3.3 Velocidad de sedimentación

El cálculo para la velocidad de sedimentación de la pulpa se realiza de dos maneras diferentes, esto con el fin de tener un acercamiento más exacto a lo que se da de manera real dentro del banco de pruebas. El primer modelo es el conocido para pulpas, mientras el segundo se concentra en el diámetro de cada partícula.

4.3.3.1 Método 1 (Pulpa)

Para obtener los resultados de velocidad límite de sedimentación de los sólidos, se utiliza el cálculo para pulpas mineras (Bouso & Martinez, 2023)

Concentración de sólidos en peso

El cálculo de la velocidad de sedimentación de las partículas inicia con la determinación de la masa de agua transportada por el sistema. Se considera el volumen total del fluido, incluyendo tanto el contenido en las tuberías como en el silo de acrílico. El primer paso consiste en calcular el área interna de las tuberías que conforman el banco de ensayo, como el diámetro interno es de 0,044 m, el volumen de la tubería de 0,034 m se desprecia, el cálculo queda:

$$A_{tubería} = \pi * \left(\frac{0,044}{2}\right)^2 = 0,00152 [m^2]$$

$$V_{tubería} = 0,00152 * 11,4 * 1000 = \mathbf{17,3 [l]}$$

El volumen de agua que hay en las tuberías es de 17,3 litros, a esto se debe sumar la cantidad de agua que estará en el silo, el cual es de 10,3 litros, por lo que el volumen total de agua es de:

$$V_t = 17,3 + 10,3 = 27,6 [L]$$

Se considera la densidad del agua como 1 kg/L a una temperatura de 4°C. Al realizar la conversión de volumen a masa, simplemente se divide el volumen en litros por esta densidad, obteniéndose una masa total de agua de 27,6 kg. Con este valor es posible calcular la concentración de partículas mediante la ecuación $CW = \frac{w_s}{w_t}$ (3.1), obteniéndose como resultado:

$$C_W = \frac{1,08}{27,6} * 100 = 3,91 \%$$

Concentración de sólidos en volumen

La concentración de sólidos en volumen se determina considerando la densidad del vidrio (2650 kg/m³) y la densidad del agua a temperatura ambiente (1000 kg/m³), según lo indicado por en el libro *Mecánica de fluidos* (Cengel. & Cimbala, 2006). Aplicando la ecuación $C_v = \frac{C_W * \rho_l}{\rho_s - (C_W * (\rho_s - \rho_l))}$ (3.2), se obtiene el siguiente resultado:

$$C_v = \frac{0,0391 * 1000}{2650 - 0,0391 * (2650 - 1000)} * 100 = 1,51 \%$$

Densidad de la pulpa

La densidad de la pulpa se determina a partir de la concentración volumétrica de sólidos, junto con la densidad del sólido y la densidad del agua. El cálculo se realiza mediante la ecuación $\rho_p = C_v * (\rho_s - \rho_l) + \rho_l$ (3.3, que permite combinar estos valores de forma ponderada según su proporción en la mezcla. En este caso, se utiliza la siguiente expresión:

$$\rho_p = 0,0151 * (2650 - 1000) + 1000 = 1024,9 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Factor límite FL

Para obtener el factor límite, es importante saber el porcentaje d_{50} que tiene la pulpa, el cual se calcula a partir de la granulometría. Es un parámetro comúnmente utilizado para describir la distribución del tamaño de partículas en un material granular, como minerales o suelos. Estos valores se refieren a diámetros equivalentes que representan puntos específicos en la curva de distribución granulométrica, más específicamente el valor d_{50} es el tamaño de partícula para el cual el 50% del material (en peso o volumen) tiene un diámetro menor al valor mostrado, representa el punto central en la curva de distribución granulométrica del tamaño de partículas de un material. Los tamaños de partícula están en igual proporción de concentrado respecto al total, el valor d_{50} se calcula como una distribución acumulada.

Tabla 4.4: Porcentaje de concentración acumulada de sólidos

Tamaño de sólido [mm]	Porcentaje [%]	Porcentaje acumulado [%]
2,2	33,33	33,33
3	33,33	66,66
3,7	33,33	100

Si se observa detenidamente la Tabla 4.4, se puede notar que el porcentaje acumulado del tamaño de partícula d_{50} se encuentra en el intervalo comprendido entre 2,2 mm y 3 mm. Dado que este valor corresponde al tamaño de partícula para el cual el 50% del material ha sido clasificado por debajo de dicho tamaño, se puede realizar una interpolación lineal entre los dos valores de la tabla para estimar con mayor precisión el porcentaje acumulado exacto en ese punto específico. Esta interpolación permite obtener un valor intermedio que no se encuentra explícitamente en la tabla, pero que resulta esencial para realizar un análisis más detallado de la distribución granulométrica de las partículas. De esta manera, se puede calcular el porcentaje acumulado del 50% con mayor exactitud, lo que contribuye a una mejor interpretación de los datos y un análisis más preciso del comportamiento del sistema bajo estudio.

$$d_{50} = 2.2 + \left(\frac{50 - 33.33}{66.66 - 33.33} \right) \cdot (3.0 - 2.2) = 2,6 \text{ mm}$$

El tamaño de partícula de d_{50} corresponde a **2,6 mm**. Con este valor se procede a medir el factor límite FL, utilizando el grafico de McGraw & Hill (Bouso & Martinez, 2023).

Es relevante destacar que un trazado realizado a mano en cuaderno o mediante herramientas digitales, como una tablet, no alcanza el mismo nivel de exactitud que una fórmula empírica validada, sin embargo, resulta plenamente adecuado para graficar las líneas de los ejes y determinar el valor del factor de pérdida por longitud (FL) con buena precisión. Este procedimiento, por su practicidad y disponibilidad, representa una alternativa confiable y segura para obtener este parámetro fundamental en el análisis hidráulico.

La aplicación de este método no compromete la validez técnica del resultado, ya que se apoya en principios establecidos y contrastados en numerosos estudios experimentales a lo largo del tiempo. Su adopción ha sido ampliamente reconocida en entornos técnicos e industriales por su eficiencia y facilidad de uso, lo que permite a ingenieros y profesionales del área efectuar estimaciones confiables incluso sin acceso inmediato a software especializado. Además, el trazado manual o digital favorece la personalización del análisis, permitiendo ajustar el procedimiento a condiciones particulares del sistema, como variaciones geométricas o propiedades específicas del fluido, y sirve como herramienta didáctica para la comprensión del comportamiento del flujo en diferentes configuraciones.

Este tipo de herramienta gráfica también cumple un rol pedagógico importante, ya que permite visualizar de forma intuitiva la relación entre variables hidráulicas clave. Su simplicidad lo convierte en un recurso útil tanto en etapas de diseño preliminar como en procesos de validación experimental.

A continuación, se presenta el resultado obtenido para el factor límite FL, determinado mediante el trazado gráfico previamente descrito. Este valor servirá como referencia para la evaluación del régimen de transporte en el sistema analizado.

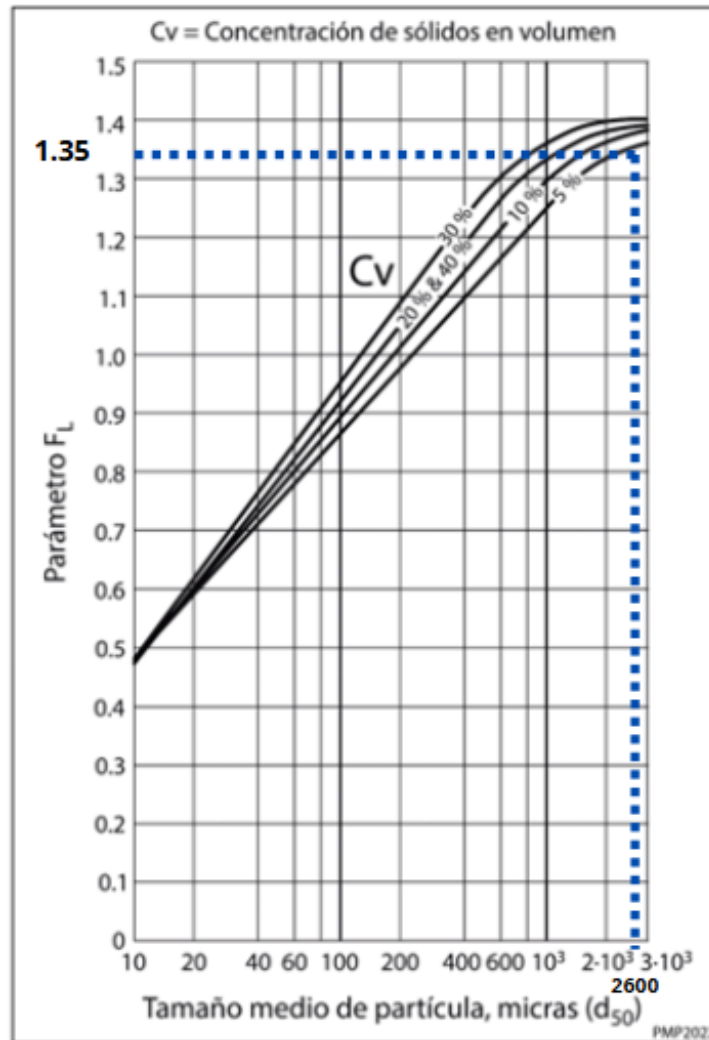


Imagen 4.8: Resultado obtenido del factor limite FL

Aunque el cálculo arrojó una concentración de sólidos en volumen de **1,51%**, se opta por utilizar un valor del **5 %** para efectos del gráfico, lo que entregó un factor límite FL de **1,35**. Esto indica que se requiere una condición de flujo moderadamente alta para mantener las partículas sólidas en suspensión dentro del sistema de transporte. Bajo las condiciones específicas de granulometría, concentración en volumen y las propiedades físicas del fluido y de las partículas, el sistema debe operar a una velocidad elevada para evitar la sedimentación. Este coeficiente actúa como un indicador clave para determinar la velocidad límite del flujo, la cual debe ajustarse correctamente para garantizar una operación eficiente y prevenir pérdidas de rendimiento o fallos funcionales en el transporte hidráulico.

Velocidad de sedimentación

La velocidad límite de sedimentación de partículas se calcula utilizando la ecuación $V_l = F_l *$

$$\sqrt{2 * g * D_{int} * \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}} = F_l * \sqrt{2 * g * D_{int} * (SG - 1)} \quad (3.4), \text{ que relaciona el}$$

factor límite FL , las densidades del sólido y del líquido el diámetro interno de la tubería y la aceleración de la gravedad:

$$V_l = 1.35 * \sqrt{2 * 9.8 * 0.044 * (2.65 - 1)} = 1.61 \left[\frac{m}{s} \right]$$

El valor obtenido indica que el flujo debe mantener una velocidad mínima de **1,61 [m/s]** para garantizar que las partículas permanezcan en suspensión, evitando su sedimentación en el fondo de la tubería.

Caudal con método 1

La velocidad límite de sedimentación de la pulpa se determina a partir del caudal necesario para que este fenómeno sea visible a simple vista dentro de una tubería horizontal. Una vez calculado el caudal, se puede obtener la velocidad límite de sedimentación, lo cual es crucial para analizar el comportamiento de la pulpa en el sistema. El cálculo se realiza de la siguiente manera.

$$Q = 1.61 * \left(\frac{\pi * 0.044^2}{4} \right) = 0.0024 \frac{m^3}{s} = \mathbf{146,9 \frac{l}{min}}$$

Dando como resultado que el caudal para la velocidad límite de sedimentación debe ser de **146,9 [l/min]**.

4.3.3.2 Método 2 (Partícula)

Un valor de comparación en el cálculo teórico, además del método de pulpas, es el enfoque alternativo basado en el diámetro de partícula y la densidad del sólido, siguiendo la metodología descrita (Wilson, Eddie, Sellgren, & Clift, 2006). Este método permite estimar la velocidad límite de sedimentación a partir de ecuaciones empíricas que consideran la

interacción entre las partículas y el fluido circundante, proporcionando una referencia adicional para evaluar la precisión del modelo teórico.

La comparación entre ambos enfoques permite analizar las diferencias en los resultados obtenidos y determinar la aplicabilidad de cada método en distintos escenarios experimentales.

Velocidad nominal del sólido

La velocidad nominal de sedimentación del sólido considera factores que influyen directamente en la dinámica del proceso. Estos parámetros descritos en el subcapítulo (3.1.5) determinan la resistencia que enfrenta la partícula en el fluido y permiten establecer una base teórica para el análisis comparativo con los valores experimentales. Su correcta selección de la velocidad de sedimentación se basa en el texto de *Bombeo de pulpas* (Bouso & Martinez, 2023) , estimando los siguientes parámetros:

Tabla 4.5: Consideración de parámetros

Factor de fricción cinético (μ_s)	1
Gravedad específica del fluido (SGf)	1
Gravedad específica del sólido (SGs)	2,65

Utilizando la ecuación $V_{sm_{nom}} = 8,8 * \left(\mu_s * \frac{(SG_s - SG_f)}{0,66 * SG_f} \right)^{0,55} * \frac{D_{int}^{0,7} * d_{mm}^{1,75}}{d_{mm}^2 + 0.11 D_{int}^{0,7}}$ (3.5) se

calcula la velocidad de sedimentación nominal para cada partícula, dando como resultado:

Tabla 4.6: Resultados de velocidad nominal

$V_{sm_{nom} 2,2}$	1,34 [m/s]
$V_{sm_{nom} 3,0}$	1,24 [m/s]
$V_{sm_{nom} 3,7}$	1,18 [m/s]

Velocidad de sedimentación máxima

De la misma manera utilizando las consideraciones antes mencionadas, se calcula la velocidad máxima de sedimentación de cada partícula utilizando la ecuación $V_{sm_{max}} =$

$\left(\frac{0,018}{f_f}\right)^{0,13} * \sqrt{2gD_{int} * \left(\frac{SG_s}{SG_f} - 1\right)}$ (3.6). Es importante mencionar que el factor de fricción considerado es el obtenido del método anterior por la ecuación de Coolebrok – White $1f = -2 * \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71 * D_{int}} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right)$ (3.11), dando como resultado:

$$V_{sm_{max}} = \left(\frac{0,018}{0,02335}\right)^{0,13} * \sqrt{2 * 9,81 * 0,044 * \left(\frac{2,65}{1} - 1\right)} = 1,16 \frac{m}{s}$$

Finalmente, para los tres sólidos analizados, la velocidad de sedimentación determinada según el método de partícula expresado por Wilson (*Wilson, Eddie, Sellgren, & Clift, 2006*) es de **1,15 m/s** para todas las partículas. Este valor se obtiene siguiendo el criterio establecido en dicho modelo, el cual indica que se debe seleccionar el menor valor entre la velocidad nominal y la velocidad máxima de sedimentación para definir la velocidad límite del proceso.

Caudal con método 2

Con la velocidad límite de sedimentación ya determinada, es posible estimar el caudal requerido para que este fenómeno pueda ser visualizado claramente dentro de una tubería dispuesta en posición horizontal. A continuación, se presenta el procedimiento de cálculo que permite relacionar dicha velocidad con el caudal necesario para las condiciones del ensayo.

$$Q = 1,16 * \left(\frac{\pi * 0,044^2}{4}\right) = 0,0017 \frac{m^3}{s} = \mathbf{104,9 \frac{l}{min}}$$

Rango de velocidad de sedimentación

Finalmente se establece un rango de velocidad de **1,16 m/s a 1,61 m/s** para el análisis de la velocidad de sedimentación dentro del banco de pruebas, considerando las variaciones en las condiciones de flujo y las características físicas de los sólidos en suspensión. Este rango permite evaluar con mayor precisión el comportamiento de las partículas en el sistema y sirve como base para la comparación con los valores experimentales obtenidos en pruebas

posteriores. Además, su aplicabilidad depende de la estabilidad de las condiciones de flujo y de la influencia de factores como la turbulencia y la interacción entre partículas en el medio fluido.

4.3.4 Altura del sistema

La altura del sistema se compone casi completamente por las pérdidas de carga h_j en el sistema. Para calcular estas pérdidas es necesario saber si el flujo a través de las tuberías es laminar o turbulento, utilizando el número de Reynolds, se considera una viscosidad dinámica igual a la del agua a temperatura ambiente y se calcula el Reynolds para 1,61 m/s y 1,15 m/s respectivamente, dando como resultado:

Tabla 4.7: Resultado número de Reynolds

Numero de Reynolds	Valor
Re_1	71712
Re_2	51223

Ambas velocidades de sedimentación se comportan como un flujo turbulento, una vez que se corrobora el número de Reynolds se procede a obtener la altura de bombeo utilizando la ecuación de altura del sistema $H = \Delta_z + \frac{\Delta p}{\rho * g} + \frac{\Delta v}{2 * g} + h_f + h_s$ (3.9).

Para determinar la altura de bombeo, se considera una condición de operación bajo máxima carga, asumiendo que el banco de ensayo se encuentra configurado con la línea de descarga ubicada por encima del nivel de la línea de entrada. Esta disposición implica que el sistema no opera como un circuito cerrado, generando una diferencia de altura entre los puntos de succión y descarga de la bomba (Δ_z). La diferencia de altura corresponde a 0,6 m.

La diferencia de presión se analiza entre el punto de succión y el punto de descarga del sistema. Dado que el silo se encuentra abierto a la atmósfera, tanto la succión como la descarga están sometidas a la misma presión atmosférica. En consecuencia, la variación de

presión entre ambos puntos, representada como ΔP , es igual a cero, ya que no existe una diferencia de presión efectiva en el sistema.

La explicación anterior también se manifiesta para las diferencias en las velocidades del flujo en la succión y descarga de la bomba, representado como Δv . Como es el mismo el cambio de energía cinética es despreciable.

Considerando cada uno de los términos analizados es posible establecer la altura total dinámica que debe entregar la bomba al sistema. Esta magnitud representa la energía total que requiere el fluido para desplazarse desde el punto de succión hasta el punto de descarga, y queda determinada por la siguiente expresión:

$$H = 0,6 + h_s + h_f \text{ [mca]}$$

Finalmente, la ecuación de altura total dinámica queda expresada como la suma de la diferencia de altura entre succión y descarga, junto con las pérdidas de carga por accesorios y por fricción. A continuación, se detalla el procedimiento utilizado para calcular los dos últimos términos.

Pérdidas de carga por accesorios (h_s)

Las pérdidas de carga localizadas se determinan a partir de los coeficientes de pérdida de carga (K) asociados a cada accesorio presente en el sistema. Para ello, se elabora un listado detallado de los componentes del banco de ensayo (como codos, válvulas y uniones) junto con sus respectivos valores “ K ”, los cuales son proporcionados por el fabricante KSB y complementados con información técnica extraída del texto *Mecánica de Fluidos* (Cengel. & Cimbala, 2006). Este enfoque permite cuantificar con precisión el efecto que generan estos elementos sobre la pérdida de energía del sistema.

Tabla 4.8: Coeficiente K para los accesorios del banco de ensayo

Accesorio	K	Cantidad
-----------	---	----------

Codo 90°	0,9	11
Codo 45°	0,75	2
Unión Tee	1,8	2
Válvula de bola	0,2	4
Caudalímetro	2,5	1

Sumando todos los coeficientes de pérdida de cada accesorio da como resultado:

$$K_T = 0,9 * 11 + 0,75 * 2 + 1,8 * 2 + 0,2 * 4 + 2,5 = 18,3$$

Utilizando la ecuación $h_S = K \cdot \frac{v^2}{2g}$ (3.13) , se calcula las pérdidas de carga por accesorios que tiene el sistema, utilizando los valores del rango de velocidades de sedimentación de pulpa (1,61 m/s) y de partículas (1,15 m/s).

Tabla 4.9: Resultados de pérdidas de carga por accesorios

h_{S_1} [mca]	2,42
h_{S_2} [mca]	2,12

Perdidas de carga por fricción

Las pérdidas de carga por fricción se determinan a partir del factor de fricción, utilizando la ecuación de Colebrook–White $\frac{1}{f} = -2 * \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71 * D_{int}} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right)$ (3.11). Dado que esta expresión es de carácter implícito, no permite obtener una solución analítica directa; por ello, se requiere aplicar un método numérico iterativo que aproxime con precisión el valor del factor de fricción. En este caso, se emplea el método de Newton–Raphson $X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)}$

(3.12) seleccionado según los requerimientos definidos por la empresa.

Para su resolución, se utilizan los dos valores de número de Reynolds calculados previamente, con el fin de evaluar el comportamiento del flujo bajo el rango de velocidades de sedimentación en el sistema. El procedimiento fue implementado mediante programación en Python, y el código correspondiente se incluye en el Anexo D Código de programación. Los valores obtenidos para el factor de fricción son:

Tabla 4.10: Resultados factor de fricción

f_1	0,02340
f_2	0,02436

Mediante la ecuación de Darcy – Weisbach $h_f = f \cdot \frac{L}{D_{int}} \cdot \frac{v^2}{2g}$ (3.10), se calcula las pérdidas de carga por fricción para ambas velocidades de flujo, dando como resultado:

Tabla 4.11: Resultados de pérdidas de carga por accesorios

h_{f_1} [mca]	0,7979
h_{f_2} [mca]	0,4235

Finalmente la altura del sistema de bombeo para ambas velocidades es de:

Tabla 4.12: Resultados de pérdidas de carga por accesorios

H_1 [mca]	3,8162
H_2 [mca]	2,2566

4.3.5 Selección de bomba

En el proceso de selección de la bomba, se consideran diversos criterios clave. En primer lugar, el impulsor debe permitir el paso de partículas sólidas de al menos 3,7 mm, correspondiente al mayor diámetro contemplado en la mezcla. Además, se proyecta el uso de pulpa como fluido de transporte, lo que exige que el diseño admita un paso de sólidos de hasta 10 mm. Otro aspecto importante del proyecto es la intención de fabricar la voluta en un material transparente, con el objetivo de visualizar el fenómeno de succión y analizar el comportamiento de las partículas al interactuar con el impulsor. Considerando estos

requerimientos, se determina que la bomba debe incorporar un impulsor de tipo abierto, adecuado tanto para el paso de sólidos como para fines experimentales y de observación.

La selección de la bomba se basa en el análisis comparativo entre la curva característica del sistema de bombeo y la curva de rendimiento de la bomba. Este proceso tiene como objetivo identificar la bomba cuya curva de operación se alinee de la mejor manera con la curva del sistema, minimizando la discrepancia entre los caudales previstos por ambas curvas. De este modo, se garantiza un rendimiento óptimo en términos de eficiencia energética, estabilidad hidráulica y cumplimiento de los requisitos de diseño en el banco de pruebas.

Con base en los cálculos desarrollados en el subcapítulo (4.3.4), se elabora la curva del sistema, la cual se utiliza como referencia para comparar distintas alternativas de bombas disponibles en el mercado. En una etapa inicial, se consideran modelos del fabricante KSB como opción para el banco de ensayo; no obstante, los equipos evaluados no satisfacen los criterios operativos definidos. Luego de un análisis exhaustivo de las exigencias del sistema y de las curvas de operación de los equipos disponibles, se selecciona la bomba Pedrollo NGA 1A por ser la alternativa que mejor se ajusta a los requerimientos del proyecto.

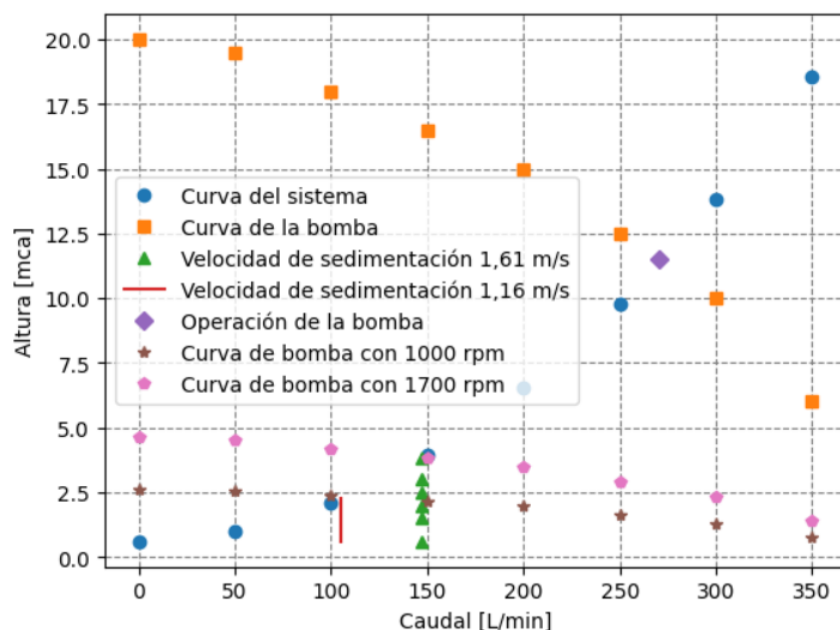


Imagen 4.9: Curva del sistema vs curva de la bomba

Donde:

- **Cuadrado:** Representa la curva de altura de la bomba a 2900 revoluciones por minuto del motor.
- **Círculo:** Corresponde a la curva del sistema del banco de ensayo, el cual se utiliza para evaluar el desempeño de la bomba bajo condiciones controladas, permitiendo analizar su comportamiento ante diferentes cargas hidráulicas.
- **Diamante:** Indica la intersección entre la curva del sistema y la curva de la bomba. Este punto refleja la condición nominal de trabajo dentro del sistema.
- **Estrella:** Representa la curva de la bomba a 1000 rpm.
- **Pentágono:** Representa la curva de la bomba a 1700 rpm
- **Triángulo:** Indica la intersección cuando se reducen las revoluciones de la bomba, con el objetivo de alcanzar el caudal requerido para observar la sedimentación de partículas a 146,9 [m/s].
- **Línea:** Corresponde a la intersección cuando se reducen las revoluciones de la bomba, con el objetivo de alcanzar el caudal requerido para observar la sedimentación de partículas a 104,9 [m/s].

Del grafico 8 se pueden destacar varios puntos de operación:

- **Punto de operación de la bomba:** Representado por un rombo, corresponde a la intersección entre la curva del sistema (círculos) y la curva característica de la bomba (cuadrados). Este punto se ubica aproximadamente en **270 [L/min]** y **11,5 [mca]**, y representa el régimen real de funcionamiento del banco de ensayo. En esta condición, la bomba entrega el caudal y la altura necesarios para superar tanto la altura estática como las pérdidas por fricción del sistema, configurando la carga más exigente durante las pruebas.
- **Velocidad de sedimentación:** La velocidad de sedimentación se representa en el gráfico mediante dos referencias distintas que responden a diferentes enfoques de cálculo. Por un lado, los **triángulos** indican una velocidad de **1,61 m/s** correspondiente a la velocidad de sedimentación de la pulpa, calculada considerando el comportamiento colectivo de las partículas en suspensión, su concentración y la interacción con el fluido. Por otro lado, la **línea vertical** señala una velocidad de

1,16 m/s, obtenida a partir del análisis del comportamiento individual de una partícula aislada en el medio líquido. Desde el punto correspondiente a la velocidad de la pulpa hacia **caudales menores** —incluyendo el umbral definido por la partícula—, se espera que la energía hidráulica disponible no sea suficiente para mantener los sólidos en suspensión, favoreciendo así su deposición dentro del sistema. Este criterio permite identificar la zona crítica de transición y evaluar experimentalmente la eficiencia del transporte bifásico en el banco de ensayo.

