



Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica y
Mecatrónica**

**Diseño y simulación de un filtro dúplex para optimizar la vida útil de las
válvulas de succión y descarga de bombas Geho en la unidad minera
Morococha**

Tesis presentada por:

Arostegui Carrera, Dussan

ORCID: 0009-0000-9966-0508

para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista

Asesor:

Dr. Caceres Nuñez, Augusto Emilio Carlos

ORCID: 0000-0002-2207-9237

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA MECANICA ELECTRICA Y MECATRONICA
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 11 de Mayo del 2026

Dictamen: 015148-C-EPIMMEM-2026

Visto el borrador del expediente 015148, presentado por:

2004202941 - AROSTEGUI CARRERA DUSSAN

Titulado:

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FILTRO DÚPLEX PARA OPTIMIZAR LA VIDA ÚTIL DE LAS
VÁLVULAS DE SUCCIÓN Y DESCARGA DE BOMBAS GEHO EN LA UNIDAD MINERA MOROCOCHA**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**29667313 - ALCÁZAR ROJAS HERMANN ENRIQUE
DICTAMINADOR**



**29644724 - CARPIO RIVERA MARCO ANTONIO
DICTAMINADOR**



**46292714 - SILES NATES FERNANDO DAVID
DICTAMINADOR**



DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FILTRO DÚPLEX PARA OPTIMIZAR LA VIDA ÚTIL DE LAS VÁLVULAS DE SUCCIÓN Y DESCARGA DE BOMBAS GEHO EN LA UNIDAD MINERA MOROCOCHA

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1%

2

repositorio.ucsm.edu.pe

Fuente de Internet

1%

3

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

4

Submitted to Universidad Católica de Santa María

Trabajo del estudiante

<1%

5

f40.iaea.org

Fuente de Internet

<1%

6

repositorio.unc.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

7

www.aniq.org.mx

Fuente de Internet

<1%

8

es.slideshare.net

Fuente de Internet

<1%

9

1library.co

Fuente de Internet

<1%

10

www.slideshare.net

Fuente de Internet

<1%

11

www.iberisa.com

Fuente de Internet

<1%

12

www.researchgate.net

Fuente de Internet

<1%

13

repositorio.upp.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

Submitted to Universidad Estatal Amazonica-

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida, fortalecer mi corazón e iluminar mi camino durante este proceso, y por poner en mi vida a personas valiosas que fueron soporte y compañía en esta etapa.

A mi esposa, Alejandra, por su amor, paciencia, comprensión y apoyo incondicional. Gracias por acompañarme en los momentos de mayor esfuerzo y por ser parte fundamental de este logro.

A mi hija, Alessa, mi mayor inspiración, por ser la razón que me impulsa a superarme cada día y llenar mi vida de alegría, fortaleza y propósito.

A mi madre, Nelly, por su amor, confianza y apoyo permanente; gracias por brindarme las bases para construir mi futuro. A mi padre, Vladimir, por su ejemplo de perseverancia, constancia y fortaleza. A mi hermana, Faridde, por su cariño y apoyo constante.

Este logro también es de ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Mi total gratitud a la Unidad Minera ubicada en Morococha por la oportunidad de realizar la recolección de información, así como la experiencia vivida durante el periodo de trabajo en este equipo que fue diseñado exclusivamente para dicha unidad, así como la posibilidad de realizar un curso de capacitación en la casa matriz para consagrar la solución definitiva que se necesita en la bomba GEHO.

Con ello fue posible realizar un ahorro significativo en el presupuesto para el área de mantenimiento mecánico concentradora.

Gracias a mi alma mater, Universidad Católica de Santa María, al decano y a toda la plana de ingenieros de la facultad de ingeniería mecánica, mecánica eléctrica y mecatrónica quienes con su conocimiento, experiencia y consejos me guiaron de la mejor manera para la culminación de mi tesis de grado.

EPÍGRAFE

“La excelencia en la ingeniería se alcanza cuando cada diseño no solo funciona, sino que perdura.”— Henry Petroski



RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo diseñar y simular un sistema de filtrado dúplex que permita optimizar la vida útil de las válvulas de succión y descarga de las bombas GEHO TPZM 2000 utilizadas en el transporte de relaves en la Unidad Minera Morococha. El problema abordado se origina en el desgaste abrasivo prematuro de dichos componentes, ocasionado por la elevada concentración de partículas sólidas presentes en el fluido bombeado, lo que genera frecuentes paradas no programadas y elevados costos de mantenimiento.