NPSH de bomba Pedrollo NGA 1A

Dado que la bomba opera sin diferencia de succión, es decir, con una altura de succión positiva, el riesgo de cavitación es muy bajo. Por este motivo, no se considera necesario realizar el análisis de NPSH.

Bomba Pedrollo NGA 1A

Como se mencionó anteriormente la bomba seleccionada para el banco de ensayo es la bomba Pedrollo NGA 1A, ya que cumple con todos los requerimientos necesarios, además de tener un tamaño reducido para un adecuado transporte del sistema.



Imagen 4.10: Bomba Pedrollo NGA

Por otro lado se debe tener en cuenta los datos de la placa de la bomba ya que se debe considerar en los diagramas de fuerza y comando para realizar las conexiones eléctricas que tendrá el banco demostrativo el cual se puede observar en el Anexo B.

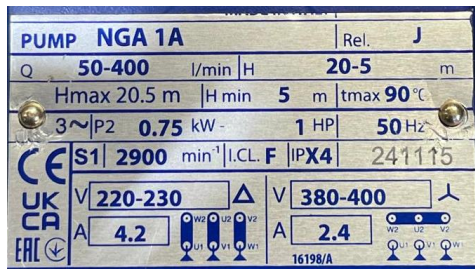


Imagen 4.11: Placa de bomba Pedrollo NGA 1A

4.4 Presupuesto

El presupuesto destinado a la construcción del banco de ensayo se estructura con el objetivo de asegurar la disponibilidad de los recursos necesarios para su correcta implementación y funcionalidad experimental. La inversión total estimada asciende a \$4.000.000 CLP, monto que se distribuye estratégicamente entre la adquisición de los equipos principales, la compra de materiales complementarios, la contratación de servicios de fabricación de estructuras y la incorporación de dispositivos de medición que permiten garantizar la precisión en el monitoreo de parámetros críticos.

Dentro del presupuesto, uno de los principales focos corresponde a la adquisición de los componentes esenciales para la operatividad del sistema, siendo la bomba centrífuga y el flujómetro electromagnético los elementos de mayor inversión. La bomba centrífuga constituye el núcleo operativo del banco de ensayo al generar el flujo necesario para el transporte de sólidos, mientras que el flujómetro electromagnético permite la medición precisa y continua del caudal, condición indispensable para obtener datos confiables durante los ensayos experimentales. Ambos equipos se seleccionan considerando criterios de precisión, compatibilidad hidráulica, disponibilidad local y relación costo-beneficio, aspectos fundamentales en el contexto de un diseño condicionado por restricciones presupuestarias.

Respecto a la fabricación estructural, se realizan inversiones específicas en estructuras diseñadas para proporcionar soporte, estabilidad y funcionalidad al sistema. En este ámbito

se incluye la mesa plegable, que cumple la función de plataforma principal para el montaje del banco, facilitando su transporte y ensamblaje modular.

Asimismo, se diseñan soportes estructurales reforzados destinados a sostener componentes críticos tales como las tuberías abatibles, el silo de acrílico, la bomba y la línea de descarga. Estas estructuras son fabricadas por terceros bajo criterios de durabilidad, geometría funcional y facilidad de montaje en terreno.

Se incorporan al diseño tuberías de acrílico, seleccionadas por su transparencia, propiedad que permite la observación directa del comportamiento del flujo y de la sedimentación de partículas durante los ensayos, favoreciendo así la interpretación experimental. Esta decisión técnica responde tanto a criterios de observabilidad como a la necesidad de utilizar materiales capaces de soportar presiones moderadas sin comprometer la seguridad ni la continuidad del flujo.

Asimismo, se consideran los costos asociados a la adquisición de partículas de ensayo, las cuales se importan desde Estados Unidos debido a la inexistencia de un producto nacional que cumpla con las propiedades físicas requeridas, principalmente en cuanto a densidad y forma esférica, para representar con precisión los fenómenos de sedimentación. La compra incluye también conexiones para tuberías transparentes, adquiridas a través de la plataforma AliExpress, permitiendo de este modo optimizar los recursos económicos sin afectar la compatibilidad ni la funcionalidad del sistema hidráulico.

El presupuesto contempla además ítems frecuentemente subestimados en este tipo de desarrollos, tales como materiales auxiliares de ensamblaje (pegamento vinilit, sellos y cuerdas), herramientas de montaje y costos logísticos relacionados al transporte de materiales y componentes provenientes de diversos proveedores.

4.4.1 Lista de materiales

La lista de materiales correspondiente al banco de ensayo se encuentra estructurada considerando la totalidad de los componentes requeridos para garantizar su operación

hidráulica, estructural y eléctrica de forma integrada, segura y eficiente. Cada uno de los elementos seleccionados responde a criterios técnicos definidos, orientados a posibilitar la ejecución de ensayos controlados, la obtención precisa de variables experimentales y la estabilidad funcional del sistema. A continuación, se detalla la descripción técnica de los principales materiales que conforman el banco de pruebas.

Se establece el sistema de **conducción primaria y secundaria de flujo**, conformado por tuberías de acrílico en diámetros de 50 mm y 40 mm. La selección de estos componentes obedece a su adecuada resistencia mecánica, compatibilidad con conexiones normalizadas y, principalmente, a la propiedad de transparencia del material, la cual permite observar los fenómenos de flujo y sedimentación de partículas durante el desarrollo de los ensayos. Estas tuberías definen el trayecto principal de circulación del fluido dentro del sistema de pruebas.

El conjunto de **conexiones y accesorios asociados al sistema de tuberías**, los cuales cumplen funciones de direccionamiento, distribución y enlace de los caudales de agua y partículas en suspensión. Dicho conjunto comprende codos de 90° de 50 mm, codos de 45° de 40 mm, uniones en T (TEE) de 50 mm, uniones americanas de 50 mm y 40 mm, bujes reductores de 50 a 40 mm, y uniones giratorias empleadas en las secciones abatibles de las tuberías, permitiendo la modificación controlada de los ángulos de inclinación según lo requerido por el protocolo experimental. Asimismo, se integran terminales de unión y válvulas de control de bola.

Se incorporan **bridas de PVC** con el propósito de establecer la conexión entre las tuberías del sistema y el flujómetro electromagnético, el cual requiere este tipo de unión para garantizar una instalación adecuada y segura. Todos los accesorios han sido seleccionados considerando su compatibilidad dimensional y funcional con la configuración modular del banco de ensayo, asegurando una correcta integración entre componentes y facilitando el ensamblaje, mantenimiento y operación del sistema.

Cabe señalar que los **elementos de acrílico y policarbonato** han sido adquiridos a través de la plataforma AliExpress, lo que ha permitido optimizar los costos de adquisición sin comprometer la funcionalidad ni la integridad estructural del sistema. En tanto, el resto de los accesorios y componentes fueron obtenidos mediante proveedores nacionales especializados, asegurando la calidad, compatibilidad y disponibilidad necesaria para el ensamblaje y operación del banco de ensayo.

En relación con los sistemas de **instrumentación, medición y equipos hidráulicos**, se contempla la incorporación de dispositivos destinados al monitoreo y control de las variables hidráulicas relevantes para el funcionamiento del banco de ensayo. Este conjunto incluye una bomba centrífuga Pedrollo NGA 1A, encargada de generar el caudal y presión necesarios para el transporte de partículas en suspensión; un flujómetro electromagnético, cuya tecnología permite una medición precisa del caudal mediante la detección de campos magnéticos inducidos por el paso del fluido; y un manómetro, utilizado para la lectura y supervisión de la presión interna del circuito hidráulico. La integración de estos equipos permite una caracterización detallada del sistema en condiciones controladas, facilitando el análisis experimental de los fenómenos asociados al flujo bifásico.

El sistema eléctrico y de automatización agrupa los componentes responsables del suministro, control y protección del circuito eléctrico general del banco de ensayo. Este subsistema integra un variador de frecuencia, el cual permite ajustar la velocidad de operación de la bomba, modificando así el caudal de trabajo en función de los requerimientos experimentales. Asimismo, incorpora una fuente de poder de 220 VAC a 24 VDC, destinada a la alimentación del flujómetro electromagnético, y un interruptor automático, encargado de habilitar o interrumpir el flujo eléctrico durante condiciones normales de operación o actividades de mantenimiento. Finalmente, se incluye un guardamotor, cuya función es proteger el equipo motriz ante sobrecargas, cortocircuitos o fallas eléctricas, asegurando la continuidad operativa del sistema con un adecuado nivel de seguridad.

Adicionalmente, se consideran las partículas sólidas utilizadas en la simulación del transporte de sólidos en suspensión, las cuales presentan diámetros de 2,2 mm, 3 mm y 3,7 mm,

respectivamente. Estos elementos fueron seleccionados con el objetivo de representar distintos tamaños característicos de material particulado en condiciones controladas de ensayo. La totalidad de los componentes empleados puede ser revisada en el Anexo C, donde se incluyen imágenes de cada adquisición realizada, así como de las estructuras fabricadas especialmente para la implementación del banco. A continuación, se presenta la Tabla 4.13 resumen con la distribución detallada del presupuesto, expresado en pesos chilenos, segmentado por ítem.

Tabla 4.13: Presupuesto para banco de ensayo

Ítem	Marca	Descripción	Costo
Bomba Centrifuga	Pedrollo NGA 1A	Equipo principal para entregar caudal al sistema.	\$342.916
Flujómetro electromagnético	Delind DN40	Caudalímetro para medición precisa en flujos bifásicos.	\$909.505
Variador de frecuencia	PumpDrive 2 eco KSB	Control de la velocidad de giro de la bomba	\$673.474
Mesa plegable	IPF	Soporte al banco de ensayo	\$420.000
Soportes estructurales	IPF	Garantizar la estabilidad de los elementos del banco de ensayo. (Soporte descarga, Silo de acrílico y perfiles para tubería abatible)	\$296.200
Partículas de ensayo	Jewelry	Material experimental importado desde EE. UU. De 2,2 mm, 3 mm y 3,7 mm	\$321.413
Manómetro	edr	Medido de presión dentro del sistema	\$21.551
Conexiones de tubería transparente.	Garden Daily	Adquiridas de AliExpress (Codos, tee y uniones americanas)	\$326.733
Conexiones de tubería no transparentes	Hoffens	Adquiridas en tiendas Easy y Sodimac.	\$32.500
Válvulas de bola	KSB	Válvulas para regular el paso del flujo entregado, de 40 mm y 50 mm	\$72.190

Tubería de acrílico DN50	Norglas	Tuberías del banco de ensayo de 50.8 mm	\$285.529
Tubería de acrílico DN40	Norglas	Sistema de tuberías del banco de ensayo 40 mm	\$50.590
Extras	-	Compras necesarias como pegamento Vinilit y la cuerda para las tuberías abatibles	\$30.000
Total	-	Monto total	\$3.782.601

4.4.2 Fabricación

Todas las estructuras de soporte empleadas en la construcción del banco de ensayo, incluyendo la mesa principal, el soporte del silo, la estructura de apoyo en la zona de descarga del sistema de tuberías, los perfiles metálicos que permiten el soporte y articulación de las tuberías abatibles, así como el soporte de la bomba, son diseñadas y fabricadas a medida por la empresa IPF. Dicha empresa se selecciona en función de su experiencia y respaldo como proveedor habitual de estructuras para KSB.

4.4.2.1 Mesa abatible

En la fabricación de la mesa se desarrolla el modelo correspondiente junto con los cálculos estructurales necesarios para asegurar que la estructura sea capaz de soportar el peso total de los componentes del banco de ensayo durante su operación. Una vez finalizado el proceso de diseño, se elabora el plano técnico de la mesa abatible, el cual se encuentra disponible en el Planos de fabricación.

Luego de un período de cuatro semanas, la mesa es entregada en el área de producción de la empresa, siendo despachada por el proveedor. Durante este período, se realizan diversas modificaciones al plano original, las cuales resultan necesarias para ajustar el diseño a los requerimientos específicos del proyecto y optimizar determinados aspectos técnicos del producto. La llegada de la mesa al área de producción representa el cumplimiento de una etapa clave dentro del proceso, iniciando la fase de ensamblaje del banco de ensayo.



Imagen 4.6: Mesa abatible

4.4.2.2 Soporte de silo

El envío del plano de fabricación resulta un paso fundamental para transformar el modelo conceptual en una estructura física, funcional y operativa, destinada al soporte del silo. Este proceso, que abarca desde el diseño hasta la fabricación, permite asegurar que el producto final cumpla con los criterios de resistencia, estabilidad y adaptabilidad requeridos para su correcto desempeño dentro del sistema.



Imagen 4.7: Soporte silo con silo de acrílico

El producto final del soporte del silo, una vez completada su fabricación, presenta una estructura robusta y funcional que cumple con todos los requisitos técnicos establecidos en el diseño y el plano. Fabricado con perfiles de acero angular de 20x20 mm y equipado con niveladores ajustables (M12x100mm), el soporte proporciona una base estable y ajustable que asegura una correcta instalación en diversas superficies.

El acabado en color azul, coherente con la identidad de la marca, refuerza tanto su estética como su resistencia. Además, las patas con pies de goma contribuyen a reducir las vibraciones y mejorar la estabilidad del equipo. Este soporte está diseñado para ofrecer una larga durabilidad, garantizando la integridad del silo durante su uso, y asegurando que cumpla con los estándares de calidad y seguridad necesarios para su integración en el proceso productivo.

4.4.2.3 Soporte válvula de descarga

El plano del soporte de válvula de descarga contiene especificaciones exactas sobre las dimensiones, el tipo de material, los ángulos de corte, así como cualquier otro detalle necesario para la construcción del soporte, es una representación precisa del diseño, que guía a los operarios en el proceso de fabricación. Al ser completado y validado, el plano se envía a IPF, garantizando que todos los aspectos del diseño sean cumplidos con exactitud. En el Planos de fabricación se puede observar dicho plano.

Una vez finalizado el proceso de fabricación, y conforme a las especificaciones indicadas en el plano del soporte de la válvula de descarga, se procede con su instalación dentro del banco de ensayo. A continuación, se presenta el resultado final de la estructura montada, integrada al sistema completo del banco de ensayo y conducción del fluido, evidenciando su correcta adaptación a la configuración general del banco.



Imagen 4.8: Soporte vertical de válvula

4.4.2.4 Soporte tuberías abatibles

El diseño del soporte de tuberías abatible concluye con la elaboración de un plano técnico detallado, en el cual se establecen con precisión las especificaciones necesarias para su fabricación. Este plano define las dimensiones de los perfiles estructurales, incluyendo un perfil cuadrado de 50×50×1,5 mm, junto con las características de los elementos móviles, tales como las poleas superior e inferior.

Además, se incluyen las indicaciones correspondientes a los componentes adicionales que permiten el funcionamiento del mecanismo abatible, entre ellos las bisagras, la rueda mecanizada y la manivela, todos seleccionados en función de su rol estructural y operativo. Estos elementos pueden ser revisados en el Planos de fabricación, donde se presenta el plano completo. El diseño contempla una tolerancia general de ± 1 mm, con el fin de asegurar que cada componente fabricado se ajuste adecuadamente dentro de los márgenes de precisión requeridos para garantizar la correcta operatividad del conjunto.

Una vez completado el desarrollo de los planos técnicos y finalizado el proceso de fabricación, se avanza a la integración física del soporte en el banco de ensayo. A continuación, se presenta la estructura del soporte de tubería abatible ya fabricada e instalada, evidenciando cómo el diseño previamente especificado se concreta en un componente funcional dentro del sistema experimental.



Imagen 4.9: Estructura tubería abatible

4.4.2.5 Soporte Bomba

El proceso de diseño del soporte culmina con la elaboración del plano técnico detallado que establece las dimensiones y características de la estructura del soporte de bomba. En este plano se especifica el uso de un perfil de acero laminado de 250×250×10 mm, junto con las perforaciones de 10 mm de diámetro destinadas a los puntos de fijación, y la incorporación de radios de 5 mm en las esquinas, facilitando el ensamblaje y garantizando el correcto acoplamiento de los componentes.

Asimismo, se definen las tolerancias de fabricación con un margen de $\pm 0,1$ mm, asegurando que la pieza se fabrique con el nivel de precisión requerido para satisfacer las condiciones operativas previstas. Este plano actúa como una guía fundamental durante el proceso de fabricación, permitiendo que todas las especificaciones del diseño se transfieran de manera exacta al producto final.

La estructura fue fabricada en acero laminado, tal como se especifica en el diseño, y los orificios de fijación fueron perforados a la medida exacta para garantizar un montaje seguro y eficiente. Finalmente, la pieza fue protegida con plástico, asegurando su integridad durante el transporte y almacenamiento previo a su instalación.



Imagen 4.10: Estructura soporte de bomba

4.4.2.6 Silo de acrílico

El plano técnico del silo acrílico se desarrolla a partir de la conceptualización y las especificaciones previamente definidas, las cuales se exponen en el apartado de diseño del presente informe. Este plano, centrado en los aspectos fundamentales de la pieza, establece con precisión las dimensiones de la estructura, considerando una base de 500×500 mm y una altura total de 516 mm. Además, se detallan características clave como los ángulos de $65,77^\circ$ en las paredes laterales y los diámetros de los orificios de fijación, siendo 50 mm en la base y 44 mm en la parte superior, todas estas cotas se pueden observar en el Planos de fabricación.

Una vez aprobado el plano, se envía a AMG4PRO, proveedor habitual encargado de la fabricación de estructuras. En el taller de producción se desarrollan todas las etapas necesarias, incluyendo el corte, ensamblaje y perforación de los componentes, siguiendo con precisión las especificaciones definidas en el plano técnico. El material acrílico es trabajado

cuidadosamente para asegurar que las paredes laterales presenten la inclinación correcta, garantizando así la funcionalidad estructural y la impermeabilidad requerida para evitar filtraciones durante el funcionamiento del sistema.



Imagen 4.11: Silo de acrílico

La pieza fabricada se produce conforme a todas las especificaciones definidas en el plano técnico, lo que asegura el cumplimiento de los requisitos de funcionalidad y calidad establecidos en el diseño. La estructura final, compuesta por un silo acrílico montado sobre una base metálica pintada de azul, se encuentra lista para su integración en el sistema de manejo de materiales. El empleo de acrílico permite tanto la visualización directa del contenido como la obtención de una estructura ligera y resistente. Con todas las especificaciones cumplidas y el proceso de fabricación ejecutado con precisión, el silo queda preparado para ser incorporado de forma eficiente al sistema, garantizando su operación confiable y duradera.

4.5 Armado

Con la totalidad de los implementos, componentes estructurales, hidráulicos y eléctricos necesarios para la construcción del banco de ensayo, el área de producción asume el proceso completo de ensamblaje, ejecutando cada etapa desde cero según lo establecido en el diseño técnico. Durante este proceso, se realiza la integración progresiva de todos los elementos, lo que comprende tanto el montaje físico de la bomba, las tuberías, la estructura metálica, la instrumentación y los dispositivos eléctricos, como la adaptación precisa de cada componente dentro del espacio asignado. Cada elemento es presentado respetando las dimensiones y disposiciones especificadas en el plano general del banco de ensayo, lo que garantiza un ajuste preciso y ordenado del conjunto, el plano completo se puede observar en el Planos de fabricación.



Imagen 4.12: Armado previo del banco de ensayo

El área de producción cumple un rol clave en la identificación y ejecución de las modificaciones técnicas que surgen durante el proceso de armado, abordando ajustes dimensionales, mejoras funcionales y adaptaciones necesarias para optimizar la operatividad del sistema. Gracias a su conocimiento técnico y experiencia, logra desarrollar un banco de ensayo completamente operativo, con un alto nivel de integración entre sus componentes y en concordancia con los objetivos experimentales definidos desde el inicio del proyecto.



Imagen 4.13: Banco de ensayo Clear loop

Una vez finalizadas todas las etapas de ensamblaje y verificación de funcionamiento, se obtiene la configuración definitiva del banco de ensayo Clear Loop, el cual refleja el resultado exitoso del proceso de fabricación, permitiendo visualizar de forma clara el circuito hidráulico completo y facilitando las futuras pruebas operacionales.

Concluyendo, el banco de ensayo se presenta como una herramienta de aprendizaje y demostración altamente funcional, específicamente diseñada para la visualización del transporte de sólidos en suspensión. Gracias a su configuración transparente y modular, permite observar el comportamiento del flujo bifásico, identificar patrones de sedimentación o acumulación, y analizar en tiempo real la interacción dinámica entre los sólidos y el agua.

5. Mediciones experimentales

El siguiente capítulo se describe como realizar los ensayos prácticos que permiten estudiar los diferentes fenómenos que se producen en el flujo de pulpa que ya fueron descritos en las sesiones anteriores. Se comienza por la descripción de los instrumentos necesarios, siguiendo por la preparación del banco de pruebas antes de realizar un ensayo. Para terminar

proponiendo un plan de medición para observar y estudiar los diferentes ensayos que son posibles realizar en el ensayo construido.

5.1 Instrumentos de medición del banco de pruebas

Flujómetro electromagnético: Dispositivo encargado de medir el caudal del fluido transportador, lo que permite mantener un control preciso del flujo durante el ensayo. Esta medición resulta fundamental para evaluar la influencia del caudal en los procesos de sedimentación de los sólidos en suspensión, asegurando la repetibilidad y validez de las condiciones experimentales.



Imagen 5.1: Flujómetro electromagnético DN40 Delind

Goniómetro con nivel: Instrumento utilizado para medir la inclinación de las tuberías abatibles respecto a la horizontal. Esta medición permite establecer con precisión el ángulo de trabajo en cada ensayo, lo cual influye directamente en la velocidad del flujo, la disposición del lecho y los procesos de sedimentación y transporte de partículas.



Imagen 5.2: Goniómetro

Manómetro: Instrumento encargado de medir la presión a la salida de la bomba, entregando información relevante sobre las condiciones hidrodinámicas del sistema. Estos datos permiten analizar cómo la presión del flujo influye en los procesos de sedimentación, contribuyendo a una mejor comprensión del comportamiento del transporte de sólidos en suspensión.



Imagen 5.3: Manómetro de 10 bar (EDR, s.f.)

Variador de frecuencia: Dispositivo encargado de regular la velocidad de rotación de la bomba, lo que permite ajustar el caudal del sistema según los requerimientos del ensayo. Su uso facilita el análisis del comportamiento de los sólidos en suspensión bajo distintas velocidades de flujo, y cómo estas condiciones afectan los procesos de sedimentación dentro del circuito hidráulico.



Imagen 5.4: Variador de frecuencia Pumpdrive 2 Eco

El **banco de ensayo** está diseñado para ejecutar **tres modalidades experimentales distintas**, cada una de ellas asociada a una configuración específica de **válvulas**, **velocidad del motor (RPM)** e **inclinación de las tuberías abatibles**. Estas variantes permiten observar, comparar y analizar distintos regímenes de flujo, así como fenómenos asociados a la sedimentación, la formación de lecho móvil y el transporte total de partículas, proporcionando una base experimental versátil para el estudio del comportamiento hidráulico de mezclas bifásicas.

5.2 Condiciones de operación antes de puesta en marcha

Antes de iniciar las pruebas, se procede al llenado de las tuberías abriendo completamente las válvulas VA y VB, con el objetivo de asegurar que todo el circuito quede completamente lleno de agua, hasta que el nivel del líquido en el silo alcance la marca de referencia, como se muestra a continuación.

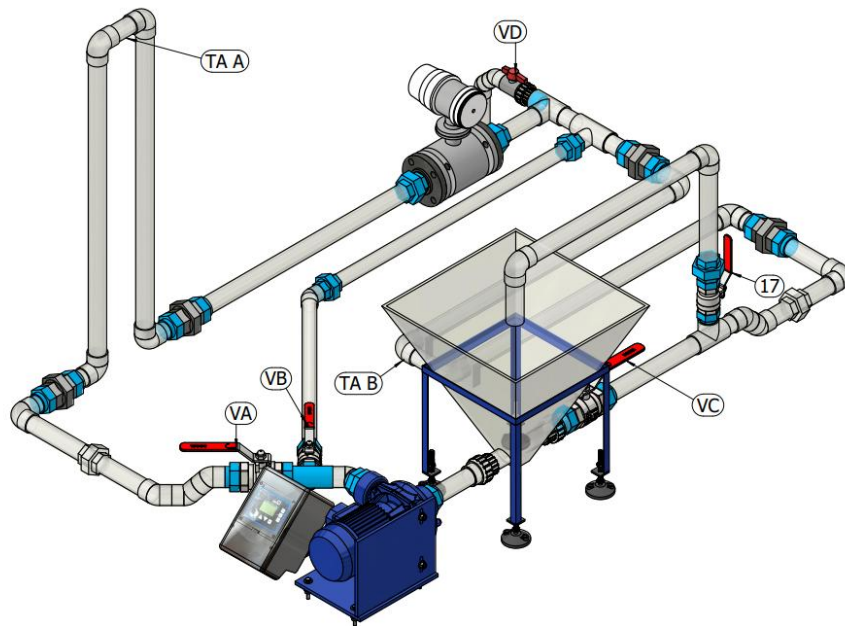


Imagen 5.5: Disposición banco de ensayo



Imagen 5.6: Nivel de agua en silo

Luego, se procede a encender la bomba únicamente con agua, permitiendo que el caudal generado desplace el aire residual contenido en las tuberías y llene completamente el circuito hidráulico. Una vez verificado que todo el sistema se encuentra completamente lleno, se incorporan los sólidos de distintos diámetros, los cuales se ilustran en la Imagen 6. 23. Durante este proceso, se mantiene una velocidad constante en la bomba, lo que favorece la

adecuada dispersión y mezcla heterogénea de las partículas en el interior del sistema de tuberías, asegurando condiciones homogéneas de operación.

Transcurrido un período superior a cinco minutos, considerado suficiente para alcanzar la estabilización de las condiciones hidráulicas y permitir el comportamiento representativo de las partículas en suspensión, se inicia la etapa de medición experimental. En esta fase, se realizan los ajustes necesarios sobre las variables de operación, tales como la velocidad de rotación de la bomba y los ángulos de inclinación de las tuberías abatibles, con el propósito de analizar y observar los distintos fenómenos hidráulicos que se generan en el banco de ensayo bajo diversas configuraciones de trabajo.

5.3 Plan de medición

El plan de medición completo, incluyendo las variables controladas, los procedimientos experimentales y los parámetros de análisis definidos para el desarrollo de los ensayos, se presenta de manera detallada en las siguientes secciones.

5.3.1 Tabla de puntuación de sedimentación

Dentro del plan de medición establecido para este proyecto, se implementa un sistema de puntuación que permite clasificar los distintos regímenes de transporte de partículas observados durante los ensayos. Este sistema resulta especialmente útil, ya que transforma las observaciones cualitativas del comportamiento del flujo en valores numéricos estandarizados, lo que facilita el registro ordenado de los resultados y su comparación entre las diferentes configuraciones evaluadas.

La puntuación de sedimentación en tubería horizontal se define en función de cuatro categorías principales: **1**, cuando las partículas permanecen **completamente estancadas**, sin evidencia de transporte o **lecho móvil**; **2**, cuando se observa un **flujo de lecho estacionario**; **3**, cuando el flujo presenta un **lecho con dunas**, donde las partículas se desplazan manteniendo contacto parcial con el fondo de la tubería en forma de montículos; y **4**, cuando

se alcanza un **transporte en suspensión**, en el cual las partículas son trasladadas sin contacto con el fondo, indicando un régimen de flujo altamente eficiente.

Tabla 5.1: Puntuación de régimen de transporte en tubería horizontal

Puntuación	Descripción del régimen de transporte
1	Lecho móvil, sin movimiento observable ni arrastre,
2	Lecho estacionario, partículas desplazándose por encima de la capa que está en el fondo.
3	Flujo con dunas, transporte en forma de montículos
4	Transporte en suspensión, partículas completamente en movimiento, sin contacto con fondo

La aplicación de la Tabla 5.1 permite registrar las condiciones experimentales de forma precisa, generando datos consistentes para el análisis posterior. Su inclusión fortalece la interpretación comparativa de los resultados.

5.3.2 Ensayo de circuito completo

Este ensayo tiene por objetivo observar el comportamiento integral del sistema hidráulico operando con flujo sin restricciones, evaluando la transición entre distintos regímenes de transporte de partículas: desde sedimentación total, pasando por flujo estacionario y lecho con dunas, hasta alcanzar una suspensión completa. Al habilitarse todo el circuito, se permite estudiar el efecto combinado de las diferentes velocidades del flujo que se dan en ambas tuberías (50mm y 40mm). La progresión de velocidades facilita identificar umbrales críticos de arrastre, formación de dunas y regímenes de suspensión.

Condiciones que no deben modificarse durante el ensayo:

- Las válvulas A, B y C debe permanecer completamente abierta durante toda la duración del ensayo.
- Las válvulas D y E deben permanecer completamente cerradas.

- El nivel de agua en el silo debe mantenerse constante, alineado con la marca de referencia en el cuerpo del silo (Imagen 5.6: Nivel de agua en silo).
- La tubería abatible A debe mantenerse en posición horizontal (90° respecto al suelo) durante todo el ensayo.
- La tubería abatible B debe mantenerse fija con una inclinación de 45° durante toda la prueba.

Una vez definidas las condiciones que deben permanecer constantes durante todo el desarrollo del ensayo, se procede a ejecutar una serie de pasos estructurados que aseguran la correcta implementación de la prueba.

Cada etapa está orientada a mantener la estabilidad del sistema y permitir la recolección de datos confiables, garantizando que cualquier variación en el comportamiento observado sea atribuible exclusivamente al parámetro en estudio: la velocidad del motor.

A continuación se mostrarán los pasos a seguir para poder completar de manera efectiva el ensayo con el circuito completamente abierto del banco de ensayo.

1. Inicie el ensayo con velocidad mínima de bomba:

- Encienda la bomba e inicie el ensayo con una velocidad de 600 [rpm] marcadas en el variador de frecuencia. Esta velocidad corresponde al límite inferior del rango operativo, permitiendo observar el comportamiento de las partículas bajo condiciones de baja presión. En esta etapa, es común observar la formación de un lecho móvil o acumulación incipiente de partículas, especialmente en los tramos horizontales, sin transporte de sólidos.

2. Incremente progresivamente la velocidad de giro de la bomba:

- Aumente la velocidad del motor en intervalos de 100 [rpm], avanzando desde 600 [rpm] hasta 1600 [rpm]. En cada etapa de velocidad, mida el caudal con el flujómetro,

observe el régimen de flujo en ambas tuberías y documente si las partículas permanecen en reposo, se desplazan en forma de dunas o transportadas en suspensión.

3. Documente visualmente los cambios de régimen:

- En cada velocidad de giro, registre con fotografías o video el comportamiento del flujo y las partículas, en especial en las zonas de transición entre regímenes de transporte. Anote cualquier fenómeno relevante como zonas muertas, recirculaciones o velocidad diferencial de partículas según diámetro de tubería.

4. Finaliza el ensayo y detenga el sistema:

- Una vez alcanzado el máximo de velocidad requerido, registre los datos necesarios y detenga la bomba de forma progresiva para evitar golpes hidráulicos. Retire con cuidado cualquier acumulación residual de partículas, asegurando que el sistema quede limpio para próximos ensayos, procurando el guardado de partículas.

5. Procesar los datos y analizar resultados:

- Clasifique los regímenes observados de 1 a 4 según la Tabla 5.1: Puntuación de régimen de transporte y compara el desempeño hidráulico entre los dos tramos. Esta información permitirá establecer umbrales operativos para distintos regímenes de flujo y validar modelos teóricos de transporte de partículas.

Este ensayo permite caracterizar el comportamiento integral del sistema hidráulico, proporcionando una base de referencia para los ensayos posteriores. Los resultados obtenidos en esta etapa inicial pueden ser comparados con el modelo teórico, lo que facilita la validación de los supuestos hidráulicos y permite ajustar parámetros en función de las observaciones experimentales.

5.3.3 Ensayo con derivación parcial

Este ensayo tiene por objetivo analizar el comportamiento del flujo a una sola rama del circuito. Esta configuración permite estudiar con mayor precisión los fenómenos de sedimentación localizada, estancamiento, formación de lecho móvil, con dunas y

estacionario, además de zonas críticas de baja eficiencia, considerando que el flujómetro medirá de manera precisa la velocidad del flujo.

Condiciones que no deben modificarse durante el ensayo:

- Las válvulas A y C debe permanecer completamente abierta durante todo el ensayo
- Las válvulas B, D y E deben permanecer completamente cerradas.
- La inclinación de las tuberías se mantiene constante: Tubería abatible A debe estar completamente horizontal (90°) y la Tubería abatible B debe mantenerse fija a 45° de inclinación.

Una vez establecidas las condiciones que deben permanecer constantes, se procede a la ejecución secuencial del ensayo. Cada uno de los pasos descritos a continuación está diseñado para garantizar que el fluido se mantenga controlado, y que las observaciones realizadas reflejen únicamente los efectos de la velocidad del flujo sobre el transporte de partículas.

- 1. Iniciar el ensayo con velocidad mínima:** Encienda la bomba y ajuste a una velocidad inicial de 300 [rpm]. Esta velocidad representa una condición crítica donde es común observar flujo móvil estancado sin transporte de sólidos.
- 2. Incrementar la velocidad de giro la bomba en forma progresiva:** Aumente la velocidad en intervalos de 100 [rpm], hasta alcanzar los 2700 [rpm]. En cada etapa, registre el caudal mediante el flujómetro, documente el régimen de flujo y observe visualmente si se produce movilización de partículas, formación de lecho móvil o suspensión parcial. Anote los cambios observados en cada tramo de la instalación.
- 3. Identificar la velocidad mínima de transporte:** Durante la progresión de velocidades, determine el punto en el que las partículas dejen de estar detenidas o agrupadas y comienzan a desplazarse de manera continua. Esta condición representa la velocidad mínima de arrastre efectiva y debe ser registrada con precisión, ya que constituye un parámetro clave para el análisis comparativo y la validación de modelos teóricos.

4. **Documentar visualmente los fenómenos observados:** Registre mediante fotografías o video los distintos comportamientos del flujo en cada punto de velocidad. Especialmente donde las partículas tienden a acumularse, generar recirculaciones o desplazarse de forma intermitente. Esta documentación visual permite respaldar y contrastar las observaciones anotadas en la planilla de datos.
5. **Finalizar el ensayo y cerrar el sistema:** Una vez alcanzada la velocidad máxima y completadas todas las observaciones, detenga el motor progresivamente. Cierre la válvula A y realice una limpieza del sistema si es necesario para retirar residuos o acumulaciones.
6. **Procesar los datos y analizar resultados:** Con los caudales registrados y las velocidades aplicadas, compare los puntos de inicio de sedimentación y de arrastre con estimaciones teóricas. Este análisis permite identificar condiciones críticas del sistema y optimizar su desempeño en escenarios reales de operación parcial o carga reducida.

5.3.4 Ensayo con inclinación variable a diferentes caudales

El ensayo con inclinación variable tiene como objetivo analizar la influencia de la pendiente de la tubería en el comportamiento del transporte de partículas dentro del sistema hidráulico. Para ello, se varían progresivamente tanto los ángulos de inclinación como las velocidades del motor, lo que permite identificar las condiciones bajo las cuales se manifiestan distintos regímenes de flujo, tales como recirculación, lecho móvil, lecho estacionario, formación de dunas y transporte en suspensión. Este procedimiento proporciona información clave para comprender la dinámica del flujo bifásico en función de la geometría y la energía del sistema.

Condiciones que no deben modificarse una vez iniciado el ensayo:

- La válvula A y C debe permanecer abierta durante toda la duración del ensayo.
- Todas las demás válvulas (B, D y E) deben permanecer cerradas completamente.
- La tubería abatible A permanece en posición horizontal (90°) durante todo el ensayo

Este ensayo representa una etapa clave para la comprensión de los mecanismos de sedimentación y transporte de partículas en sistemas inclinados, fenómeno ampliamente observado en aplicaciones industriales como minería, dragado y saneamiento. Al modificar la pendiente de la tubería, se alteran tanto las condiciones hidráulicas como la distribución de velocidades dentro del flujo, lo que repercute directamente en la interacción entre las partículas y el lecho. También permite establecer correlaciones entre el ángulo de inclinación, la velocidad crítica del fluido y la transición entre distintos regímenes de transporte sólido, A continuación se muestra los pasos a seguir para poder realizar este ensayo:

1. **Configurar la velocidad inicial del motor:** Se ajusta el motor a una velocidad inicial de 500 [rpm]. Esta velocidad se mantiene constante mientras se evalúan los diferentes ángulos de inclinación. Se debe registrar el caudal inicial mediante el flujómetro y documentar visualmente el comportamiento del flujo.
2. **Modificar progresivamente la inclinación de la tubería abatible B:** Se comienza con la tubería abatible B a 15° y se incrementa la inclinación en ángulos de 15° (30°, 45°, 60°, 75°) con respecto a la horizontal, registrando en cada etapa las observaciones sobre la suspensión, recirculación o transporte de partículas. Es crucial anotar las condiciones específicas en las que se observa un cambio en el régimen de flujo.
3. **Incrementar la velocidad del motor y repetir el ciclo angular:** Una vez completada la secuencia de inclinaciones a 500 [rpm], se aumenta la velocidad del motor a 600 [rpm] y se reinicia la variación angular desde 0° hasta 75°. Este proceso se repite para velocidades sucesivas de 700, 800, 900, 1000, 1100 y 1200 [rpm].
4. **Registrar datos y documentar visualmente cada condición:** En cada combinación de velocidad e inclinación, se deben registrar los caudales, documentar las observaciones visuales mediante fotografías o videos, y anotar los fenómenos de transporte presentes, como acumulación, recirculación o transporte efectivo.

5. **Finalizar el ensayo y cerrar el sistema:** Al completar todas las combinaciones de velocidad e inclinación, se detiene progresivamente el motor y se cierran las válvulas abiertas. Finalmente, se procede a limpiar el sistema si es necesario y guardar las partículas.

5.3.5 Ensayo demostrativo de aireación

Este ensayo está orientado a demostrar el fenómeno de aireación en sistemas de transporte de partícula, específicamente la formación y ascenso de burbujas de aire en el flujo, y cómo estas afectan negativamente la eficiencia hidráulica y el transporte de sólidos. La presencia de aire en la succión de la bomba puede provocar una pérdida parcial de presión y velocidad, lo que se traduce en una disminución en la capacidad de arrastre de partículas.

Para ejecutar este ensayo, configure el sistema de la siguiente manera:

- La válvula C (VC) debe estar parcialmente abierta, en una posición de 45°, permitiendo la admisión controlada de partículas hacia el silo.
- La válvula D (VD) debe permanecer completamente abierta, asegurando la entrada libre de agua hacia el silo.
- La válvula B (VB) también debe estar abierta, con el fin de poder captar el fenómeno con mayor control del flujo.

Con estas condiciones establecidas, encienda la bomba y ajuste la velocidad del motor dentro del rango de 1300 a 1800 RPM. Este ajuste de velocidad es necesario, ya que el análisis del efecto buscado requiere evaluar el comportamiento del sistema en diferentes velocidades de rotación, no siendo suficiente realizar el ensayo a una única velocidad. Durante el ensayo, se observa en la tubería abatible A que las burbujas ascienden rápidamente por el tramo, mientras que las partículas sólidas tienden a estancarse en toda la tubería.

5.4 Resultados y análisis

A continuación, se presentan imágenes desde donde se realizarán las observaciones de los diferentes ensayos junto con los resultados obtenidos y sus respectivos análisis.

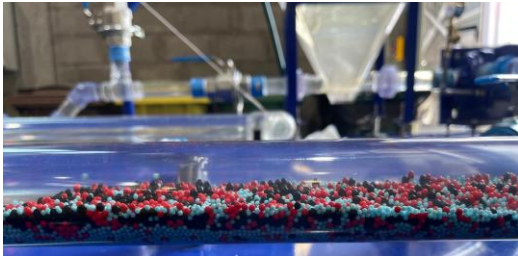


Imagen 5.7: Tubería horizontal DN50 y DN40

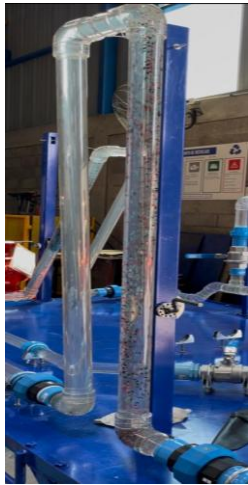


Imagen 5.8: Tubería abatible A y B

Se presenta la Imagen 5.7: Tubería horizontal DN50 y DN40 , con el fin de ilustrar los puntos específicos del sistema donde se realizan las observaciones durante el ensayo con el circuito completamente abierto.

5.4.1 Circuito completo

El ensayo con el circuito completo permite verificar los distintos regímenes de transporte de sólidos al pasar desde una tubería de mayor diámetro a una de menor, observando cómo se modifica el comportamiento del flujo en función de esta transición. Adicionalmente, se evalúa el efecto que produce la convergencia de ambos caudales en la tubería abatible B, analizando cómo el aumento de caudal combinado influye en el transporte de partículas.

Tabla 5.2: Observación ensayo con circuito completo

RPM	Caudal [l/min]	Observación
600	25	A partir de 600 rpm, con 25 [l/min] en la tubería de 50mm, se observa un embancamiento total de partículas en la tubería horizontal , sin evidencias de transporte. En la tubería abatible A , dispuesta a 90° respecto a la horizontal, se presenta un embancamiento parcial, donde únicamente las partículas de menor tamaño (2,2 mm) logran movilizarse de manera intermitente. Por otro lado, en la tubería abatible B , inclinada a 45°, se desarrolla un lecho móvil, aunque se identifica acumulación de partículas en el sector del codo, lo que impide un transporte continuo y efectivo.
700	27,5	A 700 [rpm] con un caudal de 27,5 [l/min] el flujo en la tubería horizontal presenta un lecho estacionario con formación de dunas, evidenciando movimiento parcial de las partículas. En la tubería abatible A (90°), se observa un mayor levantamiento de partículas; sin embargo, estas no logran ascender completamente, generándose un patrón de recirculación en el tramo inferior. Por su parte, en la tubería abatible B (45°), se reduce el embancamiento en el sector del codo, aunque persiste recirculación de partículas en la zona más baja de la tubería.
800	30,2	A 800 RPM y con un caudal de 30,2 L/min, la tubería horizontal presenta un régimen de flujo mixto, combinando zonas de lecho estacionario con formación de dunas y un lecho móvil en una capa que se mantiene quieta, predominando esta última. En la tubería abatible A (90°), se observa un mayor levantamiento de partículas, aunque sin alcanzar un transporte, lo que genera recirculación en el tramo inferior. En la tubería abatible B (45°), se mantiene la recirculación de partículas, especialmente en el primer tramo del conducto.

900	33,5	A 900 [rpm] y con un caudal de 33,5 [l/min], se observa en la tubería horizontal un régimen de transporte de sólidos caracterizado por la formación de dunas en movimiento o lecho estacionario con un pequeño porcentaje en lecho móvil. En la tubería abatible B (45°), persiste una recirculación de partículas a lo largo de toda su extensión, lo que limita el arrastre continuo. Por otro lado, en la tubería abatible A (90°), comienza a evidenciarse un transporte efectivo de partículas ascendiendo por el tramo vertical.
1000	39,4	A 1000 [rpm] y con un caudal de 39,4 [l/min], se observa un régimen de transporte en lecho estacionario predominante en la tubería horizontal , aunque con mayor eficiencia de arrastre en comparación a los tramos inclinados. En la tubería abatible A (90°), se evidencia una reducción del embancamiento en la zona del codo, aunque el transporte de partículas aún no es continuo. En la tubería abatible B (45°), se mantiene una recirculación marcada, pero con presencia de partículas en movimiento.
1100	42,5	A 1100 rpm y con un caudal de 42,5 [l/min], la tubería horizontal mantiene un régimen de lecho estacionario, con partículas mayormente acumuladas en el fondo. En la tubería abatible A (90°), se observa una disminución del embancamiento en el codo y un aumento del transporte de partículas a lo largo del tramo vertical. Por su parte, en la tubería abatible B (45°), comienza a evidenciarse el movimiento de partículas, aunque aún predomina la recirculación sobre el transporte efectivo.
1200	47,7	A 1200 [rpm] y con un caudal de 47,7 [l/min], la tubería horizontal mantiene un régimen de transporte en forma de lecho estacionario, con partículas acumuladas en el fondo. En la tubería abatible A (90°), se observa una disminución del embancamiento en la zona del codo y un aumento en el transporte vertical de las partículas. Por su parte, la tubería

		abatible B (45°) presenta una reducción de la recirculación, favoreciendo un mayor arrastre y desplazamiento de las partículas a lo largo del tramo.
1300	52,9	A 1300 rpm y con un caudal de 52,9 [l/min], la tubería horizontal mantiene un régimen de lecho estacionario, con un arrastre de partículas más rápido pero de menor intensidad. En la tubería abatible A (90°), se observa un mayor transporte vertical y una reducción del embancamiento en la zona del codo. En la tubería abatible B (45°), persiste el transporte de partículas bajo un régimen de lecho estacionario, sin alcanzar la suspensión total. Este comportamiento se mantiene de manera constante hasta los 1500 rpm.
1600	69,5	A 1600 [rpm] y con un caudal de 69,7 [l/min] en la tubería horizontal de 50 mm, se observa un flujo con formación de dunas más rápidas en comparación con las revoluciones anteriores, aunque el régimen sigue siendo predominantemente de lecho móvil. En el codo de la tubería abatible A (90°), se evidencia un mayor transporte vertical de partículas, mientras que el embancamiento se reduce significativamente, limitado a las zonas donde ocurre el choque y cambio de dirección del flujo. Por su parte, la tubería abatible B (45°) presenta un transporte sostenido de partículas a lo largo de todo el tramo, este fenómeno ocurre hasta las 2900 revoluciones por minuto.

A continuación, se presentan los intervalos de clasificación para cada una de las tuberías, junto con las velocidades medias correspondientes a los puntos donde se observan cambios en el régimen de transporte de partículas. Estos rangos permiten identificar las transiciones entre los distintos estados del flujo, desde el lecho móvil hasta el transporte en suspensión, facilitando así la interpretación del comportamiento hidráulico en cada configuración. La comparación de estas velocidades con los valores teóricos de sedimentación permite evaluar la eficiencia del arrastre de partículas en función del caudal y la geometría del tramo, proporcionando una base técnica para validar el desempeño del sistema y entender las condiciones que favorecen o limitan el transporte continuo de sólidos.

Tabla 5.3: Clasificación de transición en transporte de sólidos en circuito completo

RPM	V_m DN40 [m/s]	V_m DN50 [m/s]	V_m T_A B [m/s]	T_H DN40	T_H DN50	T_A A	T_A B
700-800	0,83 – 0,97	0,30 – 0,33	1,13 – 1,31	2	1	1	1-2
800-900	0,97 – 1,11	0,33 – 0,37	1,31 – 1,47	2-3	1-2	1	2
900-1000	1,11 – 1,18	0,37 – 0,43	1,47 – 1,62	3	2	1-2	2-3
1100-1200	1,32 – 1,41	0,47 – 0,52	1,79 – 1,94	3	2	2-3	3
1600-1700	1,93 – 2,01	0,67 – 0,74	2,60 – 2,74	3-4	2-3	3	3-4
2200-2300	2,62 – 2,75	0,94 – 0,98	3,56 – 3,73	4	3	3-4	4

Es importante aclarar que **V_m DN40** corresponde a la velocidad media del flujo en la tubería con diámetro nominal 40 mm, mientras que **V_m DN50** representa la velocidad media en la tubería de diámetro nominal 50 mm. Por su parte, **V_m T_A B** hace referencia a la velocidad media en la tubería abatible B. En cuanto a las configuraciones horizontales, **T_H DN40** indica la tubería horizontal con diámetro 40 mm y **T_H DN50** la tubería horizontal con diámetro 50 mm. Finalmente, **T_A A** y **T_A B** designan las configuraciones de tubería abatible A y tubería abatible B, respectivamente.

Una vez establecida la clasificación del régimen de transporte del flujo, se elabora un gráfico con el objetivo de visualizar de manera más clara el comportamiento de las partículas frente a la variación de las revoluciones del sistema. Esta representación gráfica permite observar cómo, a medida que aumenta la velocidad del motor, se generan transiciones progresivas entre los distintos estados del lecho, desde condiciones de reposo o sedimentación hasta alcanzar el transporte en suspensión, este gráfico reúne todas las variables analizadas, permitiendo comparar en un mismo plano las distintas configuraciones de tubería, sus respectivas velocidades medias y las clasificaciones observadas. Esta visualización integral facilita la interpretación global del fenómeno y permite identificar con mayor claridad qué tramos y condiciones promueven un transporte más eficiente de las partículas.

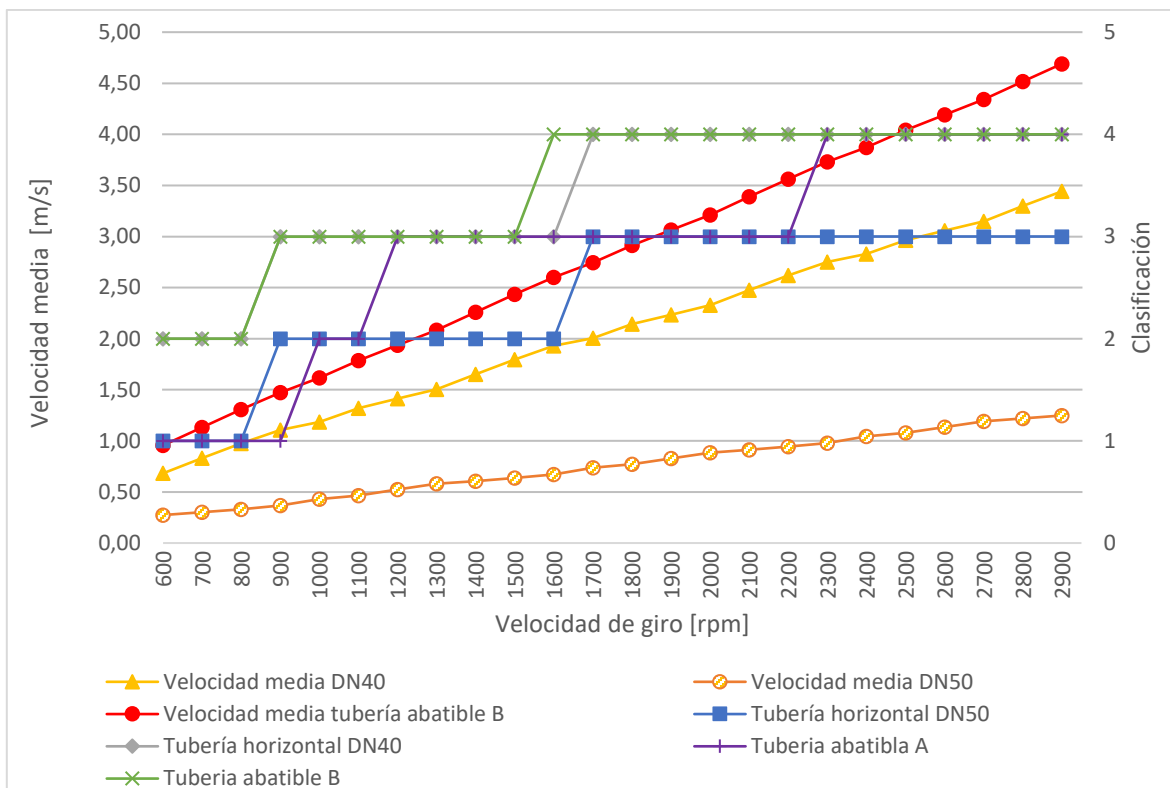


Imagen 5.9: Resultados medición circuito completo

En la Imagen 5.9 se presentan los resultados de medición del circuito completo en tuberías, considerando la relación entre la velocidad de giro [rpm], la velocidad media del flujo en cada tubería [m/s] y la clasificación del régimen de transporte de partículas. Estos gráficos integran la evaluación cualitativa transformada en puntuación, permitiendo visualizar de manera conjunta la respuesta del sistema bajo distintas condiciones operativas.

En la **tubería horizontal DN40**, el primer cambio significativo ocurre cuando la velocidad media del flujo se encuentra entre 0,97 y 1,11 m/s, donde se observa una transición desde un lecho estacionario (2) hacia un régimen de flujo con dunas (3), evidenciando que el flujo comienza a adquirir la energía suficiente para desplazar partículas sedimentadas. Más adelante, cuando la velocidad media alcanza entre 1,93 y 2,01 m/s, se produce un cambio claro hacia un régimen de flujo con dunas (3) e incluso hacia el transporte en suspensión (4) en algunas zonas, con partículas sostenidas en la corriente de forma continua.