El estudio corresponde a una investigación de tipo aplicada, con nivel explicativo y enfoque cuantitativo, desarrollada mediante un diagnóstico técnico del sistema de bombeo, el análisis físico-químico y granulométrico del relave, y el diseño ingenieril del filtro dúplex bajo criterios hidráulicos, estructurales y normativos. La validación del diseño se realizó a través de simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y análisis por elementos finitos (FEA), evaluando parámetros como pérdida de carga, distribución de presión, tensiones estructurales y factores de seguridad.

Los resultados de las simulaciones evidencian que el filtro dúplex mantiene la pérdida de carga dentro de límites admisibles y cumple con los criterios estructurales establecidos por la normativa vigente, permitiendo reducir de manera significativa el impacto del desgaste abrasivo sobre las válvulas. Se concluye que el diseño propuesto constituye una solución técnica viable que contribuye a la mejora de la confiabilidad operativa y a la optimización de la vida útil de los componentes críticos del sistema de bombeo.

Palabras clave: filtro dúplex, bombas GEHO, desgaste abrasivo.

ABSTRACT

The objective of this research is to design and simulate a duplex filtration system that optimizes the service life of the suction and discharge valves of the GEHO TPZM 2000 pumps used to transport tailings at the Morococha Mining Unit. The problem addressed stems from the premature abrasive wear of these components, caused by the high concentration of solid particles present in the pumped fluid, which leads to frequent unscheduled shutdowns and high maintenance costs.

The study is an applied research project with an explanatory level and a quantitative approach, developed through a technical diagnosis of the pumping system, physical-chemical and granulometric analysis of the tailings, and the engineering design of the duplex filter based on hydraulic, structural, and regulatory criteria. The design was validated through computational fluid dynamics (CFD) simulations and finite element analysis (FEA), evaluating parameters such as pressure drop, pressure distribution, structural stresses, and safety factors.

The results of the simulations show that the duplex filter maintains pressure loss within acceptable limits and complies with the structural criteria established by current regulations, significantly reducing the impact of abrasive wear on the valves. It is concluded that the proposed design is a viable technical solution that contributes to improving operational reliability and optimizing the service life of critical components of the pumping system.

Keywords: duplex filter, GEHO pumps, abrasive wear.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I..... 3