En la **tubería horizontal DN50**, se observan velocidades medias más bajas a lo largo de todo el ensayo. Con valores entre 0,33 y 0,37 m/s, el sistema presenta una transición de flujo móvil a lecho estacionario (2), donde las partículas no presentan desplazamiento relevante. Solo cuando la velocidad media aumenta a 0,67–0,74 m/s, se manifiestan condiciones de flujo con dunas (3), aunque de manera parcial y sin alcanzar el régimen de suspensión. En esta configuración, el flujo carece de la energía hidráulica necesaria para sostener partículas en suspensión, incluso en los tramos de mayor velocidad.

La **tubería abatible A**, evaluada con las velocidades medias correspondientes a la tubería DN50, presenta un comportamiento limitado en términos de transporte. Inicialmente, con velocidades entre 0,37 y 0,43 m/s, se encuentra aún en un estado de lecho estacionario (2), sin generación de transporte activo. Posteriormente, al alcanzar velocidades de 0,47 a 0,52 m/s, se desarrolla un régimen de flujo con dunas (3) incipiente, y sólo en las etapas finales del ensayo, cuando la velocidad media llega a 0,94–0,98 m/s, se visualiza un comportamiento cercano al transporte en suspensión (4), aunque de manera marginal. Esto sugiere que la inclinación de esta tubería mejora el desempeño frente a la configuración horizontal, pero su rendimiento sigue condicionado por el bajo nivel de velocidad disponible.

La **tubería abatible B**, analizada con su propia curva de velocidad media del flujo en tubería abatible B, muestra un comportamiento significativamente más eficiente. Desde velocidades iniciales entre 1,13 y 1,31 m/s, el sistema ya opera bajo un régimen de lecho estacionario (2) con movimiento de partículas. Luego, al alcanzar 1,47 a 1,62 m/s, se establecen claramente dunas activas (clasificación 3), con partículas que se reorganizan en estructuras móviles a lo largo del fondo. Finalmente, con velocidades de 2,60 a 2,74 m/s, el sistema entra plenamente en el régimen de transporte en suspensión (4), donde las partículas se mantienen elevadas de forma sostenida, reflejando un flujo altamente energético y eficiente para conducción de sólidos en suspensión.

5.4.2 Derivación parcial

Este ensayo se enfoca en verificar los distintos comportamientos del flujo, desde el lecho móvil hasta el transporte total de partículas, considerando exclusivamente la tubería de 50 mm de diámetro. El objetivo es eliminar la influencia de la ramificación del circuito, lo que contribuye a reducir perturbaciones hidráulicas y mejorar la uniformidad del flujo, permitiendo así obtener mediciones más representativas y verificables. Esta configuración facilita una evaluación más precisa del régimen de transporte, al minimizar interferencias que podrían alterar los resultados observados. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de derivación parcial.

Tabla 5.4: Observación ensayo con derivación parcial

RPM	Caudal [l/min]	Observación
300 - 400	30 – 34,4	En el rango de 300 a 400 RPM, con caudales entre 30 y 34,4 l/min, se observa un régimen de lecho completamente estancado en la tubería horizontal , sin desplazamiento de partículas a lo largo del tramo. En la tubería abatible A (90°) , se presenta una recirculación localizada en el codo, aunque insuficiente para generar transporte vertical sostenido. La tubería abatible B (45°) evidencia un comportamiento similar, con recirculación de partículas principalmente sobre el sector del codo, sin arrastre continuo.
500	38,9	Al aumentar a 500 RPM, con un caudal de 38,9 L/min, la tubería horizontal mantiene un régimen de lecho estacionario con formación parcial de saltos, presentando ligeros desplazamientos en el fondo. En la tubería abatible A , se observa una recirculación predominando el movimiento de aquellas de 3,7 mm, mientras que las partículas más pequeñas (2,2 mm) se movilizan en menor proporción. En la tubería abatible B persiste la recirculación como dunas.

600	41,3	A 600 RPM y con un caudal de 41,3 l/min, el sistema comienza a mostrar cambios en la dinámica del transporte. La tubería horizontal mantiene un flujo estacionario. En la tubería abatible A se mantiene cierto embancamiento en el codo, pero se evidencia el inicio de un transporte vertical más sostenido. Por su parte, la tubería abatible B presenta recirculación en toda su extensión.
700-800	52 – 58,7	Con el incremento a 700 RPM y un caudal de 52 l/min, se mantiene el embancamiento parcial en el codo de la tubería abatible A , aunque el transporte vertical de partículas es cada vez más constante en el tramo superior. En la tubería abatible B , las partículas comienzan a desplazarse mediante un régimen de dunas recirculantes, fenómeno que se presenta principalmente desde la mitad de la tubería hacia su extremo superior, patrón que se conserva también a 800 RPM. La tubería horizontal mantiene un flujo estacionario
900-1000	71,7 – 87,5	Desde las 900 RPM, con un caudal de 71,7 l/min, se observa en la tubería abatible A un transporte homogéneo de partículas, aunque persiste un leve embancamiento localizado de partículas de 2,2 mm en la zona del codo. La tubería horizontal continúa bajo un régimen de lecho estacionario con movimiento parcial en el fondo, mientras que la tubería abatible B mantiene el transporte tipo lecho estacionario, sin presencia de recirculación activa. Estas condiciones se mantienen estables hasta los 1000 RPM.
1100-2500	90,1 – 160,2	A partir de los 1100 RPM, con un caudal de 90,1 l/min, el sistema presenta diferencias más marcadas entre los tramos. La tubería abatible A alcanza condiciones de transporte en suspensión total, sin evidencias de embancamiento en el codo. En contraste, la tubería horizontal y la tubería abatible B continúan en un régimen de lecho estacionario o dunas, sin lograr la suspensión completa. Este comportamiento se mantiene sin cambios significativos hasta los 2500 RPM, con incremento progresivo de la velocidad del flujo.

2600	163,9	Al superar las 2600 RPM, con un caudal de 163,9 l/min, se evidencia la presencia de dunas móviles en todas las secciones del sistema, con partículas en constante desplazamiento, aunque sin alcanzar el estado de suspensión total en la tubería horizontal y tubería abatible B . Este régimen marca una transición hacia una mayor eficiencia en el arrastre, pero con persistencia del movimiento en el fondo.
2700	234,1	Finalmente, a partir de los 2700 RPM y con un caudal de 234,1 l/min, se alcanza el transporte de sólidos en suspensión completa en todo el circuito. Bajo estas condiciones, las partículas se mantienen suspendidas a lo largo de todas las secciones, eliminándose la formación de lecho y cualquier acumulación visible, logrando el régimen de transporte más eficiente dentro del ensayo de derivación parcial.

A partir de las observaciones realizadas durante el ensayo con derivación parcial, se elabora la Tabla 5.5 de clasificación que resume el comportamiento del transporte de partículas en función de la velocidad del motor y el tipo de tramo de tubería. Para ello, se aplica la escala previamente definida, la cual permite identificar los distintos regímenes de transporte, abarcando desde partículas completamente estancadas hasta condiciones de transporte en suspensión total.

Tabla 5.5: Clasificación derivación parcial tubería horizontal

RPM	Velocidad media del flujo [m/s]	Tubería horizontal	Tubería abatible A	Tubería abatible B
400-500	0,38 – 0,43	1-2	1-2	1-2
600 - 700	0,45 – 0,57	2	2-3	2-3
1000-1100	0,96 – 1	2-3	3-4	3
2600-2700	1,80 – 2,57	3-4	4	3-4

Con el objetivo de representar visualmente la relación entre las condiciones de operación y el comportamiento del transporte de partículas, se construye un gráfico que muestra la evolución del régimen de transporte junto con el caudal medido en función de la velocidad del motor (RPM). Para ello, se emplean dos ejes Y: uno correspondiente a la velocidad media del flujo en tubería (m/s) y otro asociado a la clasificación del régimen de transporte de sólidos, según la escala previamente establecida. Esta doble escala permite correlacionar el efecto del aumento progresivo de las revoluciones con los cambios en el tipo de régimen presente en el sistema. De este modo, se facilita la identificación de las zonas de transición entre lecho móvil, lecho estacionario, flujo con dunas y transporte en suspensión, proporcionando una herramienta clara para interpretar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones hidráulicas.

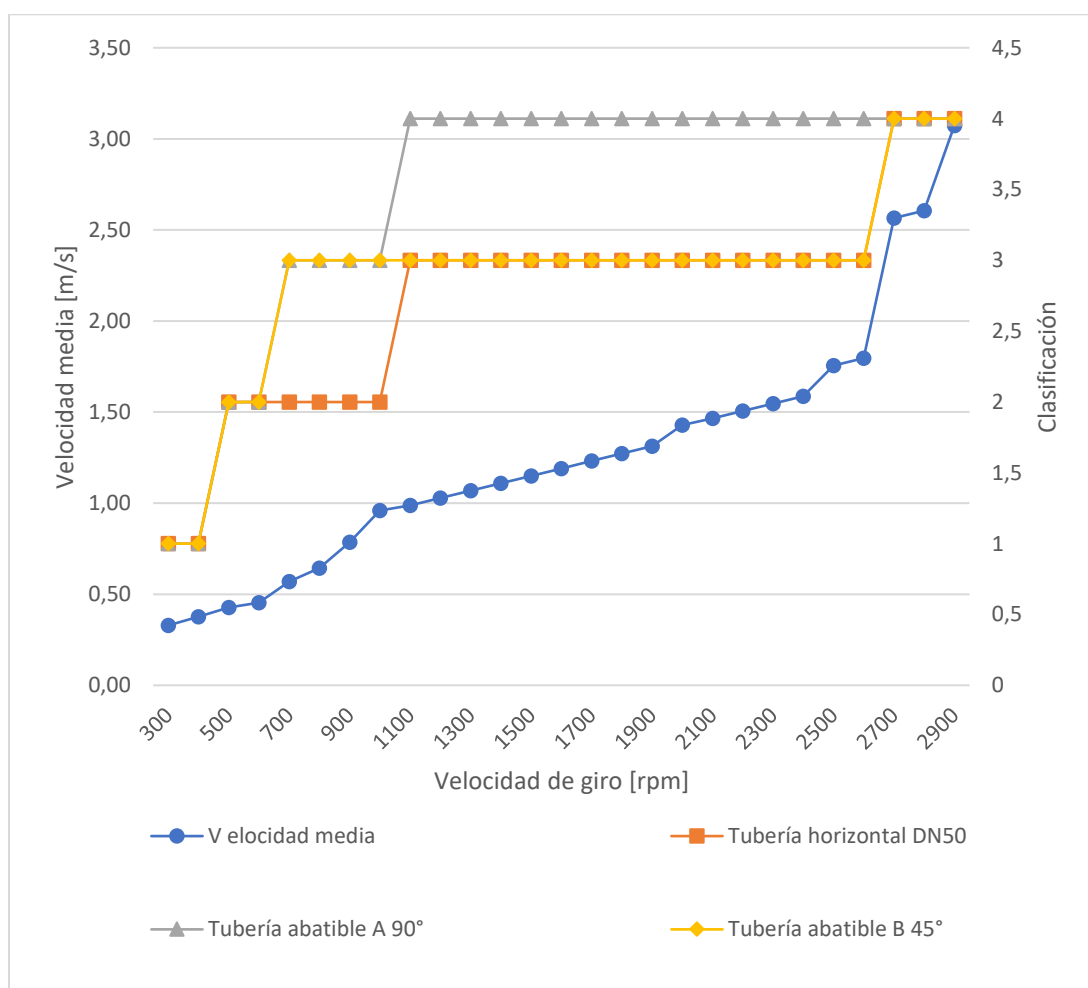


Imagen 5.10: Resultados derivación parcial

En el Imagen 5.10: Resultados derivación parcial se presenta el comportamiento de la velocidad media del flujo y la clasificación del transporte de partículas en función de la velocidad de giro del motor [rpm], utilizando dos ejes Y. El eje izquierdo representa el caudal medido en litros por minuto [l/min], mientras que el eje derecho corresponde a la clasificación del régimen de transporte según la escala previamente definida, que va desde partículas móviles hasta suspensión total.

El grafico también incluye las puntuaciones asignadas para cada tramo del sistema: tubería horizontal, tubería abatible A (90°) y tubería abatible B (45°). Esta representación permite visualizar de forma conjunta la evolución de ambas variables a lo largo del rango de operación evaluado.

En la **tubería horizontal**, los resultados obtenidos evidencian que en los tramos iniciales, donde la velocidad media del flujo se encuentra entre 0,38 y 0,43 m/s, así como entre 0,96 y 1,00 m/s, las clasificaciones observadas 1–2 y 2–3 reflejan una presencia considerable de sedimentación, manifestada como lecho móvil o formación incipiente de dunas. Estos valores se mantienen por debajo del umbral teórico de velocidad de sedimentación establecido entre 1,16 y 1,61 m/s, por lo que, coherentemente, no se registra transporte total de partículas en estos rangos. En el intervalo superior, correspondiente a velocidades medias de 1,80 a 2,57 m/s, la clasificación 3–4 indica que el transporte sin sedimentación solo se comienza a consolidar a partir de los 2,57 m/s, es decir, exclusivamente en el extremo superior del rango. Al comparar este valor con el límite teórico superior de 1,61 m/s, se concluye que el inicio del transporte total no se alinea exactamente con los cálculos teóricos, requiriendo mayores velocidades reales para alcanzarlo.

En la **tubería abatible A**, que presenta una orientación completamente vertical, se observa un comportamiento más eficiente en cuanto al arrastre de partículas. En los tramos de baja velocidad media, comprendidos entre 0,38 y 0,43 m/s, la clasificación 1–2 confirma la presencia de sedimentación, coherente con las bajas condiciones de energía del flujo. Posteriormente, en el rango de 0,96 a 1,00 m/s, la clasificación 3–4 sugiere que el transporte sin sedimentación comienza a manifestarse solamente a partir del valor superior del intervalo,

es decir, a partir de 1,00 m/s. Este valor comparado con umbral teórico mínimo de 1,16 m/s, que favorece el ascenso de partículas en suspensión debido a la acción directa de la velocidad del flujo en contra de la gravedad, se puede considerar plenamente representativo ya que la variación del comportamiento solo es diferente por decimales, lo que indica que la orientación vertical elimina zonas muertas o de recirculación que podrían generar acumulación.

La **tubería abatible B**, con una inclinación intermedia de 45°, presenta en los tramos iniciales velocidades entre 0,38 y 0,43 m/s, la clasificación 1–2 indica presencia clara de sedimentación, como era esperable. Más adelante, en el rango de 0,96 a 1,00 m/s, la clasificación 3–4 señala que el transporte sin sedimentación solo se alcanza en el extremo superior del rango, es decir, desde 1,00 m/s, lo que, al igual que en la configuración vertical, ocurre ligeramente por debajo del umbral teórico de 1,16 m/s por lo que se considera un valor aceptable y cercano al teórico, esta diferencia puede explicarse por la influencia positiva de la inclinación, que permite una distribución más favorable de la energía del flujo en dirección ascendente, reduciendo zonas de sedimentación sin requerir velocidades tan altas como en la configuración horizontal.

Es posible observar que las configuraciones abatibles (inclinadas y verticales) cumplen con mayor precisión los valores teóricos de transporte sin sedimentación, incluso comenzando a mostrar dicho fenómeno a velocidades levemente inferiores a las calculadas. En cambio, la configuración horizontal requiere velocidades significativamente mayores para alcanzar un transporte comparable, y aun así, mantiene zonas con acumulación. Además, se identificaron factores experimentales que influyen en estas diferencias, como la longitud de tubería recta insuficiente, la presencia de accesorios cercanos y la calibración del instrumento de medición, los cuales deben ser optimizados en futuras investigaciones para lograr resultados más representativos.

Estos resultados reflejan la importancia de considerar no solo los parámetros hidráulicos y teóricos, sino también las condiciones físicas del montaje experimental al momento de analizar el transporte de partículas.

5.4.3 Inclinación variable a diferentes caudales

Este ensayo se enfoca en verificar la presencia de recirculación en las tuberías abatibles y en cuantificar el transporte de sólidos según las distintas inclinaciones del tramo, en función del caudal aplicado.

Velocidad de giro a 500 rpm

En esta etapa del ensayo, se evalúa el comportamiento del transporte de partículas bajo una velocidad constante de 500 rpm y un caudal de 30,7 l/min.

Tubería abatible A

En la tubería abatible A, dispuesta en posición horizontal (90° respecto al suelo), se evidencia un comportamiento marcado por la recirculación localizada de partículas en el primer cuarto del tramo. Esta recirculación resulta insuficiente para generar un arrastre efectivo hacia la salida, por lo que las partículas permanecen retenidas en la sección inicial de la tubería. Asimismo, se observa una separación de sólidos por tamaño, donde las partículas de 2,2 mm tienden a acumularse en la parte superior del tramo, mientras que las de mayor tamaño (3 mm y 3,7 mm) se depositan en la zona inferior, favoreciendo la formación de un lecho sedimentado. En este escenario, el régimen de transporte predominante se mantiene en estado estacionario, sin manifestaciones de flujo continuo ni arrastre completo de las partículas.

Tubería Abatible B

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la tubería abatible B (45° de inclinación) al operar el sistema a una velocidad de giro de 500 [rpm]. Este tramo permitió evaluar el comportamiento del transporte de partículas bajo condiciones de pendiente moderada a crítica, en un régimen de operación donde todavía no se alcanzan velocidades elevadas de flujo.

La información recopilada corresponde a las observaciones realizadas en esta condición específica, integrando tanto las características visuales del movimiento de partículas como las condiciones hidráulicas registradas durante la prueba.

Tabla 5.6: Resultados de inclinaciones a 500 rpm

Angulo de inclinación	Descripción del régimen de transporte	Transporte
15°	Régimen de lecho móvil con bajo nivel de arrastre, acompañado de un pequeño porcentaje de lecho estacionario acumulado en la parte inferior del tramo. No se evidencia transporte efectivo de partículas.	No
30°	Las partículas muestran recirculación en la parte inferior de la tubería ascendente, manteniéndose en estado estacionario sin avanzar hacia la salida. Persisten zonas de acumulación sin arrastre continuo.	No
45°	Se incrementa la recirculación de partículas a lo largo del tramo, observándose una reducción del embancamiento en el codo de la tubería. Sin embargo, el transporte sigue siendo parcial, sin suspensión total.	No
60°	Se mantiene un régimen de recirculación tipo lecho estacionario, sin avance efectivo de partículas. Se aprecia una disminución del embancamiento en la zona del codo, aunque persisten acumulaciones en el fondo.	No
75°	Continúa la recirculación tipo flujo estacionario, concentrada principalmente en la primera mitad del tramo ascendente. Aún no se logra un transporte sostenido hacia la salida.	No

La Tabla 5.6: Resultados de inclinaciones a 500 rpm muestra el comportamiento que presenta la tubería abatible B en cada ángulo de inclinación evaluado, bajo las condiciones de operación definidas en el ensayo. En lugar de enfocarse únicamente en los regímenes de transporte, la Tabla 5.5 indica si se genera un transporte efectivo de partículas o si se observa recirculación o acumulación dentro del tramo. Esta información permite identificar cuáles configuraciones presentan condiciones que dificultan el transporte, permitiendo así evaluar la influencia directa de la inclinación sobre el comportamiento hidráulico del sistema.

10.3.2 Velocidad de giro a 600 rpm

En esta etapa del ensayo, se mantiene la velocidad del motor constante en 600 RPM, con un caudal registrado de 44,5 l/min. Se realiza una variación progresiva de la inclinación de la tubería abatible B, desde 0° hasta 75°, en incrementos de 15°, siguiendo la metodología definida para analizar el efecto combinado de la velocidad y la inclinación sobre el transporte de partículas. En cada combinación de parámetros se registran las condiciones del régimen de transporte, lo que permite caracterizar el comportamiento observado en ambas secciones del sistema.

Tubería abatible A

En la tubería abatible A, fijada en posición horizontal (90° respecto al suelo), se evidencia un régimen de transporte heterogéneo, en el cual coexisten zonas con arrastre parcial de partículas y sectores con acumulación. El fenómeno más significativo se presenta en el primer codo de la sección ascendente, donde se registra un mayor grado de embancamiento, lo que limita la continuidad del transporte hacia la salida del tramo. Esta acumulación provoca una obstrucción parcial que reduce la eficiencia del arrastre, favoreciendo la retención de partículas, particularmente aquellas de mayor tamaño, en ese sector específico del sistema.

Tubería abatible B

A continuación, se presenta la Tabla 5.7 que resume el comportamiento que muestra la tubería abatible B para cada uno de los ángulos de inclinación evaluados, operando a 600 rpm y con un caudal de 44,5 l/min. Esta información permite visualizar cómo varía el transporte de partículas en función de la pendiente, bajo condiciones de operación constantes.

En la Tabla 5.7 se detallan las características del régimen de transporte que se registran en cada condición, describiendo aspectos como el tipo de movimiento presente, la existencia de recirculación, la formación de lecho móvil y la acumulación en el tramo ascendente. Todo ello se analiza conforme a la metodología aplicada y a los criterios de clasificación previamente establecidos para interpretar el comportamiento hidráulico del sistema.

Tabla 5.7: Resultados de inclinaciones a 600 rpm

Angulo de inclinación	Descripción del régimen de transporte	Transporte
15°	Se presenta lecho móvil sin recirculación. Las partículas se desplazan por el fondo de la tubería, sin acumulación significativa ni estancamiento.	Si
30°	Se mantiene el lecho móvil. El patrón de arrastre es similar al de 15°, con movimiento parcial de las partículas, sin presencia de recirculación.	Si
45°	Se observa recirculación de partículas en forma de lecho estacionario, sin evidencias de embancamiento y sin lograr transporte hacia la salida.	No
60°	Continúa la recirculación estacionaria, con comportamiento similar al observado a 45°. No se presenta embancamiento, pero el transporte sigue sin desarrollarse.	No
75°	Se inicia el transporte parcial de sólidos. Un pequeño porcentaje de partículas comienza a avanzar, aunque la mayor masa permanece en recirculación a lo largo de toda la tubería ascendente como lecho con dunas.	Si

La Tabla 5.7: Resultados de inclinaciones a 600 rpm resume de forma sistemática las condiciones que se registran durante el ensayo realizado a 600 rpm, con una variación progresiva en la inclinación de la tubería abatible B. En ella se describen las características que se observan en cada uno de los escenarios evaluados, considerando la presencia o ausencia de recirculación, la formación de lecho móvil, el desarrollo de lecho estacionario y el inicio del transporte parcial de partículas. Las observaciones se obtienen directamente en terreno, siguiendo el procedimiento experimental establecido y utilizando los criterios de clasificación previamente definidos para los distintos regímenes de transporte.

Velocidad de giro a 700 rpm

En esta etapa del ensayo, se evalúa el comportamiento del transporte de partículas a una velocidad constante de 700 rpm y con un caudal de 54,4 l/min, aplicando la metodología de variación progresiva de la inclinación de la tubería abatible B, desde 0° hasta 75°, en incrementos de 15°. Este procedimiento permite registrar las condiciones del régimen de transporte en cada combinación de velocidad e inclinación, siguiendo los criterios de clasificación previamente establecidos, con el fin de caracterizar el comportamiento del flujo y determinar cómo la pendiente influye en el arrastre y la acumulación de partículas en el sistema.

Tubería abatible A

En la tubería abatible A, se observa un régimen de transporte de sólidos con presencia de embancamiento en el codo de la sección ascendente. A pesar de que las partículas presentan movimiento general, se identifica una recirculación localizada de aquellas de mayor tamaño (3,7 mm), concentrada principalmente en la zona del embancamiento. Esta condición limita la continuidad del arrastre, generando zonas de retención parcial a lo largo del tramo ascendente y reduciendo la eficiencia del transporte sólido en esa configuración.

Tubería abatible B

La Tabla 5.8 presenta el comportamiento del régimen de transporte observado en la tubería abatible B, bajo las condiciones de operación definidas para esta etapa del ensayo. Esta información permite analizar cómo varía el arrastre de partículas en función de la inclinación del tramo.

En ella se describen las características del movimiento de partículas correspondientes a cada ángulo aplicado, documentando la presencia de recirculación, la formación de lecho estacionario, así como el transporte parcial o total, conforme a la metodología y criterios de evaluación previamente establecidos.

Tabla 5.8: Resultados de inclinaciones a 700 rpm

Angulo de inclinación	Descripción del régimen de transporte	Transporte
15°	Se presenta transporte tipo lecho estacionario en bloques, sin formación de embancamiento en el codo. Las partículas avanzan de manera agrupada.	Si
30°	Se mantiene el lecho estacionario en bloques, con mayor velocidad de desplazamiento respecto a los 15°, sin acumulaciones visibles en el codo.	Si
45°	Comienza a evidenciarse recirculación tipo lecho estacionario, manteniéndose la estructura en bloques, con un pequeño porcentaje de partículas en movimiento.	No
60°	Continúa la recirculación estacionaria en bloques, pero con un mayor transporte de partículas hacia la salida. Aumenta la velocidad del arrastre parcial.	No
75°	Se desarrolla el transporte del bloque completo de partículas como lecho estacionario, con desplazamiento sostenido en todo el tramo ascendente.	Si

La Tabla 5.8 consolida los registros obtenidos durante el ensayo a 700 rpm, en el cual se evalúa el efecto de la inclinación de la tubería abatible B sobre el régimen de transporte de partículas. Cada descripción corresponde a observaciones levantadas directamente en terreno, bajo condiciones controladas y utilizando el protocolo experimental previamente definido. Este registro permite identificar de manera precisa los escenarios en los que se alcanza un transporte efectivo y aquellos donde predominan fenómenos de recirculación o arrastre limitado, proporcionando una base objetiva para el análisis comparativo en etapas posteriores.

Estos registros permiten caracterizar el régimen de transporte presente en cada caso, sirviendo como base para el análisis e interpretación que se desarrolla en los apartados siguientes, donde se abordan en detalle los efectos hidráulicos observados en el comportamiento del sistema.

Velocidad de giro a 800 rpm

En esta fase del ensayo, se analiza el comportamiento del transporte de partículas a una velocidad constante de 800 rpm y un caudal de 62,4 l/min, manteniendo la metodología de variación progresiva de la inclinación de la tubería abatible B desde 0° hasta 75°, en incrementos de 15°. Bajo estas condiciones, se registran las características del régimen de transporte correspondientes a cada combinación de velocidad e inclinación, siguiendo los criterios de clasificación definidos en el procedimiento experimental.

Tubería abatible A

En la tubería abatible A, posicionada horizontalmente a 90°, se observa un mayor porcentaje de transporte de partículas en comparación con las etapas anteriores, acompañado de una disminución del embancamiento en el codo de la sección ascendente. Aunque persisten algunas zonas de acumulación parcial, estas se presentan en menor proporción, lo que permite una mayor continuidad en el arrastre de sólidos a lo largo del tramo, mejorando así la eficiencia del transporte en esta configuración.

Tubería abatible B

A continuación, se presentan las condiciones que se observan para cada nivel de inclinación aplicado en la tubería abatible B. Este análisis permite identificar cómo varía el comportamiento del flujo sólido en función de la pendiente, manteniéndose constantes las demás condiciones de operación, lo que facilita una evaluación aislada del efecto de la inclinación sobre el régimen de transporte. Además, permite contrastar los resultados obtenidos en esta etapa con aquellos registrados en fases anteriores del ensayo, enriqueciendo la interpretación global del fenómeno.

Se detallan las características del régimen de transporte de partículas que se registran en cada combinación de velocidad e inclinación, conforme a los criterios de evaluación establecidos en la metodología experimental. Se documentan aspectos como la presencia de recirculación, el desarrollo de lechos móviles o estacionarios, y el inicio del transporte parcial o total, lo que aporta una visión integral del comportamiento hidráulico en cada escenario.

Tabla 5.9: Resultados de inclinaciones a 800 rpm

Ángulo de inclinación	Descripción del régimen de transporte	Transporte
15°	Se presenta transporte de pulpa en forma de lecho estacionario, sin evidencias de embancamiento en el codo ascendente. Las partículas avanzan en bloque.	Si
30°	Continúa el lecho estacionario en bloque, aunque con menor velocidad de desplazamiento respecto a 15°, manteniéndose sin acumulaciones en el codo	Si
45°	Comienza a observarse recirculación junto con transporte de sólidos, sin formación de embancamiento. El movimiento de partículas es más activo	No
60°	Se mantiene un flujo estacionario en bloque, con presencia de pequeña recirculación localizada en el codo ascendente, pero sin afectación significativa al transporte.	No
75°	Se evidencia mayor embancamiento del bloque de partículas, acompañado de menor recirculación. El régimen sigue siendo de lecho estacionario con desplazamiento parcial.	Si

La Tabla 5.9 sintetiza las observaciones realizadas durante el ensayo a 800 rpm, en el que se evalúan los efectos de distintas inclinaciones sobre el régimen de transporte en la tubería abatible B. Las descripciones consignadas reflejan el comportamiento de la pulpa en cada escenario, permitiendo distinguir entre condiciones de arrastre efectivo, recirculación y embancamiento.

El registro de estos fenómenos, obtenido mediante inspección directa en terreno, constituye una base empírica relevante para el análisis posterior, garantizando la trazabilidad de los datos y la consistencia metodológica del estudio.

Velocidad de giro a 900 rpm

Durante esta fase del ensayo, se evalúa el comportamiento del transporte de partículas a una velocidad constante de 900 rpm y un caudal de 72,1 l/min, manteniéndose la secuencia de variación progresiva de la inclinación de la tubería abatible B, desde 0° hasta 75°, en incrementos de 15°. Este procedimiento permite registrar las condiciones del régimen de transporte de sólidos bajo cada configuración operativa, siguiendo los criterios de observación y clasificación definidos en la metodología experimental.

Tubería abatible A

En la tubería abatible A, posicionada horizontalmente a 90°, se observa un transporte homogéneo de sólidos, con un menor porcentaje de embancamiento en el codo de la sección ascendente en comparación con etapas anteriores. Las partículas mantienen un desplazamiento constante y estable a lo largo del tramo, sin registrarse zonas significativas de retención ni recirculación, lo que favorece la continuidad del arrastre y mejora la eficiencia del transporte en esta configuración.

Tubería abatible B

La Tabla 5.10 expone los resultados obtenidos durante el ensayo realizado a 900 rpm, en el cual se aplican diferentes ángulos de inclinación a la tubería abatible B. Cada entrada describe el comportamiento del flujo en términos de estabilidad del arrastre, configuraciones de acumulación y grado de recirculación. Esta caracterización permite distinguir con claridad los efectos que genera la variación geométrica en la eficiencia del transporte de partículas.

Los datos recopilados se obtienen mediante observación directa en terreno, bajo una metodología ya validada en fases anteriores. Esta estructura metodológica otorga coherencia al conjunto del estudio y aporta una base técnica sólida para el análisis comparativo y la formulación de criterios de diseño en futuras aplicaciones.

Tabla 5.10: Resultados de inclinaciones a 900 rpm

Ángulo de inclinación	Descripción del régimen de transporte	Transporte
15°	El flujo se presenta como estacionario con formación de dunas, sin presencia de embancamiento en el codo ascendente. El arrastre es estable.	Si
30°	Se mantiene el régimen de flujo estacionario, con menor velocidad de transporte de partículas, sin evidencias de recirculación ni embancamiento.	Si
45°	Comienza a observarse recirculación de partículas, acompañada de transporte parcial, sin formación de embancamiento en el codo.	No
60°	Se evidencia la aparición de embancamiento junto con recirculación, aunque el transporte de partículas hacia la salida se mantiene activo.	No
75°	Las partículas se desplazan bajo un régimen de flujo estacionario, sin recirculación visible. El transporte se mantiene constante.	Si

Se reconoce que ciertos ángulos, como los extremos de 15° y 75°, favorecen condiciones de flujo más ordenado, mientras que inclinaciones intermedias tienden a generar zonas críticas con recirculación o embancamiento. Estos contrastes reflejan cómo pequeñas modificaciones en la inclinación inciden de forma significativa en la dinámica del sistema, alterando el patrón de desplazamiento incluso sin modificar el caudal o la velocidad del motor.

A diferencia de los ensayos previos, en esta etapa se observa una transición más marcada entre zonas de transporte continuo y condiciones de obstrucción parcial. Esto sugiere que a mayores caudales, las características del régimen dependen en mayor medida de la geometría de la instalación que de la energía entregada por el sistema de bombeo.

Velocidad de giro a 1000 rpm

En esta etapa del ensayo, se evalúa el comportamiento del transporte de partículas a una velocidad constante de 1000 [rpm], con un caudal de 80,4 l/min, aplicando la metodología de variación progresiva de la inclinación de la tubería abatible B, desde 0° hasta 75°, en incrementos de 15°. Las condiciones observadas se registran conforme al mismo criterio de clasificación y documentación utilizado en las fases anteriores, lo que permite caracterizar de manera consistente el régimen de transporte en cada configuración evaluada.

Tubería abatible A

En la tubería abatible A, mantenida en posición horizontal, se evidencia un transporte homogéneo de sólidos, sin presencia de embancamiento ni zonas de recirculación. Las partículas se desplazan de manera continua y estable a lo largo del tramo, alcanzando un régimen de transporte eficiente en toda la sección ascendente, sin interrupciones en el flujo. Este comportamiento indica que, bajo estas condiciones de operación, la velocidad alcanzada permite superar la tendencia natural a la sedimentación, favoreciendo un arrastre constante. La ausencia de acumulaciones visibles confirma una adecuada interacción entre el caudal y la geometría del sistema, validando su desempeño incluso en una configuración horizontal.

Tubería abatible B

A continuación, se presenta la Tabla 5.11, la cual resume el comportamiento del régimen de transporte de partículas observado en la tubería abatible B, bajo las condiciones de operación correspondientes a los 1000 [rpm]. En esta se registran las características del flujo para cada nivel de inclinación aplicado, considerando aspectos como el tipo de movimiento predominante, la presencia de recirculación, la formación de lecho estacionario y la existencia de embancamiento en el tramo ascendente.

Las observaciones consignadas fueron obtenidas mediante inspección directa durante la ejecución del ensayo, siguiendo los criterios definidos en la metodología experimental. Esta sistematización permite visualizar de forma clara y ordenada los efectos de cada condición geométrica sobre el comportamiento del flujo, estableciendo una base objetiva para el análisis e interpretación que se desarrolla en los apartados posteriores.

Tabla 5.11: Resultados de inclinaciones a 1000 rpm

Ángulo de inclinación	Descripción del régimen de transporte	Transporte
15°	Las partículas se desplazan en bloques bajo régimen de flujo estacionario, sin presencia de recirculación ni embancamiento en el tramo ascendente.	Si
30°	Se mantiene un flujo estacionario sin recirculación ni embancamiento. Comienza a observarse una lámina de sedimentación en lugar de bloques consolidados.	Si
45°	Aparece recirculación de sólidos sin formación de embancamiento. Las partículas muestran movimiento parcial a lo largo del tramo, con zonas de recirculación.	No
60°	Inicia nuevamente el transporte de sólidos junto a recirculación parcial, presentándose como flujo estacionario sin acumulaciones visibles en el codo.	Si
75°	Se logra el transporte continuo de sólidos sin recirculación ni embancamiento en el codo ascendente, manteniéndose el arrastre efectivo a lo largo de la tubería.	Si

La Tabla 5.11 presenta el comportamiento del régimen de transporte de partículas en la tubería abatible B operando a 1000 rpm, destacando cómo la inclinación influye en la eficiencia del arrastre. A 15° y 30°, se mantiene un flujo estacionario sin presencia de recirculación ni embancamiento, evidenciando condiciones estables de transporte. En el caso del ángulo de 30°, se observa una transición desde bloques consolidados hacia una lámina de sedimentación, sin comprometer la continuidad del arrastre.

En 45°, el transporte se ve afectado por la aparición de recirculación sin embancamiento. Sin embargo, al aumentar la inclinación a 60°, se restablece el arrastre de sólidos con una recirculación localizada. Finalmente, a 75°, se alcanza nuevamente un transporte continuo, sin embancamiento ni recirculación visible, consolidando un régimen eficiente en toda la tubería.

Velocidad de giro a 1100 rpm

Durante esta fase del ensayo, se evalúa el comportamiento del transporte de partículas a una velocidad constante de 1100 rpm, con un caudal de 88,9 l/min, manteniéndose la metodología de variación progresiva de la inclinación de la tubería abatible B desde 0° hasta 75°, en incrementos de 15°. Las condiciones se registran en cada configuración evaluada, lo que permite caracterizar de manera sistemática el régimen de transporte de sólidos, conforme a los criterios definidos en la metodología experimental.

Tubería abatible A

En la tubería abatible A, ubicada en posición horizontal, se observa un régimen de flujo homogéneo de partículas, sin evidencias de embancamiento en el codo de la sección ascendente. Las partículas se desplazan de manera continua y estable a lo largo de todo el tramo, sin interrupciones ni zonas de acumulación, manteniéndose la eficiencia del arrastre bajo estas condiciones. La ausencia de recirculación sugiere una trayectoria bien definida del flujo, sin alteraciones importantes en la dirección o turbulencia que generen retención. Además, se constata que incluso las partículas de mayor tamaño logran ser transportadas sin dificultad, lo que refuerza la efectividad hidráulica de esta configuración en el régimen evaluado.

Tubería abatible B

A continuación, se presenta la Tabla 5.12 que resume las condiciones observadas para cada nivel de inclinación aplicado en la tubería abatible B durante el ensayo realizado a 1100 rpm. En esta se detallan las características del régimen de transporte de partículas, considerando la presencia de embancamiento, recirculación y el tipo de flujo predominante en cada configuración geométrica evaluada.

Las condiciones son registradas conforme a la metodología experimental establecida, lo que garantiza la consistencia en la documentación y evaluación de los resultados. Esta sistematización de la información facilita el análisis técnico e impulsa el desarrollo de conclusiones fundamentadas, que serán abordadas en las secciones posteriores del estudio.

Tabla 5.12: Resultados inclinaciones con 1100 rpm

Ángulo de inclinación	Descripción del régimen de transporte	Transporte
15°	Se presenta flujo estacionario con formación de embancamiento en el codo ascendente. Las partículas permanecen acumuladas en el tramo inferior.	Si
30°	Se mantiene el flujo estacionario sin embancamiento, permitiendo el desplazamiento de las partículas sin acumulación significativa.	Si
45°	El régimen sigue siendo estacionario, comenzando a aparecer recirculación de partículas en menor proporción, sin bloqueo en el codo.	No
60°	Continúa el flujo estacionario, con disminución de la recirculación de partículas respecto a 45°, manteniéndose el transporte activo.	Si
75°	Se alcanza un transporte continuo de partículas sin recirculación ni embancamiento, logrando un régimen de arrastre eficiente en toda la tubería.	Si

La Tabla 5.12 presenta el comportamiento del régimen de transporte de partículas en la tubería abatible B bajo condiciones de operación a 1100 rpm. A medida que se incrementa el ángulo de inclinación, se observan transiciones en el comportamiento del flujo. En 15°, se presenta un embancamiento notorio en el codo ascendente, lo que genera acumulación de partículas en el tramo inferior. Sin embargo, a partir de los 30°, el flujo se estabiliza y se elimina la acumulación significativa.

Se observa una recirculación moderada a 45°, aunque sin llegar a interrumpir el flujo. Posteriormente, en los ángulos de 60° y 75°, el régimen muestra un transporte progresivamente más eficiente, eliminando la recirculación y embancamiento, y alcanzando un arrastre continuo y activo en toda la sección.

Velocidad de giro a 1200 rpm

En esta etapa del ensayo, se caracteriza el comportamiento del transporte de partículas a una velocidad constante de 1200 rpm, con un caudal de 98,1 l/min, manteniéndose la secuencia de variación progresiva de la inclinación de la tubería abatible B (TB) desde 0° hasta 75°, en incrementos de 15°. La metodología aplicada permite evaluar las condiciones del régimen de transporte bajo cada combinación de parámetros, registrando las observaciones de forma sistemática en cada tramo del circuito.

Tubería abatible A

En la tubería abatible A, ubicada horizontalmente a 90°, se observa un régimen de transporte homogéneo de partículas, sin formación de embancamiento en el codo ascendente. El desplazamiento de los sólidos se mantiene continuo y estable, con una mayor velocidad de arrastre en comparación con la condición observada a 1100 rpm, lo que favorece la eficiencia del transporte en esta sección del sistema. Además, se identifica una menor presencia de acumulación en el tramo ascendente, y el flujo presenta menor resistencia, lo que contribuye a una operación más fluida y consistente en todo el recorrido.

Tubería abatible B

A continuación, se presenta la Tabla 5.13 que resume las condiciones observadas para cada nivel de inclinación de la tubería abatible B, bajo la condición operativa de 1200 rpm. En esta se registran las características del régimen de transporte de partículas, identificando la presencia o ausencia de recirculación, la formación de embancamiento y el tipo de arrastre predominante en cada una de las configuraciones evaluadas.

Las observaciones se levantan conforme al procedimiento experimental previamente definido, lo que asegura la coherencia metodológica y la trazabilidad de los datos obtenidos. Esta sistematización facilita el desarrollo de un análisis comparativo riguroso y constituye una base técnica clara para la discusión de resultados en las secciones posteriores del informe.

Tabla 5.13: Resultados de inclinación a 1200 rpm

Ángulo de inclinación	Descripción del régimen de transporte	Transporte
15°	Se presenta flujo estacionario sin embancamiento, con transporte estable de partículas y ausencia de acumulación en el codo ascendente.	Si
30°	Continúa el flujo estacionario sin embancamiento, manteniéndose las mismas características de transporte observadas a 15°.	Si
45°	Se observa recirculación mínima de partículas bajo régimen estacionario, sin evidencias de bloqueo o acumulación en el tramo.	No
60°	Se mantiene el flujo estacionario, con disminución de la recirculación y mayor transporte de sólidos hacia la salida.	Si
75°	Se alcanza un transporte homogéneo con régimen estacionario, con movimiento continuo y sin presencia de embancamiento ni recirculación.	Si

La Tabla 5.13 permite identificar el régimen de transporte a medida que se incrementa la inclinación de la tubería abatible B. En los ángulos de 15° y 30°, se mantiene un flujo estacionario sin embancamiento, con desplazamiento estable de partículas y sin acumulaciones en el codo ascendente, lo cual indica un arrastre eficiente desde las primeras configuraciones. Esto refleja que, en esta etapa del ensayo, las condiciones de operación son suficientemente energéticas para evitar formación de sedimentos significativos.

A partir de 45°, comienza a observarse una ligera recirculación sin llegar a provocar bloqueo ni acumulación en el tramo, lo que sugiere una transición leve en el comportamiento del flujo. Sin embargo, en los ángulos de 60° y 75°, se restablece un transporte activo y homogéneo, con disminución de la recirculación y ausencia de embancamiento. El ángulo de 75° destaca por lograr un régimen completamente estable y continuo, siendo este escenario uno de los más favorables dentro del rango evaluado para mantener un arrastre sostenido de sólidos.

Estos registros permiten consolidar el comportamiento del sistema bajo las condiciones operativas aplicadas, facilitando la comparación con otras fases del ensayo. El análisis técnico y las conclusiones derivadas de estos datos serán abordados en los capítulos posteriores, donde se evaluarán las tendencias y la eficiencia del transporte de sólidos en las distintas configuraciones estudiadas.

Finalmente se muestra la Tabla 5.14 la cual muestra un resumen de los resultados de transporte para el ensayo de inclinación variable el cual es lo que se quería estudiar, el cual muestra si existe transporte de partículas o se queda recirculando y embancada en los codos ascendentes.

Tabla 5.14: Resultados inclinación variable

		Transporte de sólidos								
		500 [rpm]	600 [rpm]	700 [rpm]	800 [rpm]	900 [rpm]	1000 [rpm]	1100 [rpm]	1200 [rpm]	1300 [rpm]
Ángulo de inclinación	15 [°]	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	30 [°]	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	45 [°]	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
	60 [°]	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓
	75 [°]	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	90 [°]	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

La Tabla 5.14: Resultados inclinación variable muestra de forma clara las condiciones en las que se logra transporte efectivo de partículas según la combinación de velocidad de giro del motor [rpm] e inclinación de la tubería abatible. La marca ✓ indica que se logró arrastre de partículas, mientras que X representa condiciones donde predomina la sedimentación o recirculación sin transporte sostenido. Esta representación permite

identificar rápidamente los umbrales operativos en los que el sistema alcanza un régimen de transporte eficiente.

Desde el análisis vertical de la matriz de resultados, se observa que los ángulos bajos, como 15° y 30° , permiten alcanzar el transporte de sólidos a velocidades relativamente bajas. A partir de 600 rpm ya se logra arrastre efectivo en ambas inclinaciones, y dicho comportamiento se mantiene estable a lo largo de toda la serie evaluada hasta 1300 rpm. Esta tendencia indica que, en pendientes suaves, la componente gravitacional que actúa en contra del flujo es menor, lo cual favorece el inicio temprano del transporte. Así, en este rango, la variable predominante es la velocidad del flujo, mientras que la inclinación tiene un impacto secundario.

En cambio, los ángulos intermedios presentan una respuesta distinta. En particular, el ángulo de 45° no registra transporte en ninguna de las condiciones operativas aplicadas, lo que sugiere una configuración crítica en la cual la gravedad dificulta el ascenso de partículas y la energía del sistema no es suficiente para revertir dicha condición. Esta inclinación podría favorecer la formación de zonas muertas o de recirculación que interrumpen el arrastre. A 60° , el sistema muestra una transición más favorable, ya que a partir de 1000 rpm se logra superar la resistencia al movimiento, registrándose arrastre constante en las velocidades siguientes.

Los ángulos mayores, como 75° y 90° , evidencian un comportamiento más predecible y favorable a partir de velocidades moderadas. Desde 600 rpm se registra transporte sostenido, incluso en presencia de recirculación. Esta tendencia sugiere que, aunque la gravedad en posición casi vertical podría parecer desfavorable, la linealidad del trayecto facilita el flujo ascendente, permitiendo una transferencia directa de energía cinética desde el flujo a las partículas. Esto se traduce en un transporte continuo, sin interrupciones a lo largo del tramo.

En conjunto, la Tabla 5.14: Resultados inclinación variable revela que el transporte de sólidos no responde de forma lineal al ángulo de inclinación. Los extremos (bajo y alto) muestran mayor adaptabilidad al movimiento de partículas, mientras que el intervalo medio presenta condiciones hidráulicamente desfavorables. Estos hallazgos permiten identificar zonas

críticas y rangos óptimos de operación, siendo un insumo clave para el diseño y ajuste de sistemas de conducción de pulpas en configuraciones con pendiente variable.

5.4.4 Fenómeno de aireación

El ensayo de aireación tuvo como finalidad observar el comportamiento del transporte de partículas bajo la presencia controlada de aire en el circuito hidráulico. El propósito de esta prueba fue evidenciar cómo la entrada de burbujas al flujo genera alteraciones en la eficiencia del arrastre de sólidos, identificando zonas de estancamiento, separación entre fases y acumulación de partículas.



Imagen 5.11: Generación de burbujas en silo y tubería

Como se aprecia en la Imagen 5.11: Generación de burbujas en silo, se observan burbujas ingresando en la parte de la succión de la bomba. La formación de estas burbujas es especialmente crítica en configuraciones donde no se dispone de un volumen de carga suficiente sobre la entrada de la bomba, lo que genera una pérdida de eficiencia hidráulica debido a la presencia de aire arrastrado, también se generan a partir de una gran altura en la entrada del silo que genera esta caída de agua y por consiguiente la formación de burbujas. Esta situación puede afectar la estabilidad del transporte de sólidos, ya que las burbujas generan zonas de baja presión y dificultan el correcto transporte de las partículas.

Se identifica que las burbujas generadas por la entrada de aire al sistema ascienden rápidamente a través del fluido, desplazándose por las zonas donde se encuentran las

partículas en suspensión, sin contribuir de manera efectiva al arrastre de estas. Aunque atraviesan el lecho de partículas, no generan el impulso suficiente para movilizarlas, lo que provoca que las partículas queden estancadas o permanezcan en suspensión dentro del tramo ascendente de la tubería abatible. Este fenómeno da lugar a zonas con alta concentración de burbujas y escasa presencia de sólidos en movimiento, reduciendo la eficiencia del transporte.

Por otro lado, en el tramo descendente de la tubería se observa una notable acumulación de burbujas, sin presencia significativa de partículas sólidas. Este patrón evidencia que la aireación no mejora el transporte de sólidos, sino que induce una separación de fases. Las partículas tienden a quedar retenidas en el sistema, mientras que las burbujas avanzan libremente, confirmando que la inyección de aire no favorece el desplazamiento conjunto de ambos componentes dentro del circuito.

5.5 Análisis teóricos de las mediciones experimentales

A continuación se muestran los resultados generales tomando en cuenta el número de Reynolds y los rangos de valores que afectan en el transporte de sólidos con el fin de extrapolar estos resultados a otros sistemas de tuberías.

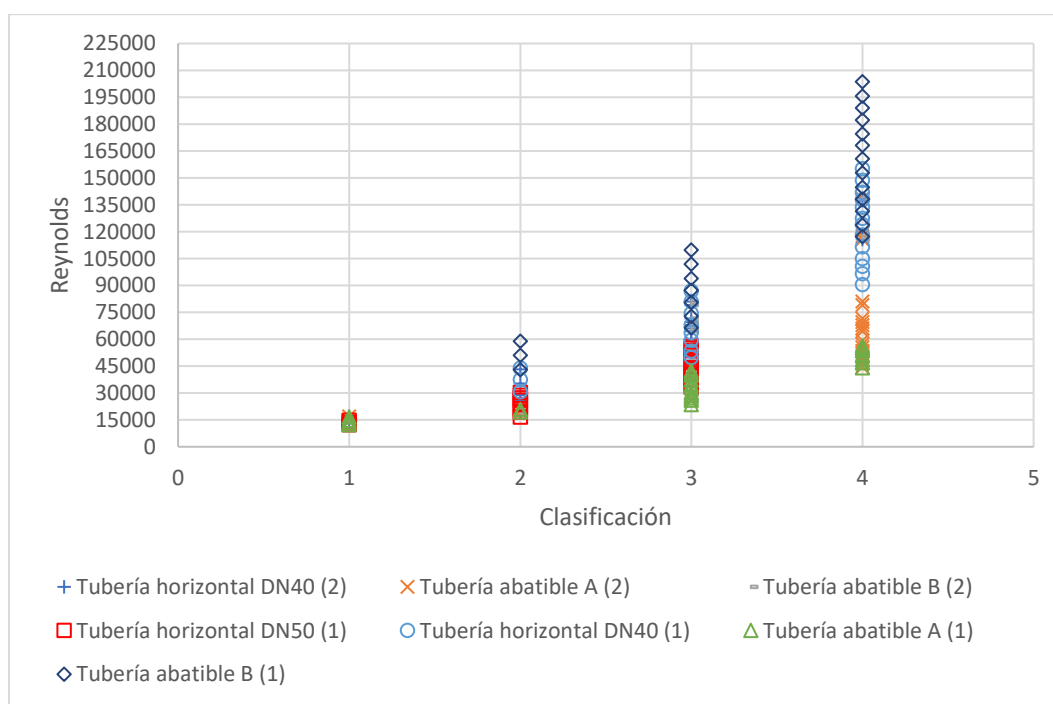


Imagen 5.12: Resultados tuberías abatibles

A partir de la Tabla 5.15: Rangos de Reynolds, que consolida los resultados experimentales de todas las configuraciones de tuberías horizontales y abatibles en condiciones de circuito completo (1) y derivación parcial (2), se puede identificar con claridad el comportamiento del flujo en función del número de Reynolds y su relación con la clasificación del transporte de sólidos. Esta clasificación representa una progresión desde condiciones sin arrastre efectivo hasta un transporte completamente desarrollado y homogéneo, permitiendo establecer rangos críticos que orientan la interpretación hidráulica del sistema.

Tabla 5.15: Rangos de Reynolds

Clasificación	Reynolds
1	12.000 – 20.000
2	20.000 – 45.000
3	45.000 – 95.000
4	95.000 – 210.000

En primer lugar, para la clasificación 1, se registran valores de Reynolds entre 12.000 y 20.000, principalmente asociados a condiciones de flujo en las que no se observa movimiento sostenido de partículas. Esta situación es común en las tuberías horizontales DN50 y DN40, así como en las abatibles A y B bajo la configuración de derivación parcial. En esta zona, predominan los regímenes de flujo estacionario sin transporte visible y con presencia de embancamiento o acumulación.

A medida que se avanza hacia la clasificación 2, los Reynolds se ubican entre 20.000 y 45.000, lo que marca el umbral en el cual comienza a evidenciarse desplazamiento parcial de sólidos. Aunque el arrastre aún no es sostenido, se observan patrones intermitentes que reflejan una mayor energía disponible. Esta etapa involucra una combinación de condiciones, incluyendo algunas tuberías abatibles y horizontales en ambas configuraciones experimentales, donde la geometría y la velocidad influyen de manera más crítica.

La clasificación 3, comprendida entre 45.000 y 95.000, representa una fase de transición donde el transporte ya se mantiene activo pero aún puede presentar zonas de recirculación o lechos parcialmente estacionarios. Este rango incluye una alta densidad de datos provenientes de todas las tuberías, reflejando que la mayoría de los sistemas alcanza aquí una condición operativa funcional pero no óptima. Finalmente, en la clasificación 4, con Reynolds superiores a 95.000 y en algunos casos superando los 210.000, se logra un régimen de transporte completamente desarrollado. Esta condición se concentra principalmente en los ensayos con circuito completo, particularmente en las tuberías abatibles A y B, lo que demuestra que una configuración hidráulica integral favorece el arrastre eficiente y continuo de sólidos.