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3

1.1. Formulación del Problema 3

1.1.1. Problema General..... 3

1.1.2. Problemas Específicos 3

1.2. Justificación e Importancia..... 3

1.2.1. Justificación Científica..... 4

1.2.2. Justificación Técnica..... 4

1.2.3. Justificación Económica 4

1.2.4. Justificación Social 5

1.2.5. Justificación Ambiental 5

1.2.6. Viabilidad del Estudio..... 5

1.2.7. Área, Subárea y Línea de investigación..... 5

1.3. Objetivos 6

1.3.1. Objetivo General..... 6

1.3.2. Objetivo Específicos 6

1.4. Alcances y Limitación del Estudio..... 7

1.4.1. Alcances..... 7

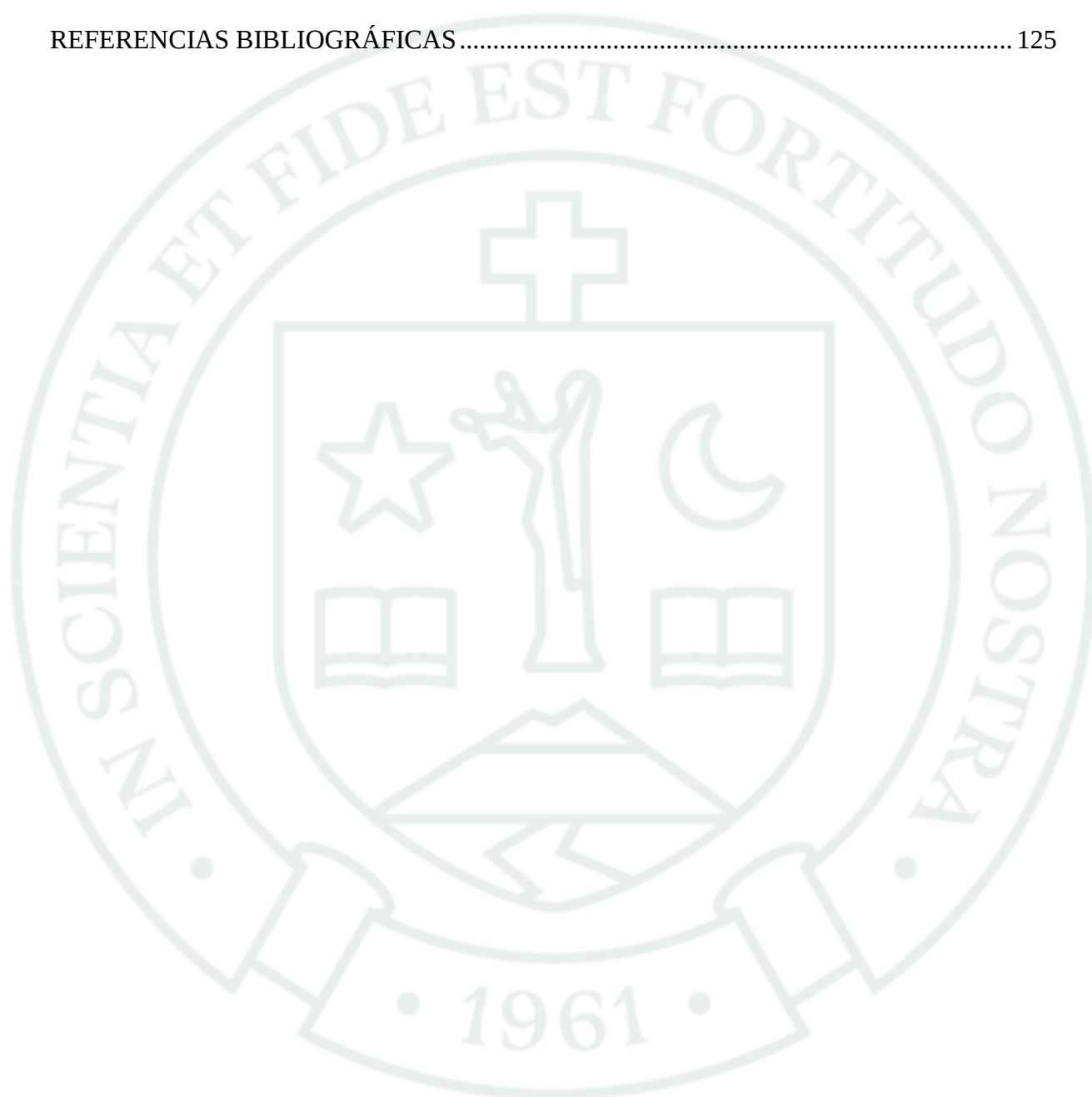
1.4.2. Limitaciones.....	8
1.5. Hipótesis.....	9
1.5.1. Hipótesis General.....	9
1.5.2. Hipótesis Específicas	9
CAPÍTULO II	11
2. MARCO REFERENCIAL Y TEÓRICO.....	11
2.1. Antecedentes	11
2.1.1. Antecedentes Nacionales	11
2.1.2. Antecedentes Internacionales.....	13
2.2. Marco Teórico	17
2.2.1. Fundamentos del desgaste abrasivo en medios solido-liquido	18
2.2.2. Modelado numérico del desgaste y comportamiento partícula - fluido	20
2.2.3. Filtración previa en succión y protección de componentes críticos	21
2.2.4. Influencia de la geometría hidráulica y condiciones del flujo	23
2.2.5. Síntesis conceptual aplicada al diseño del filtro dúplex	24
2.3. Marco Conceptual	26
2.4. Bases Legales y Normas	28
2.4.1. Normas ASME aplicadas al diseño mecánico y de presión.....	28
2.4.2. Normas ASTM aplicadas a materiales y resistencia al desgaste	29
2.4.3. Normas ISO para gestión de calidad y desempeño hidráulico	30
2.4.4. Normas API aplicables a equipos de bombeo y válvulas	31
2.4.5. Normas IEEE aplicadas al control e instrumentación.....	31
2.4.6. Normas y leyes nacionales.....	32