En términos de extrapolación, se concluye que para garantizar un transporte efectivo de partículas en suspensión en sistemas reales, es necesario mantener un número de Reynolds mínimo de 45.000, mientras que valores por encima de 95.000 aseguran un transporte estable y sin recirculación. Los resultados también permiten identificar que los sistemas con ramales parciales tienden a presentar un rendimiento inferior, debido a caídas de presión o disminuciones de caudal en la línea secundaria. Por tanto, el diseño de sistemas hidráulicos para transporte de sólidos en suspensión debe considerar estos umbrales críticos, adaptando el diámetro, la velocidad del fluido y la geometría del circuito con el objetivo de sostener el régimen deseado y evitar zonas de acumulación o pérdida de capacidad operativa, y considerar la menor cantidad de accesorios posibles para evitar pérdidas de presión, sedimentación del flujo, recirculación entre otras cosas.

6. Conclusiones y recomendaciones

En el marco del objetivo general planteado, se diseña y construye un banco de ensayo móvil y transportable que permite analizar experimentalmente los principales fenómenos asociados al transporte de sólidos. La versatilidad del sistema, sumada a su capacidad para ajustar variables operativas como la velocidad del flujo, la inclinación de las tuberías y la configuración de válvulas permite reproducir de manera clara distintos regímenes de sedimentación, recirculación y transporte en suspensión. Esta funcionalidad convierte al banco de ensayo en una herramienta eficaz para la visualización, medición y comprensión de los comportamientos hidráulicos que se presentan en condiciones reales de operación.

Se diseña un sistema de tuberías completo mediante el software Autodesk Inventor, incorporando configuraciones geométricas abatibles que otorgan la flexibilidad necesaria para estudiar el comportamiento del transporte de partículas bajo diversas condiciones de operación. Además, se desarrollan estructuras de soporte específicas para el banco de ensayo, las cuales aseguran la estabilidad del conjunto y permiten una adaptabilidad precisa frente a las distintas inclinaciones evaluadas durante las pruebas experimentales.

A partir de los fundamentos teóricos de la hidráulica y la mecánica de fluidos, se determinan los caudales, alturas manométricas y pérdidas por fricción requeridas para el sistema. Con estos datos, se selecciona una bomba adecuada que cumple con las exigencias técnicas del banco de ensayo, asegurando un funcionamiento estable y eficiente en todo el rango de operación definido. La elección del equipo se realiza en base a criterios técnicos que garantizan la compatibilidad entre la bomba, la red de tuberías y los objetivos experimentales del estudio. Con esto se define las condiciones de operación del sistema, considerando rangos de velocidad de giro, inclinación de las tuberías y configuraciones de válvulas, parámetros esenciales para la evaluación experimental de los fenómenos hidráulicos de interés. Esta configuración permite replicar situaciones representativas de sedimentación, recirculación y transporte suspendido, bajo distintos regímenes de flujo que simulan condiciones reales observadas en terreno.

Se fabrica e implementa el banco de ensayo conforme al diseño desarrollado en Autodesk Inventor, verificando su funcionalidad a través de pruebas prácticas. El sistema construido reproduce con éxito los fenómenos característicos del transporte de partículas, validando su eficacia como herramienta experimental en estudios aplicados a la minería y la ingeniería hidráulica.

Posteriormente, se elabora un plan de medición detallado que contempla la selección de instrumentos, definición de rangos operativos y establecimiento de criterios de evaluación específicos para cada ensayo. Esta planificación permite registrar los fenómenos observados mediante una metodología sistemática y cuantificable, lo que facilita la comparación entre configuraciones y proporciona una base técnica sólida para futuras mejoras del sistema.

Los resultados obtenidos a través de los distintos ensayos realizados evidenciaron patrones de comportamiento claros en el transporte de partículas. En el ensayo de Circuito completo, el análisis comparativo demuestra que la tubería abatible B ofrece el rendimiento más eficiente en el transporte de sólidos en suspensión, alcanzando la clasificación 4 en el rango de velocidades entre 2,60 y 2,74 m/s, gracias a que esta configuración recibe simultáneamente el caudal proveniente de ambas líneas (DN40 y DN50), lo que incrementa de forma significativa el caudal disponible para el arrastre. Esta condición de caudal combinado permite superar tempranamente los regímenes de lecho estacionario y dunas, estableciendo un transporte continuo y sostenido de partículas en suspensión. En contraste, la tubería abatible A, alimentada solo por el caudal de la línea DN50, presenta un comportamiento más limitado, alcanzando solo el régimen de suspensión en etapas finales del ensayo. Las tuberías horizontales, especialmente DN50, no logran condiciones de transporte eficiente, evidenciando que ni la velocidad ni el diseño geométrico son suficientes por sí solos. Por tanto, se concluye que un mayor caudal, como ocurre en la tubería abatible B, resulta clave para optimizar el rendimiento hidráulico en sistemas de transporte de sólidos.

En los ensayos con derivación parcial, se requirieron mayores velocidades para alcanzar condiciones de transporte efectivo, observándose inicialmente fenómenos de embancamiento y recirculación de partículas. El análisis comparativo de las tres configuraciones de tuberías

revela que solo las tuberías abatibles, tanto la A como la B, presentan un comportamiento consistente con los cálculos teóricos de velocidad de sedimentación, estimados entre 1,16 y 1,61 m/s. En ambas configuraciones, el transporte sin sedimentación (clasificación 4) se alcanza dentro de un rango de velocidades reales entre 0,96 y 1 m/s, lo que confirma que el arrastre efectivo de partículas ocurre levemente por debajo de los valores teóricos, manteniéndose dentro de márgenes aceptables. Este desempeño se explica por la geometría vertical de las tuberías abatibles, la cual genera un flujo más uniforme, con menores zonas de recirculación o acumulación, favoreciendo un transporte continuo y estable a lo largo del tramo ascendente.

En cambio, la tubería horizontal DN50 presenta comportamientos menos eficientes, con requerimientos de velocidad significativamente superiores a los teóricos para alcanzar el transporte total de partículas. En ambas configuraciones, el fenómeno de sedimentación persiste incluso a velocidades medias elevadas, y la clasificación 4 solo se consolida desde 2,57 m/s en adelante, lo que representa una desviación considerable respecto al umbral teórico. En el caso de la tubería inclinada, se esperaba un desempeño intermedio, lo que podría explicarse por una combinación de factores: un ángulo de inclinación insuficiente para romper el patrón de sedimentación y condiciones hidráulicas locales desfavorables.

Adicionalmente, en todas las configuraciones se identificaron limitaciones experimentales relevantes, como la falta de una longitud recta suficiente posterior a los accesorios (según lo recomendado por el fabricante del flujómetro) y posibles problemas de calibración del equipo, evidenciados por la no linealidad en las mediciones de velocidad frente al aumento de rpm. Estos aspectos afectan directamente la confiabilidad de los valores registrados y pueden haber contribuido a que las velocidades reales necesarias para el transporte sin sedimentación fueran mayores a las teóricas. Por otro lado, las condiciones iniciales de cálculo, como la gravedad específica o la densidad del fluido, también influyen directamente en los resultados teóricos, pudiendo generar desviaciones o inexactitudes en los valores obtenidos.

El ensayo con inclinación variable permite confirmar la influencia directa que ejerce la pendiente sobre el comportamiento del flujo de partículas. En inclinaciones intermedias,

entre 45° y 60°, predomina la recirculación, lo que limita el transporte efectivo y favorece la acumulación de sólidos. Solo en inclinaciones superiores, cercanas a los 75°, y a velocidades mayores a 1000 rpm, se alcanza un régimen de transporte completo en suspensión, evidenciando que una mayor pendiente reduce zonas de baja energía y mejora el perfil hidráulico del sistema. Estos resultados destacan la inclinación como un parámetro crítico para optimizar el arrastre de partículas en tramos ascendentes y prevenir el estancamiento de sólidos en el flujo.

En el ensayo de aireación se identifica un fenómeno que compromete la eficiencia del transporte de sólidos. La diferencia de altura entre la descarga y la succión de la bomba provoca la entrada de aire al sistema, generando burbujas que ascienden junto al flujo. Estas burbujas no favorecen el arrastre de partículas, sino que atraviesan el lecho de sólidos sin ejercer una fuerza significativa sobre ellos, dejando a las partículas en suspensión o incluso suspendidas en la tubería abatible ascendente sin transporte. En la sección descendente, en tanto, se observa una alta concentración de burbujas sin presencia de sólidos, lo que confirma que el fenómeno de aireación interfiere negativamente en el régimen de transporte, disminuyendo la eficiencia hidráulica y promoviendo acumulación de partículas en zonas de menor energía del circuito.

En conclusión, la implementación del banco de ensayo permite caracterizar de forma experimental el comportamiento del transporte de partículas en suspensión bajo diferentes condiciones geométricas y operativas. La configuración modular y ajustable del sistema, junto con una metodología de medición sistemática, posibilita la obtención de resultados consistentes y comparables. Esta herramienta experimental permite identificar con claridad la influencia de variables como la velocidad del flujo, la inclinación de las tuberías y los efectos de la aireación, entregando criterios técnicos relevantes para el diseño y optimización de sistemas hidráulicos de transporte de sólidos en contextos reales.

A partir de la experiencia adquirida durante la construcción, operación y análisis del banco de ensayo, se identifican diversas oportunidades de mejora orientadas a optimizar su funcionalidad, portabilidad y precisión experimental. En particular, se propone como mejora

del diseño estructural la segmentación de la mesa en dos secciones independientes, con el objetivo de reducir la deflexión vertical detectada durante las pruebas. Esta recomendación surge a raíz de una deflexión observada en la zona central de la mesa abatible cuando se simuló en el software, atribuida a una modificación tardía en la elección del mesón superior. El cambio en la cubierta se efectuó cuando ya se había seleccionado el perfil estructural principal, lo que obligó a recalcular los pesos con la estructura definida, afectando negativamente su desempeño mecánico. Separar la mesa en tramos independientes permitiría disminuir la carga distribuida sobre cada estructura, mejorando la rigidez del sistema y permitiendo un control más eficiente de las deformaciones en futuras versiones del banco de ensayo.

En cuanto a los instrumentos de medición, se recomienda reemplazar el manómetro actual por uno de menor rango, idealmente de 0 a 2 bar. El manómetro instalado (de 10 bar) presenta una escala demasiado amplia para los rangos de presión manejados en el ensayo, lo que dificulta una lectura precisa de las variaciones internas en la tubería, especialmente durante el aumento de caudal. Una escala más adecuada permitiría registrar de forma más sensible los cambios de presión, mejorando la interpretación de fenómenos hidráulicos como pérdidas por fricción, zonas de estancamiento o cavitación incipiente.

Adicionalmente, se sugiere aumentar la concentración de sólidos en futuras pruebas. Al trabajar con mezclas más representativas del transporte de pulpas reales, se logrará una mejor correspondencia con las condiciones consideradas en las fórmulas empíricas utilizadas. Esto no solo permitiría validar con mayor exactitud los modelos teóricos aplicados, sino que también ampliaría el rango de aplicación del banco para simular condiciones más exigentes y propias de ambientes mineros o industriales.

Otro aspecto crítico identificado durante la implementación del banco de ensayo fue el comportamiento de la bomba instalada frente al paso de partículas sólidas. El equipo original, diseñado para agua limpia, no resultó adecuado para condiciones con carga sólida, presentando daños por abrasión y obstrucción. De hecho, fue necesario desbastar tanto la salida como parte de la carcasa interna del rodete para permitir el paso de sólidos, lo cual

afectó su rendimiento hidráulico y su vida útil. Por ello, se recomienda utilizar una bomba más representativa de las que se emplean en el transporte de pulpas mineras, idealmente una versión reducida o de menor escala. Este tipo de bomba está específicamente diseñada para tolerar partículas abrasivas sin comprometer la integridad del equipo, lo que permitiría extender la vida útil del banco, aumentar la confiabilidad de los resultados y simular de forma más precisa las condiciones reales de operación en la industria minera.

En síntesis, el desarrollo del banco de ensayo permitió cumplir satisfactoriamente con los objetivos planteados, logrando diseñar, fabricar y validar un sistema modular y funcional para el estudio del transporte de partículas en suspensión, con aplicaciones directas en el contexto del transporte de pulpas mineras. A través de múltiples configuraciones geométricas, ensayos controlados y análisis comparativos entre resultados experimentales y modelos teóricos, fue posible caracterizar con precisión los fenómenos de sedimentación, recirculación y suspensión total en distintos regímenes de flujo. Sin embargo, la experiencia adquirida también evidenció oportunidades de mejora relevantes, estas recomendaciones, junto con los resultados obtenidos, no solo validan la efectividad del banco de ensayo como herramienta didáctica y experimental, sino que también entregan una base técnica sólida para su futura mejora, implementación en nuevos escenarios de estudio y escalamiento a condiciones industriales más complejas.

Bibliografía

- Banderas, A. V. (2016). *Ingeniería de fluidos*. UNAM.
- Bournaski, E., Berman, V., & Kril, S. (2017). *EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESULTS OF PIPELINE SLURRY TRANSPORT IN BULGARIAN MINING INDUSTRY*. Prague; Czech Republic.
- Bouso, J. L., & Martinez, P. (2023). Bombeo de pulpas minerales diferentes procedimientos de calculo. *Universidad Politecnica de Cartagena , Departamento de ingeniería minera y civil*, 18.
- Cengel., Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Santa Fe: McGraw - Hill Companies, Inc.
- Charpra., S. C., & Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. Santa Fe: McGraw - Hill Interamericana.
- DNBrida. (s.f.). *ASME B16.5 Bridas para tubería y accesorios bridados de NPS 1/2 a NPS 24 Métrico/Pulgadas Standard*. Obtenido de DNBrida: <https://www.dnbrida.com/brida-asme-b16.5.php>
- Duan, A., Lin, Z., Chen, e., & Li, Y. (2024). *A review on the hydraulic performance and erosion wear characteristic of the centrifugal slurry pump*. Hangzhou ; China: ScienceDirect.
- EDR. (s.f.). *MANÓMETRO 63MM 0 - 10 BAR EDR*. Obtenido de Hidroshop: https://hidroshop.cl/products/manometro-63mm-0-10-bar-edr?srsId=AfmBOop9JyCyzVNPAambjuT424U5HH_x1ThNr2XGkpXxaN00vZeMGrnz
- El-Agouz, S., Mohamed, H., & Nossir, E. (2020). Experimental investigation on a slurry pump at different operating parameters. *Journal of engineering research*, 87.
- Norglas. (s.f.). *Acrílicos Norglas*. Obtenido de Norglas: <https://norglas.cl/collections/acrilicos-norglas>
- Rhona. (s.f.). *Fuente de poder 24VDC / 2,5A*. Obtenido de Rhona.
- Schneider. (s.f.). *Interruptor Automatico Ic60N 1 x 6A Curva C 10KA Schneider*. Obtenido de Gobantes: <https://gobantes.cl/productos/1691-interruptor-automatico-ic60n-1-x-6a-curva-c-10ka-schneider.html>

- Schneider, E. (s.f.). *GUARDAMOTOR MAGNETOTERMICO TESYS GV, 3 POLOS, 9,14 A, MANDO POR PULSADOR 1841459 Schneider Electric*. Obtenido de dartel.cl: <https://www.dartel.cl/guardamotor-magnetotermico-tesys-gv--3-polos--9-14-a--mando-por-pulsador-1841459-schneider-electric/p>
- Sun, C., Xu, Z., Xiao, T., Cui, G., Zhang, X., Wang, P., & Jia, L. (2024). *Analyze of pipeline transport characteristics and optimization method of structural parameters in slurry shield circulation system with spiral structure*. Zhengzhou, China: ScienceDirect.
- Tamburrino, A. (2015). *Transporte hidráulico de sólidos en tuberías*. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago.
- Vial, J., Riquelme, M., Dezhkega, B., Acosta, C., Wieland, R., Mayorga, R., & Abarca, M. (1977). *Nch 397.Of 77: Tubos termoplásticos para conducción de fluidos -Diámetros exteriores y presiones nominales*. Santiago ; Chile.
- Wilson, K., Eddie, G., Sellgren, A., & Clift, R. (2006). *Slurry transport using centrifugal pumps*. New York , United States: Springer.
- Xu, J., Yao, Y., Yan, H., Zhou, N., Su, H., Li, M., . . . Wang, H. (2024). *Experimental study of pipeline pressure loss laws with large-size gangue slurry during the process of industrial grade annular pipe transportation*. Jiangsu ; China: ScienceDirect.
- Zhang, M., Chen, Y., Li, M., Wang, R., & Yu., G. (2023). *Reducing transport resistance in highly concentrated fine-grained slurry pipelines by vibration-induced fluidization*. Shanghai,China: ElSevier.

Anexo

Anexo A Planos de fabricación

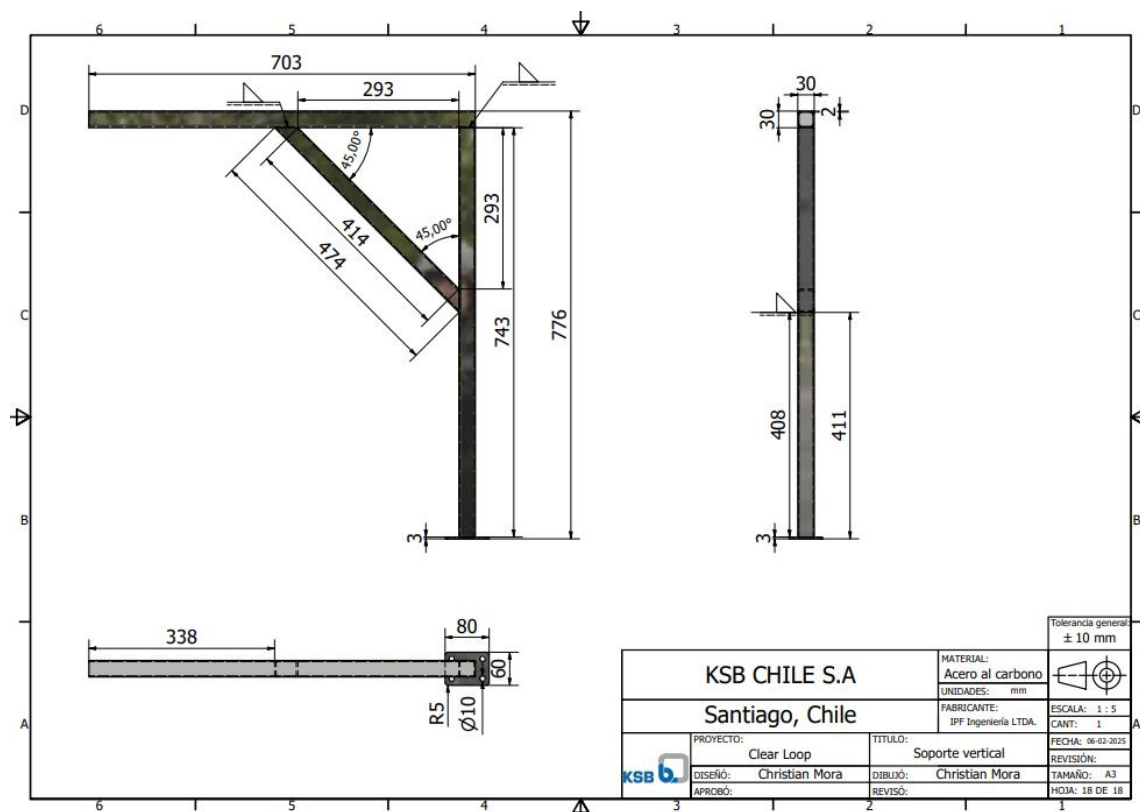


Imagen 6.1: Soporte de válvula y descarga

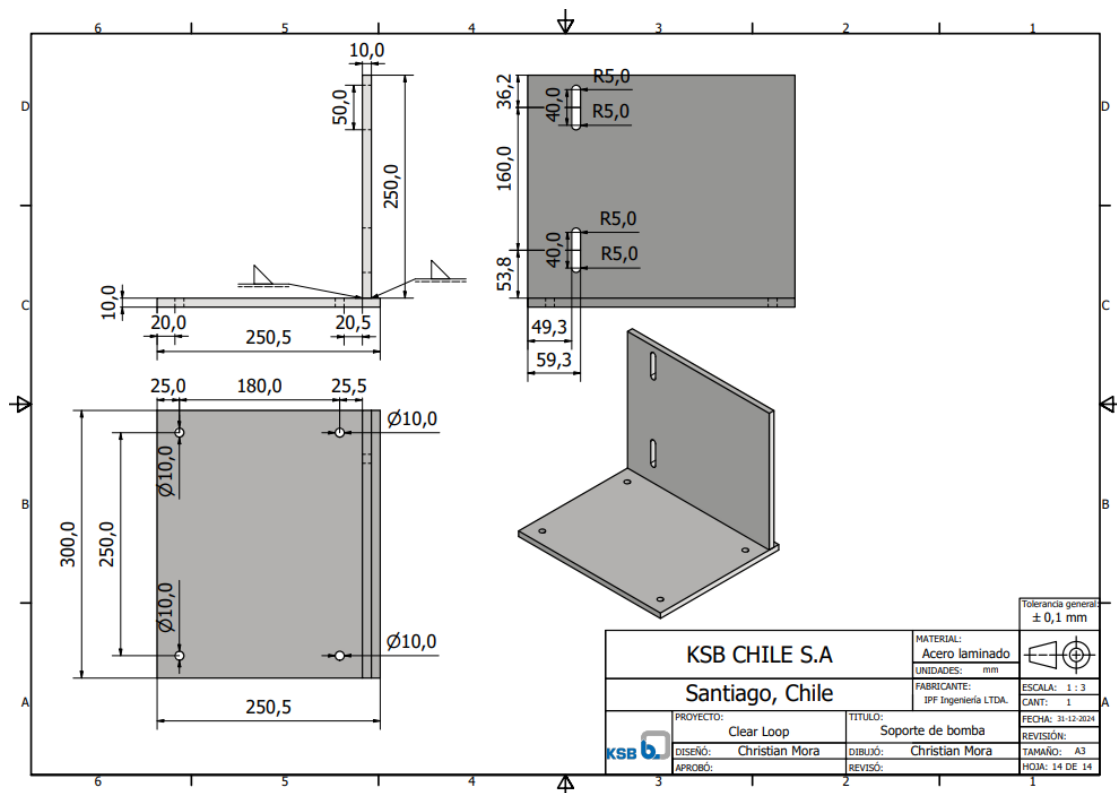


Imagen 6.2: Soporte de bomba

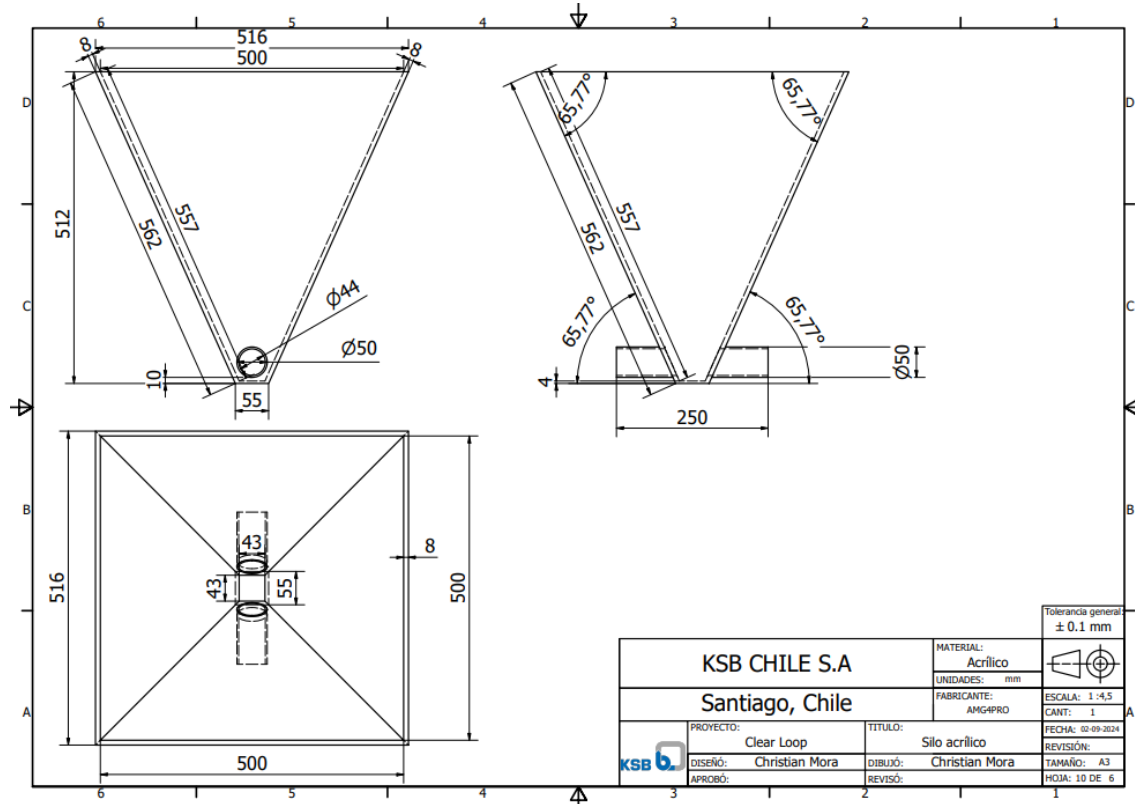


Imagen 6.3: Silo acrílico

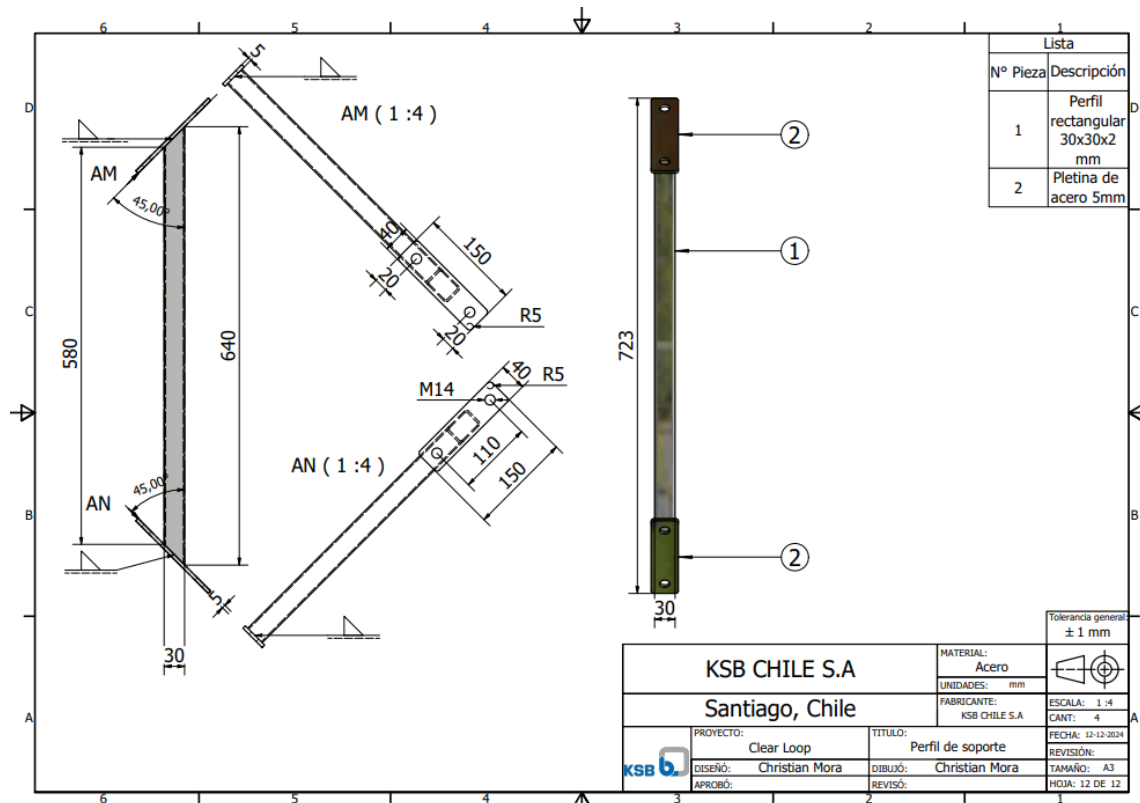


Imagen 6.4: Perfil de soporte

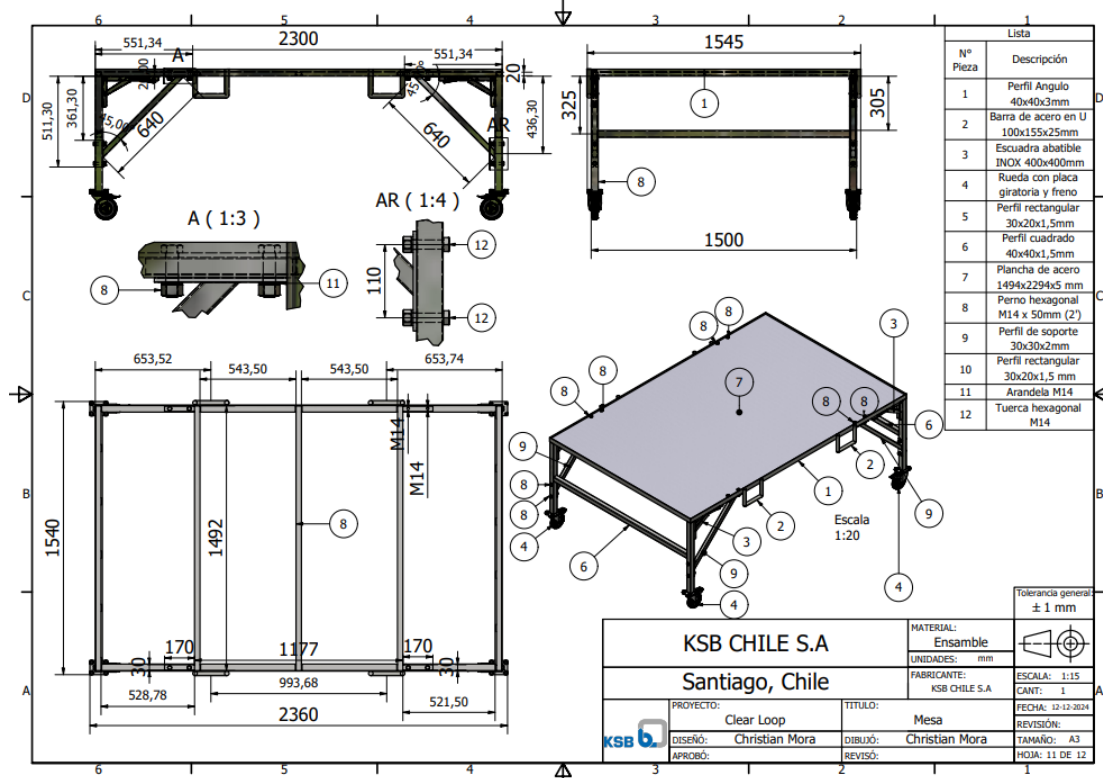


Imagen 6.5: Mesa

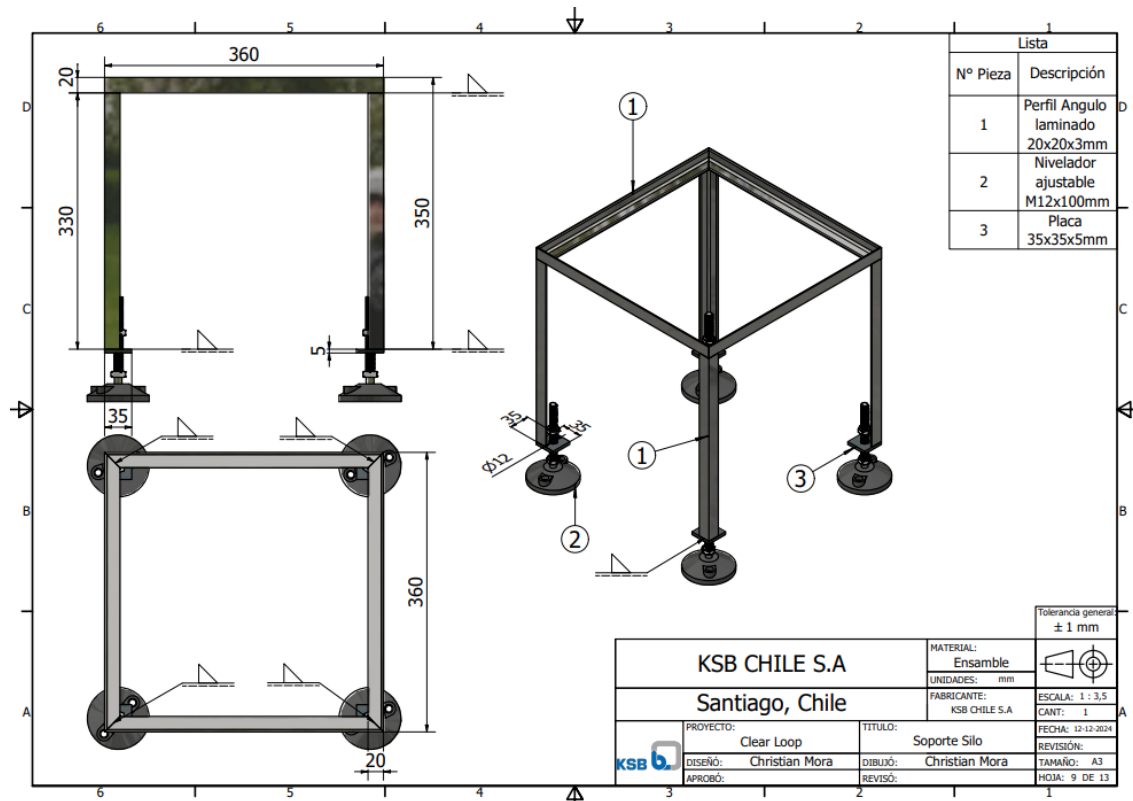


Imagen 6.6: Soporte silo

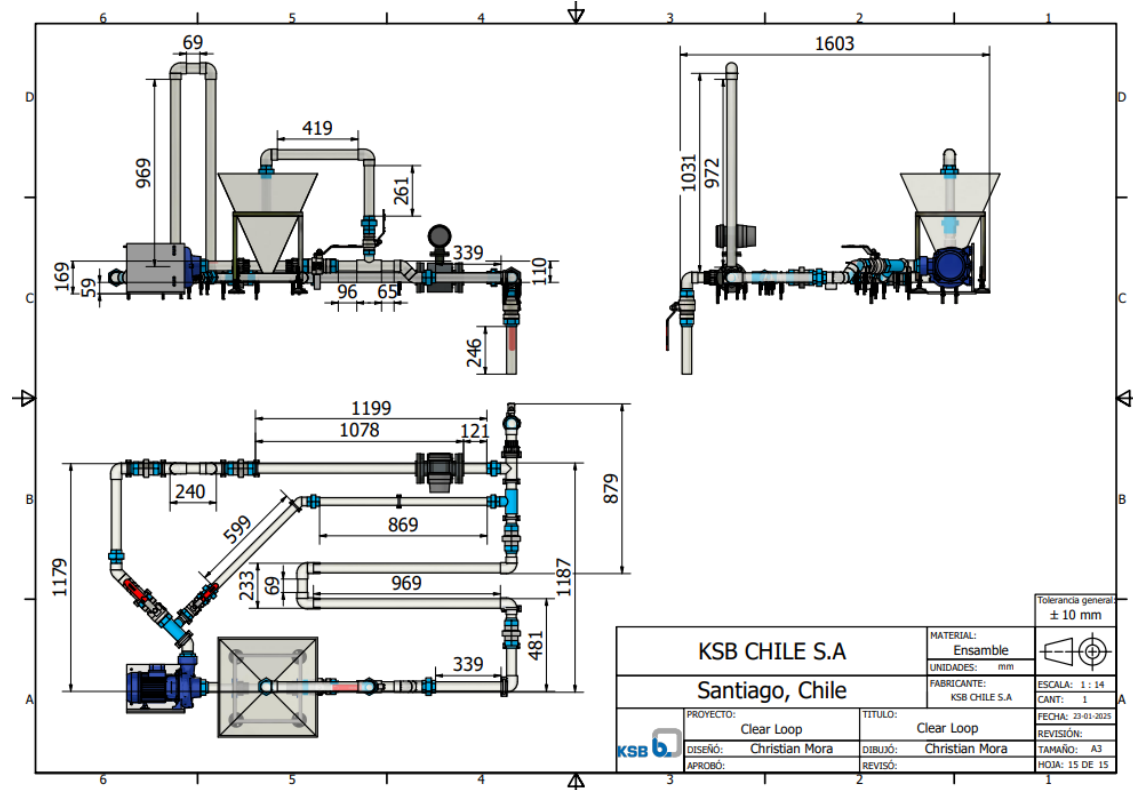


Imagen 6.7: Sistema de tuberías

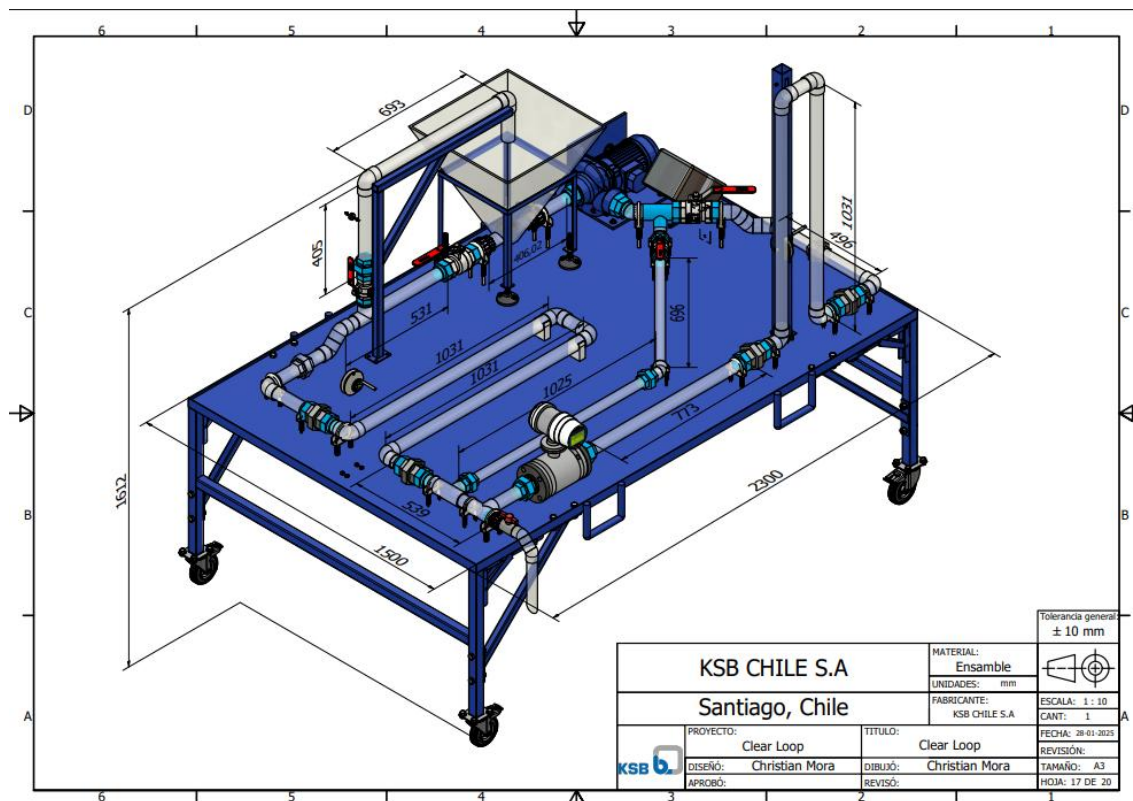


Imagen 6.8: Medidas generales del banco

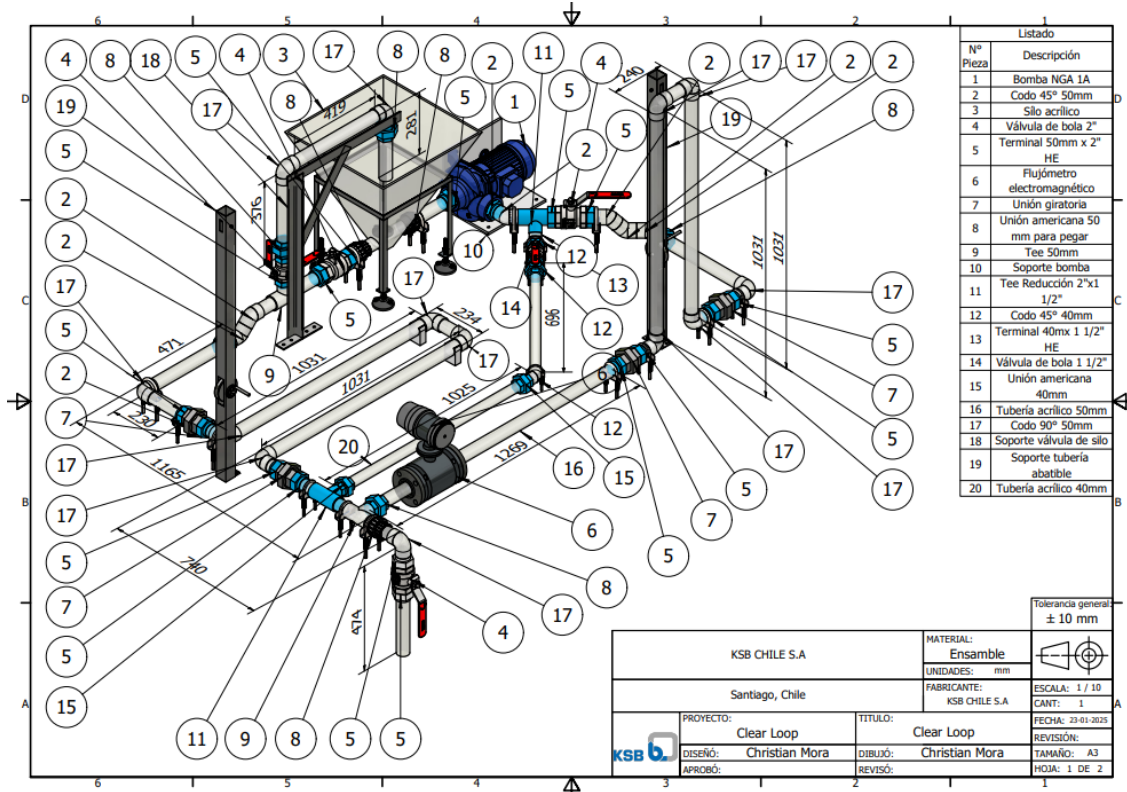


Imagen 6.9: Ensamble del banco

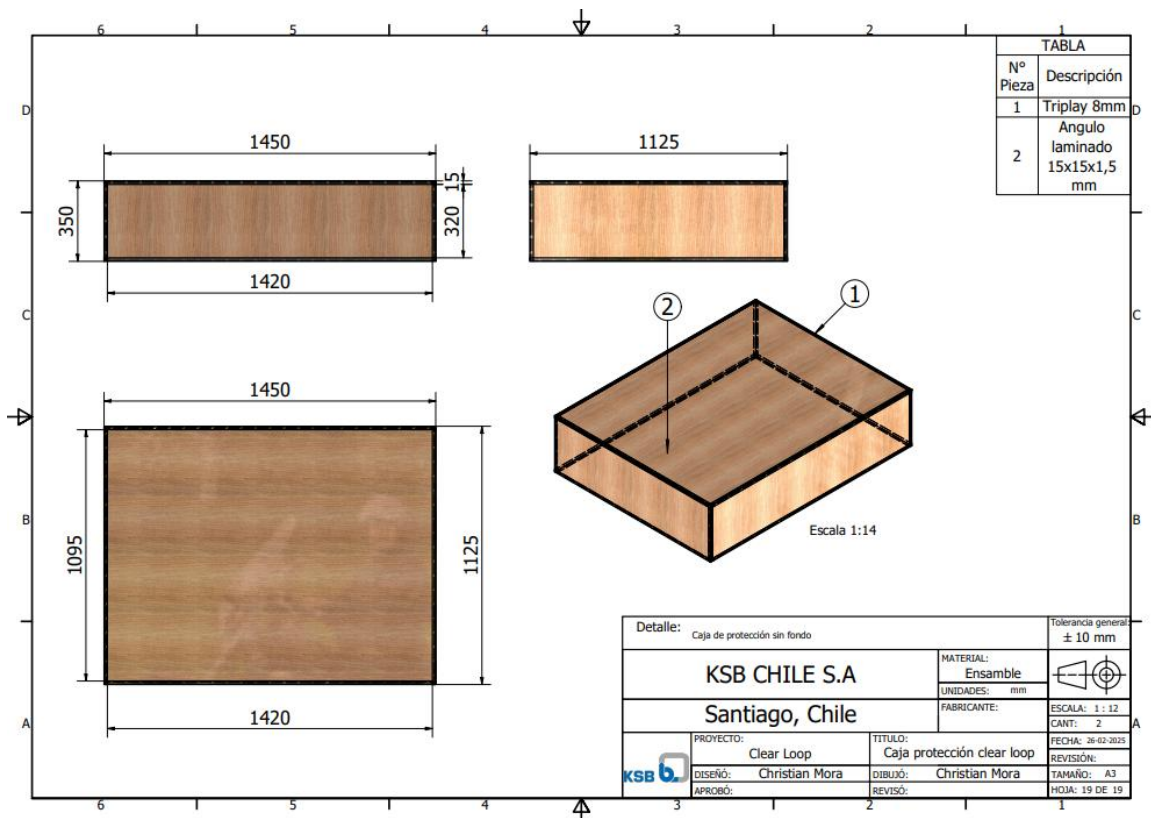


Imagen 6.10: Caja protección

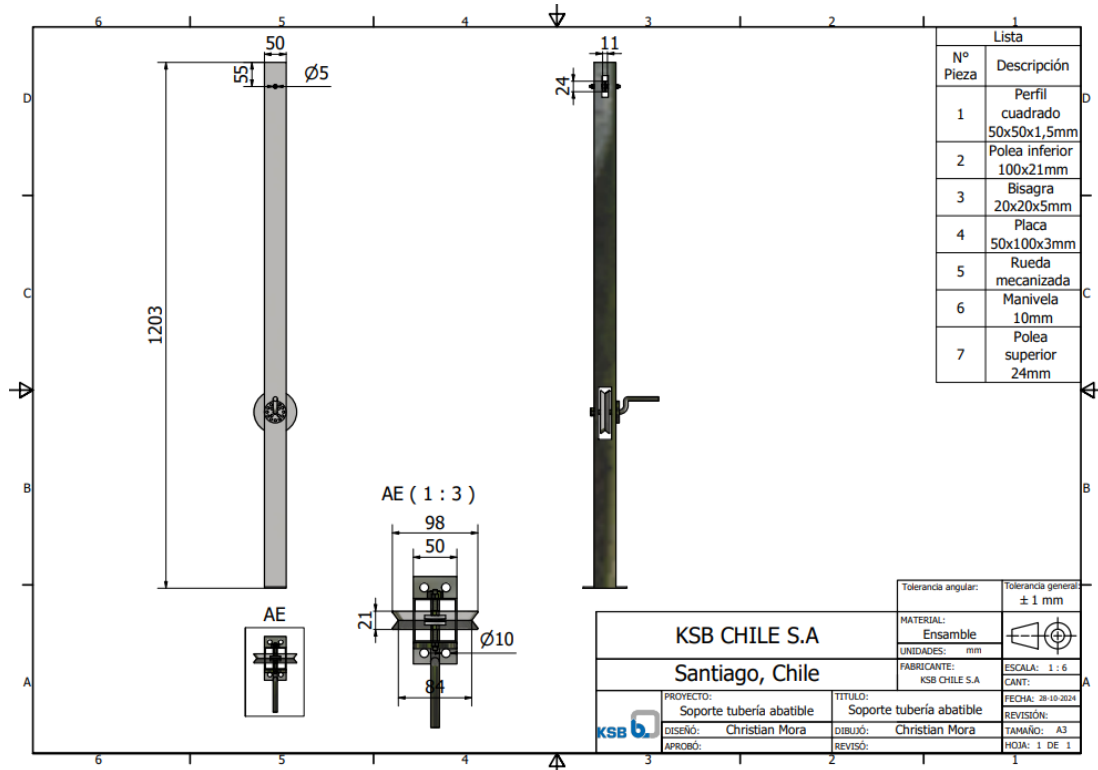


Imagen 6.11: Soporte tubería abatible

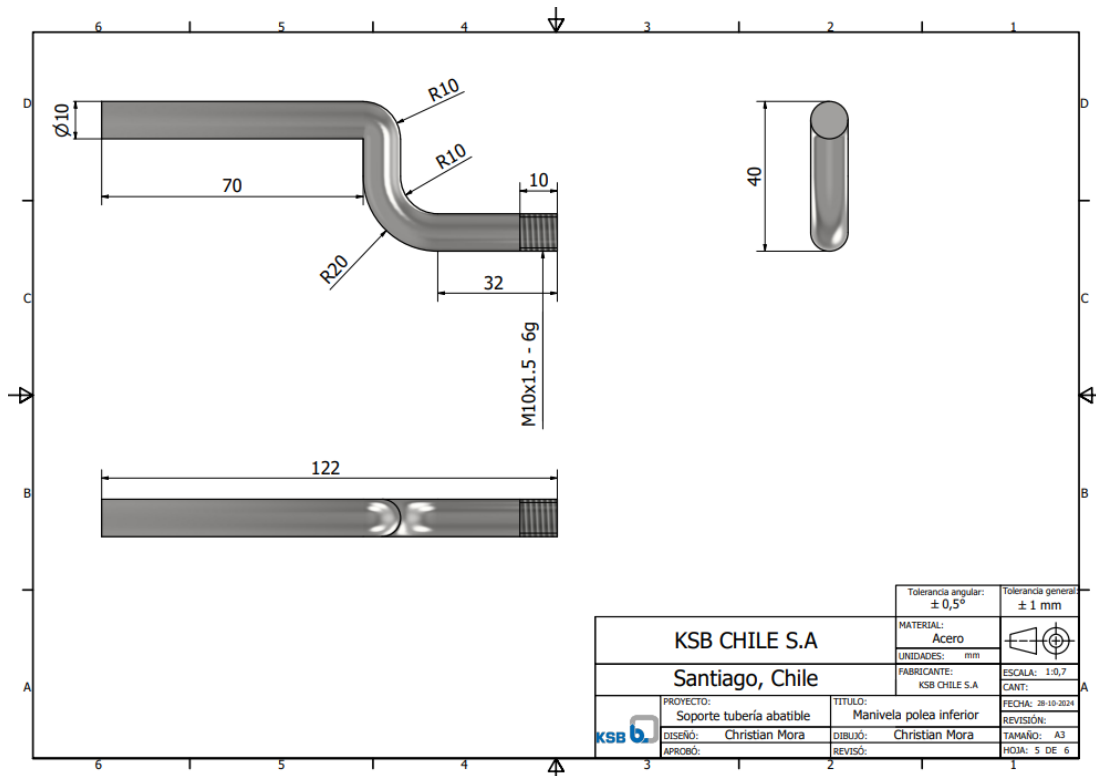


Imagen 6.12: Manivela polea superior

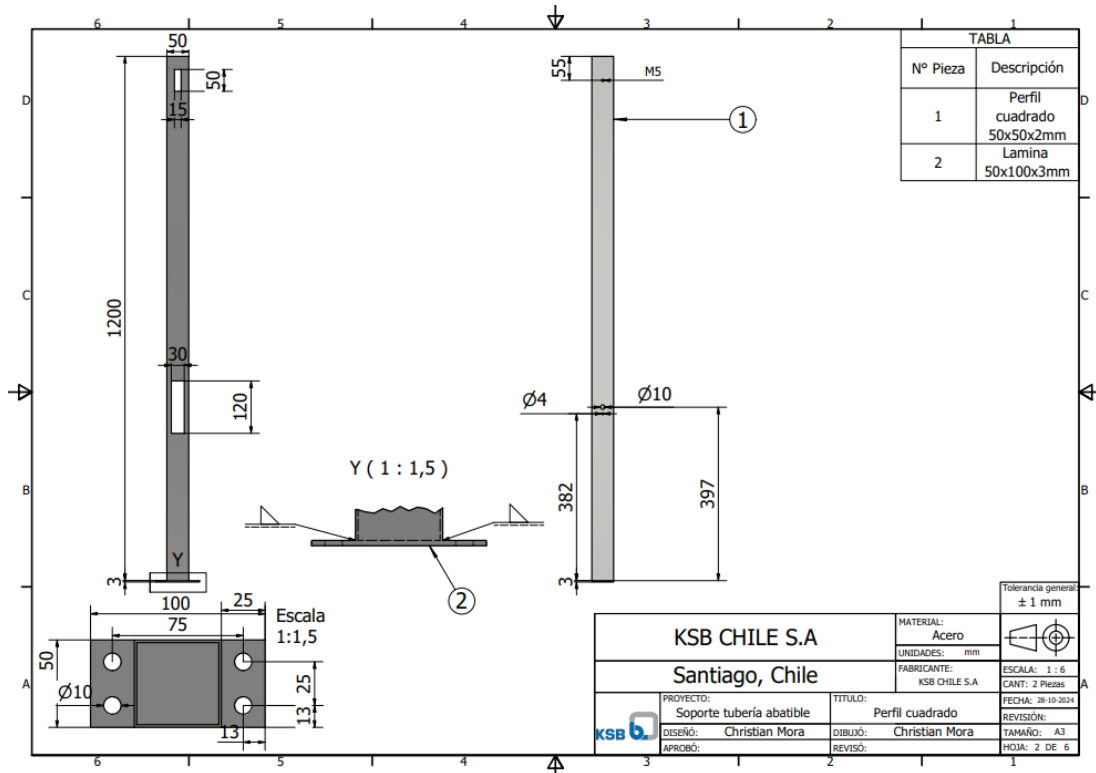


Imagen 6.13: Perfil cuadrado

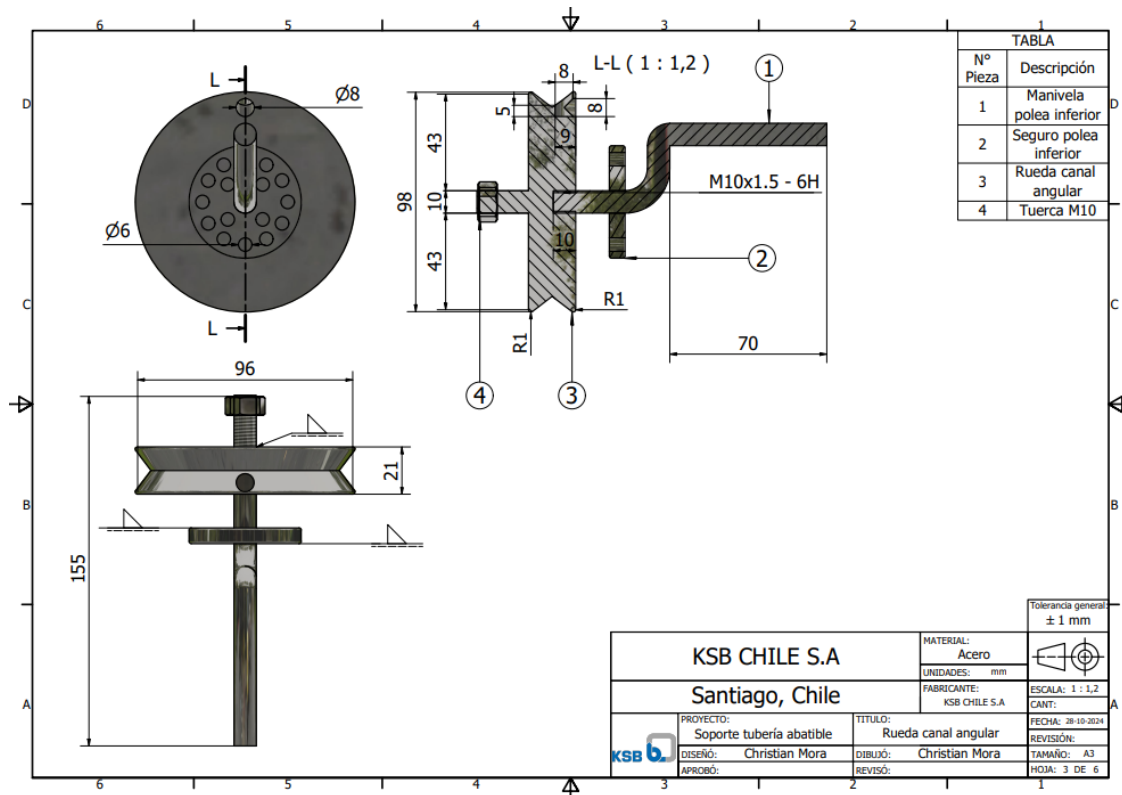


Imagen 6.14: Polea inferior

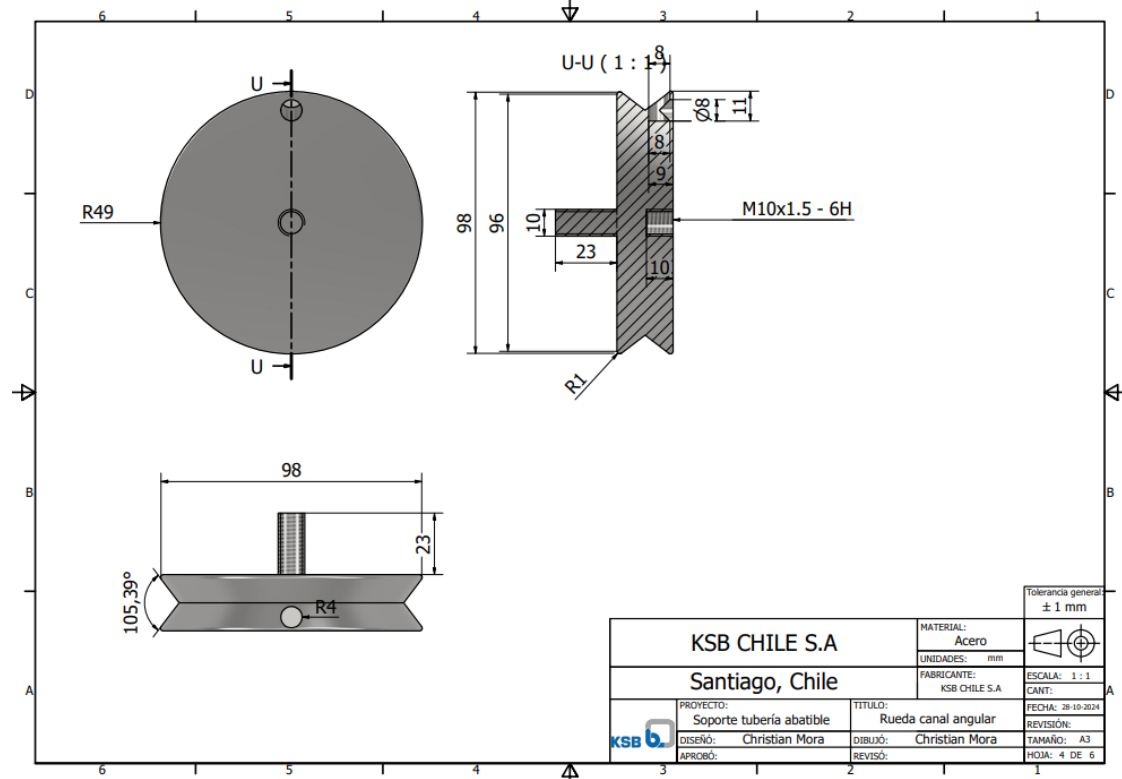


Imagen 6.15: Rueda canal angular

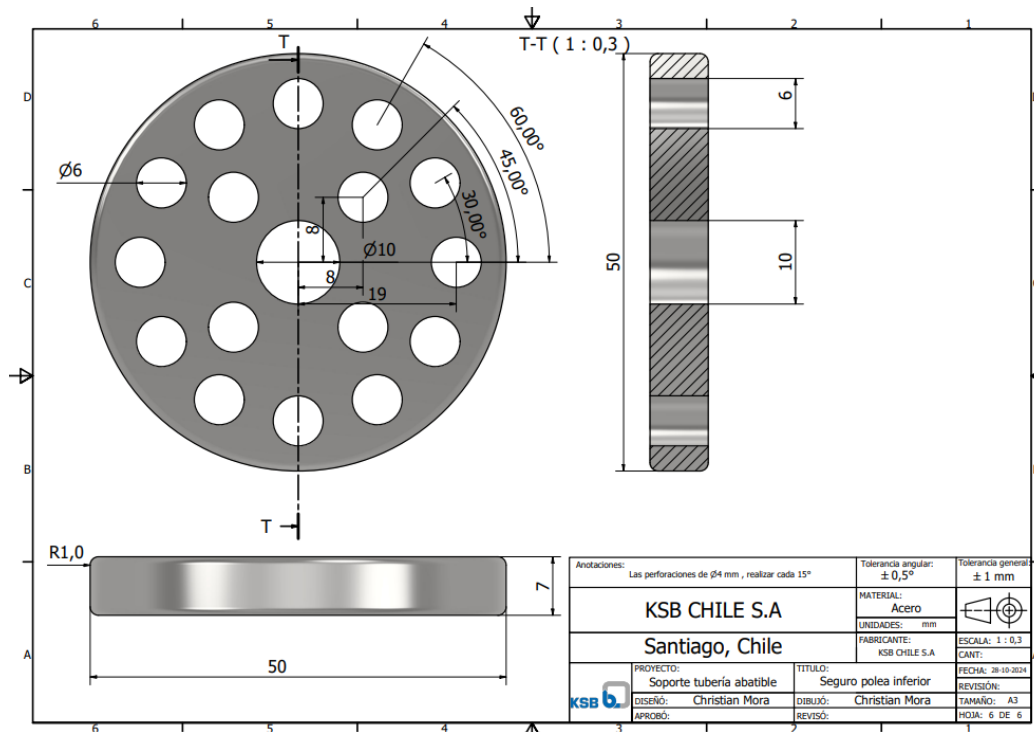


Imagen 6.16: Seguro polea inferior

Anexo B Diagrama de fuerza y comando

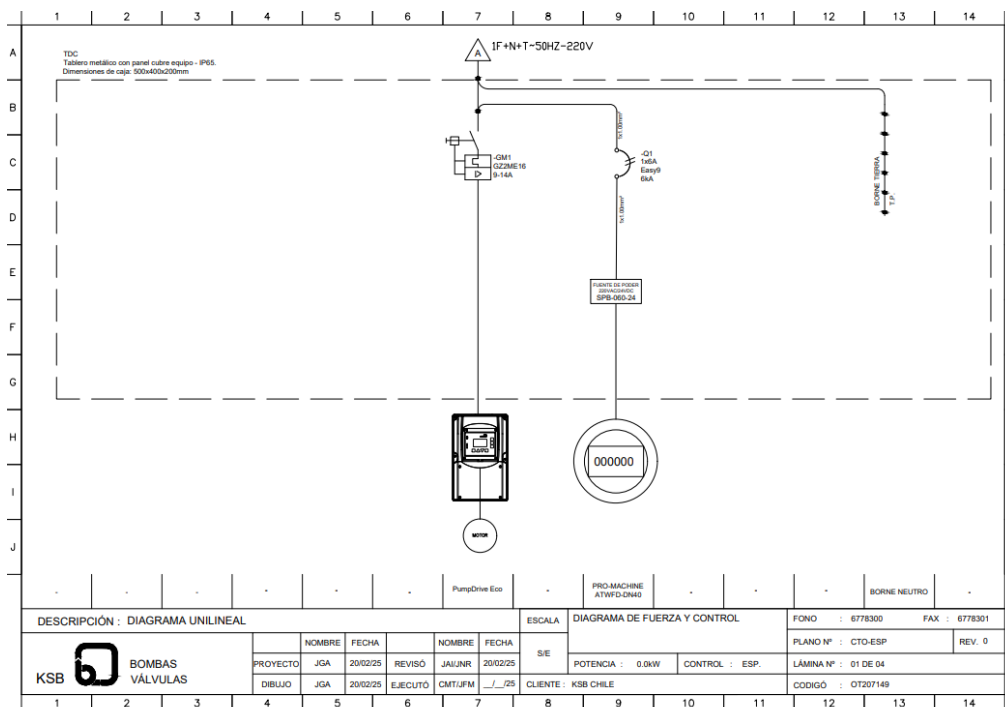


Imagen 6.17: Diagrama de disposición

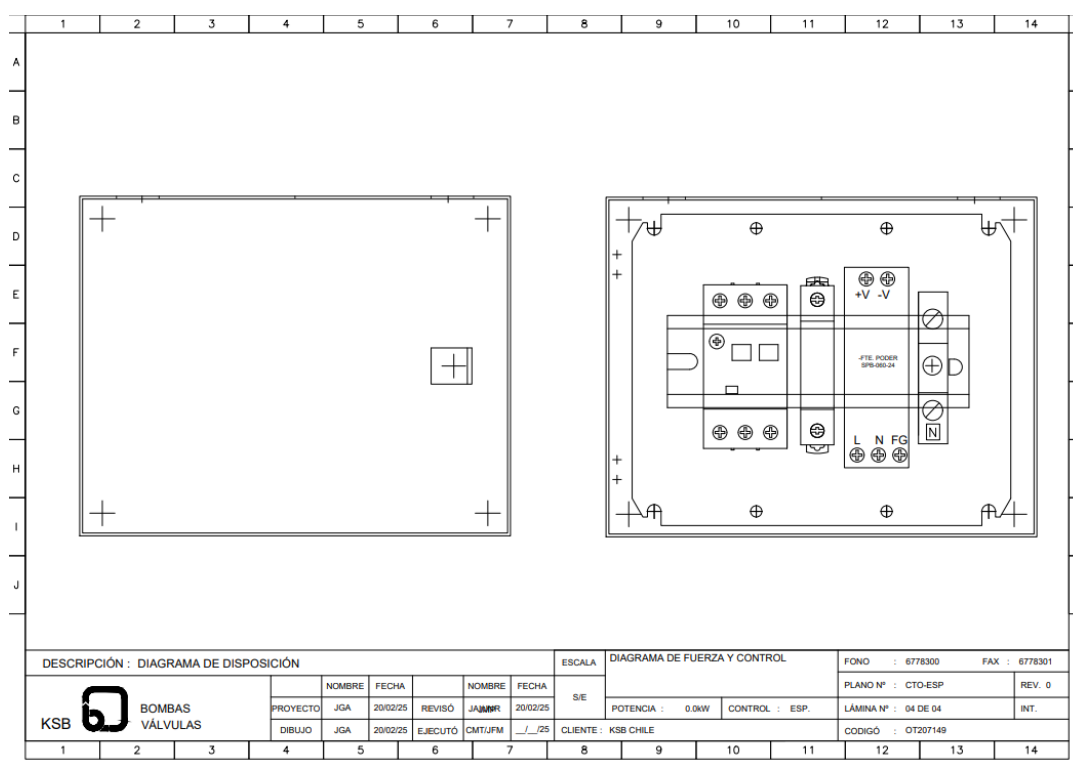


Imagen 6.20: Diagrama de disposición en tablero

Anexo C Compra de materiales

Conexiones y accesorios del sistema de tuberías



Imagen 6.21: Tubería de acrílico 40 mm y 50mm (Norglas, s.f.)

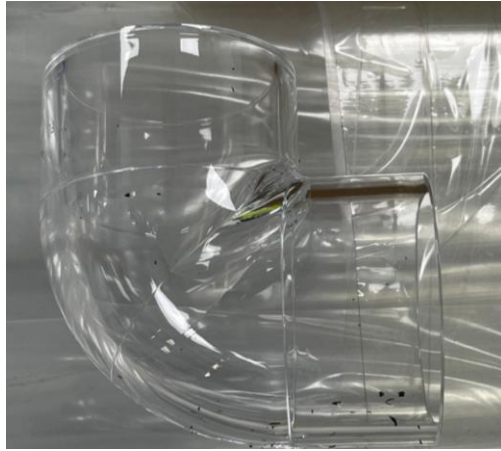


Imagen 6.22: Codo 90° de acrílico de 50mm



Imagen 6. 23: Partículas de ensayo



Imagen 6.24: Codo 45° de 40mm



Imagen 6.25: Unión Tee de acrílico



Imagen 6.26: Unión americana de 50mm



Imagen 6.27: Buje de reducción de 50 a 40mm



Imagen 6.28: Unión giratoria de 50 mm



Imagen 6.29: Terminal PVC de 50mm x 2'



Imagen 6.30: Terminal PVC de 50mm x 1 1/2'

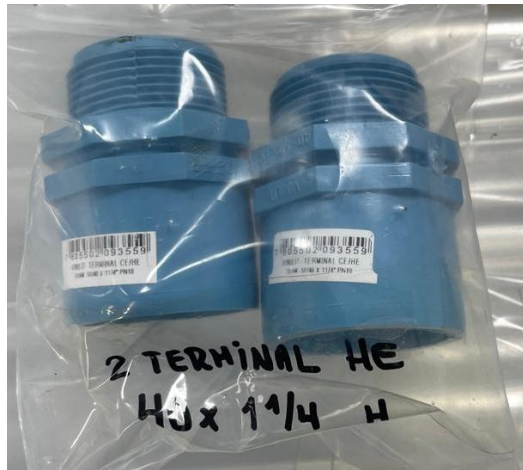


Imagen 6.31: Terminal PVC de 40mm x 1 1/4'



Imagen 6.32: Brida PVC con manguita volante de 50mm

Instrumentos de medición



Imagen 6.33: Bomba Pedrollo NGA 1A

Instrumentos eléctricos y de automatización



Imagen 6.34: Fuente de poder Autonics



Imagen 6.35: Interruptor automático Schneider (Schneider, s.f.)



Imagen 6.36: Guardamotor Schneider

Anexo D Código de programación

```
from math import log10,sqrt,pi
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.misc import derivative

# 1) Calculo de velocidad de sedimentacion de particulas

# 1.1) Volumen total de agua

L=11.4 #Largo de tubería en metros [m]
d_int=0.044 #Diametro interno de tubería en metros [m]
g=9.81 # Aceleracion de gravedad [m/s2]
den_agua=1000 # [kg/m3]
den_solidos= 2650 # [kg/m3]
Area_tuberia = pi*(d_int/2)**2 #m2

SG= 2.65 #Gravedad específica del sólido

V_silo = 10.3 #Litros
V_tuberias = Area_tuberia*L*1000
V_total = V_silo + V_tuberias #L
print(V_total,Area_tuberia)
# 1.2) Concentracion de solidos en peso

Masa_total_agua = (V_total/1000)*den_agua #[kg]
Masa_total_solidos = 0.54 # [kg]
Cw = (Masa_total_solidos/Masa_total_agua)

# 1.3) Concentracion de solidos en volumen

Volumen_solidos= Masa_total_solidos/den_solidos
Cv = (Cw*den_agua)/((den_solidos)-(Cw*(den_solidos-den_agua)))

# 1.4) Densidad de la pulpa

den_pulpa = Cv*(den_solidos-den_agua)+den_agua

# 1.5) Facto limite Fl
Fl = 1.35 # Obtenido del grafico de Mc & Cave

# 1.6) Velocidad limite de sedimentación
```

```

#1.6.1
v_limite = Fl*sqrt(2*g*d_int*(SG-1))

#1.6.2
us=1
d_particula_2_2=2.2 #mm
d_particula_3=3 #mm
d_particula_3_7=3.7 #mm

Ss=2.65
Sf=1
Vsm_nom_2_2=8.8*((us*(Ss-
Sf)/0.66*Sf)**0.55)*((d_int**0.7)*(d_particula_2_2**1.75))/((d_particula_2_2
**2)+0.11*(d_int**0.7))
Vsm_nom_3=8.8*((us*(Ss-
Sf)/0.66*Sf)**0.55)*((d_int**0.7)*(d_particula_3**1.75))/((d_particula_3**2)
+0.11*(d_int**0.7))
Vsm_nom_3_7=8.8*((us*(Ss-
Sf)/0.66*Sf)**0.55)*((d_int**0.7)*(d_particula_3_7**1.75))/((d_particula_3_7
**2)+0.11*(d_int**0.7))
Caudal_Vsm_nom_2=Vsm_nom_2_2*Area_tuberia*60000

print("Vs nominal para 2.2:",Vsm_nom_2_2,"Caudal l/min",Caudal_Vsm_nom_2)
print("Vs nominal para 3:",Vsm_nom_3)
print("Vs nominal para 3.7:",Vsm_nom_3_7)

ff=0.024 # Calculado con Colebrook - White

Vsm_max=((0.018/ff)**0.13)*sqrt(2*g*d_int*((Ss/Sf)-1))
caudal_Vsmax=Vsm_max*Area_tuberia*60000

print("Vs max:",Vsm_max , "caudal",caudal_Vsmax)

# 2) Altura de bombeo
# 2.1 ) Velocidad del flujo
Vel_flujo=1.13 # m/s

caudal_minimo=Vel_flujo*Area_tuberia*60000

print("Caudal necesario para llegar a la velocidad del
flujo",Vel_flujo,"es",caudal_minimo)

# 2.2) Numero de Reynolds
u = 0.001 #Viscosidad dinamica [Pa*s]
Re = (den_pulpa*Vel_flujo*d_int)/u

```

```

# 2.3) Factor de fricción de Colebrook - White con Newton Raphson

def ff(x0,epsilon,maxiter,Q): #Se debe ingresar el valor semilla , error ,
maximo de iteraciones y caudal (l/min)
    Q1=Q/60000 # se cambia unidades a m3/s
    L=11.352 #m
    d_int=0.044 #m
    g=9.81 #m/s2
    rugo=0.00005
    vis=0.001 #Pa*s
    den=1000 #kg/m3
    Area=pi*(d_int**2)/4
    vel=Q1/Area
    Re=(den*vel*d_int)/vis
    f=lambda f:-2.0*log10((ruco/(3.7*d_int))+(2.51/(Re*sqrt(f))))*sqrt(f)-1
    for k in range(0,maxiter):
        fx0=f(x0)
        if abs(fx0)<epsilon:
            ff=x0
        Dfx0=derivative(f,x0,dx=1e-10)
        if Dfx0 == 0:
            print('La derivada es nula en ',x0)
        x1=x0-fx0/Dfx0
        x0 = x1
    return x0

# 2.4) Perdidas de carga por fricción con ecuacion de Darcy Weisbach
f=ff(0.001,1e-5,100,150)
print("El Factor de fricción de Colebrook - White es:",f)
h_f = f*(L/d_int)*((Vel_flujo**2)/(2*g))

# 2.6) Perdidas de carga por accesorios
K_total = 0.9*11+0.45*2+1.8*2+5*2+5
hs = K_total*((Vel_flujo**2)/(2*g))

print("perdidas por accesorios:",hs,"Perdidas por fricción:",h_f,"diferencia
de altura",0.6)

print(Area_tuberia ,"Masa total de agua:", Masa_total_agua , V_total ,
V_tuberias)
print("Cw es",Cw,"CV es ",Cv,".Densidad de pulpa es:",den_pulpa,"Velocidad
limite es:",v_limite)
print ("Reynolds:",Re,K_total,hs)

```

```

# 2.7) Perdidas de carga totales

ht = h_f+hs+0.6 # Suponiendo que las dos valvulas estan abiertas
print (" Perdidas de carga totales:",ht)

#3) Comparación de curva del sistema vs curva de la bomba

def Altura_total(x0,epsilon,maxiter,Q):
    delta_z = 0.6
    Q1=Q/60000 #m3/s
    L=11.352
    d_int=0.044
    g=9.81
    rugo=0.00005
    vis=0.001 #"Pa*s"
    den=998 #kg/m3
    Area=pi*(d_int**2)/4
    vel=Q1/Area
    Re=(den*vel*d_int)/vis
    Codos=11*0.9
    T=2*1.8
    Valvula=2*0.45
    Y=1*1.8

    f=lambda f:-2.0*log10((ruco/(3.7*d_int))+(2.51/(Re*sqrt(f))))*sqrt(f)-1
    for k in range(0,maxiter):
        fx0=f(x0)
        if abs(fx0)<epsilon:
            ff=x0
            Dfx0=derivative(f,x0,dx=1e-10)
            if Dfx0 == 0:
                print('La derivada es nula en ',x0)
                #return None
            x1=x0-fx0/Dfx0
            x0 = x1
    K_t=0.9*11+0.75*2+1.8*2+0.2*4+2.5
    h_f=(ff*L/d_int)*((vel**2)/(2*g))
    h_s=K_t*((vel**2)/(2*g))
    h_total=h_f+delta_z+h_s
    print("tota K",K_t,"perdidas totales",h_total,"Factor de friccion",x0,"",
    Caudal,Q,"l/min",", Velocidad de flujo",vel,"m/s", "Reynolds",Re,"",
    Altura",h_total)
    return h_total

Q_x=[50,100,150,200,250,300,350] #Caudales de bomba Pedrollo NGA 1A

```

```

y=[0]

for i in Q_x:
    ht=Altura_total(0.001,1e-5,100,i)
    y.append(ht)
print("valores con Q=104,8",Altura_total(0.001,1e-5,100,104.8))

#print(1)
y2=[20,19.5,18,16.5,15,12.5,10,6]

y3=[2.3]
Q3=[104.8]

y4=[2.3,2.3,2.3,2.3,2.3]
Q4=[0,10,20,50,104.8]

y5=[11.5,11.5,11.5,11.5,11.5,11.5]
Q5=[0,50,100,150,200,270.5]

y6=[11.5]
Q6=[270.5]

y7=[3.9,3.7,3.2,2.7,2.3,1.9,1.3]
Q7=[70,80,95,104.8,110,115,120]

y8=[2.62,2.56,2.36,2.16,1.97,1.64,1.31,0.76]
Q8=[0,50,100,150,200,250,300,350]

Q_x.insert(0,0)
plt.plot(Q_x,y,"o",label="Curva del sistema")
plt.plot(Q_x,y2,"s",label="Curva de la bomba")
plt.plot(Q3,y3,"^",label="Punto de velocidad de sedimentación")
plt.plot(Q6,y6,"D",label="Operación de la bomba")
#plt.plot(Q7,y7,linestyle="--",label="Nueva eficiencia bomba",color="grey")
plt.plot(Q8,y8,"*",label="Nueva curva de bomba")
plt.xlabel("Caudal [L/min]")
plt.ylabel("Altura [mca]")
plt.grid(color = 'gray', linestyle = 'dashed')
#plt.plot(Q5,y5, color="brown")

#plt.plot(Q7, y7, linestyle="-", color="blue", linewidth=2, label="Línea
segmentada")

plt.legend()
plt.show()

```

```

#Leyes de afinidad

H1=12.5
Q1=(243+244+240)/3
N1=2900

Q2= 144
N2=(Q2/Q1)*N1

H2=1700

#Q2=Q1/(N1/N2)
print("Revoluciones con",Q2," l/min son",N2,"rpm")
print("Caudal al rebajar revoluciones",Q2)
print("Revolucion para llegar a", H2," metros de altura con un Q
de",Q1,"es:", N2)

caudal_necesario = (Vel_flujo*Area_tuberia)*60000
print("caudal necesario",caudal_necesario,"l/min")

# 3) Calculos estructurales para simulacion

l_p1=2.3 # largo de viga en metros
l_p2= 1.5 # Largo de viga corta en metros

A_p1=0.03 # ancho de viga

Area_p1=l_p1*A_p1
Area_p2=l_p2*A_p1
Area_tablero=l_p1*l_p2

P1=(500/Area_p1)/1000000 # MPa
P2=(500/Area_p2)/1000000 # MPa
P3=(880/Area_tablero)/1000000

print(Area_p1,Area_p2,P1,P2,P3)

```