CAPÍTULO III	34
3. MARCO METODOLÓGICO	34
3.1. Tipo y Nivel de Investigación	34
3.2. Procedimiento Metodológico	35
3.3. Variables y Operacionalización	36
3.4. Población y Muestra.....	38
3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	39
3.6. Procedimientos de Análisis	41
3.7. Cronograma de Ejecución	42
3.8. Recursos Necesarios.....	44
CAPÍTULO IV	47
4. DESARROLLO DEL DISEÑO Y VALIDACIÓN	47
4.1. Descripción del Sistema, Equipo o Proceso	47
4.1.1. Diagnóstico del estado actual del sistema de bombeo GEHO.....	47
4.1.2. Caracterización del sistema de bombeo	47
4.1.3. Componentes críticos y modos de falla	48
4.1.4. Indicadores de confiabilidad operacional	49
4.1.5. Frecuencia de fallas por unidad	50
4.1.6. Frecuencia de fallas por tipo de válvula	51
4.1.7. Evaluación de tiempos de inactividad.....	52
4.1.8. Análisis de causas de falla	53
4.2. Requerimientos de diseño	54
4.2.1. Caracterización físico-química del fluido bombeado	54
4.2.2. Composición general del relave bombeado	55

4.2.3. Composición mineralógica del relave.....	56
4.2.4. Granulometría del fluido bombeado	57
4.2.5. Análisis químico del fluido.....	58
4.2.6. Efecto combinado del fluido sobre las válvulas	58
4.3. Memoria de cálculo.....	59
4.3.1. Datos de entrada y criterios de diseño	59
4.3.2. Dimensionamiento hidráulico del filtro dúplex	61
4.3.3. Pérdida de carga (criterio y verificación).....	64
4.3.4. Selección de materiales y normas	65
4.3.5. Verificación de espesor de carcasa (ASME VIII-1)	66
4.3.6. Datasheet técnico referencial del filtro dúplex (base de diseño)	67
4.4. Simulación y modelado computacional	69
4.4.1. Propósito y alcance de la simulación.....	69
4.4.2. Condiciones de modelado	70
4.4.3. Resultados de simulación hidráulica (CFD)	71
4.4.4. Resultados de simulación estructural (FEA).....	72
4.4.5. Validación comparativa y análisis de desempeño.	73
4.4.6. Condiciones de frontera de la simulación CFD	74
4.4.7. Resultados de la pérdida de carga y comparación de configuraciones	75
4.4.8. Análisis del comportamiento del flujo	76
4.5. Selección de materiales y componentes	77
4.5.1. Fundamento técnico de la selección	77
4.5.2. Materiales del filtro tipo dúplex.....	78
4.5.3. Componentes principales y auxiliares	79

4.5.4. Normas, seguridad y consideraciones para una futura instalación	80
4.6. Planos y diagramas.....	81
4.6.1. Presentación general del sistema	81
4.6.2. Tipología de planos incluidos	81
4.6.3. Diagramas funcionales.....	83
4.7. Resultados parciales del diseño y validación de normas técnicas.....	87
4.7.1. Cumplimiento técnico y normativo del diseño	87
4.7.2. Evaluación de resultados parciales del diseño	88
CAPÍTULO V	90
5. RESULTADOS, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN ECONÓMICA	90
5.1. Presentación de resultados de cálculos, simulaciones o pruebas	90
5.2. Tablas, figuras, gráficos comparativos.....	95
5.3. Análisis de desempeño vs objetivos.....	100
5.4. Análisis económico proyectado del filtro duplex.....	102
5.5. Análisis detallado del OPEX antes y después de la implementación del filtro dúplex.	113
5.5.1 Alcance del análisis de OPEX	113
5.5.2 Estructura del OPEX evaluado	114
5.5.3 OPEX antes de la implementación del filtro dúplex.....	115
5.5.4 PEX después de la implementación del filtro dúplex	116
5.5.5 Comparación del OPEX entre escenarios	117
5.5.6 Interpretación del OPEX para la empresa.....	117
5.5.7 Alcances y limitaciones del análisis de OPEX	118
5.6. Discusión de resultados frente a antecedentes y teorías.....	119

CAPÍTULO VI.....	122
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	122
6.1. CONCLUSIONES	122
6.2. RECOMENDACIONES	124
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125

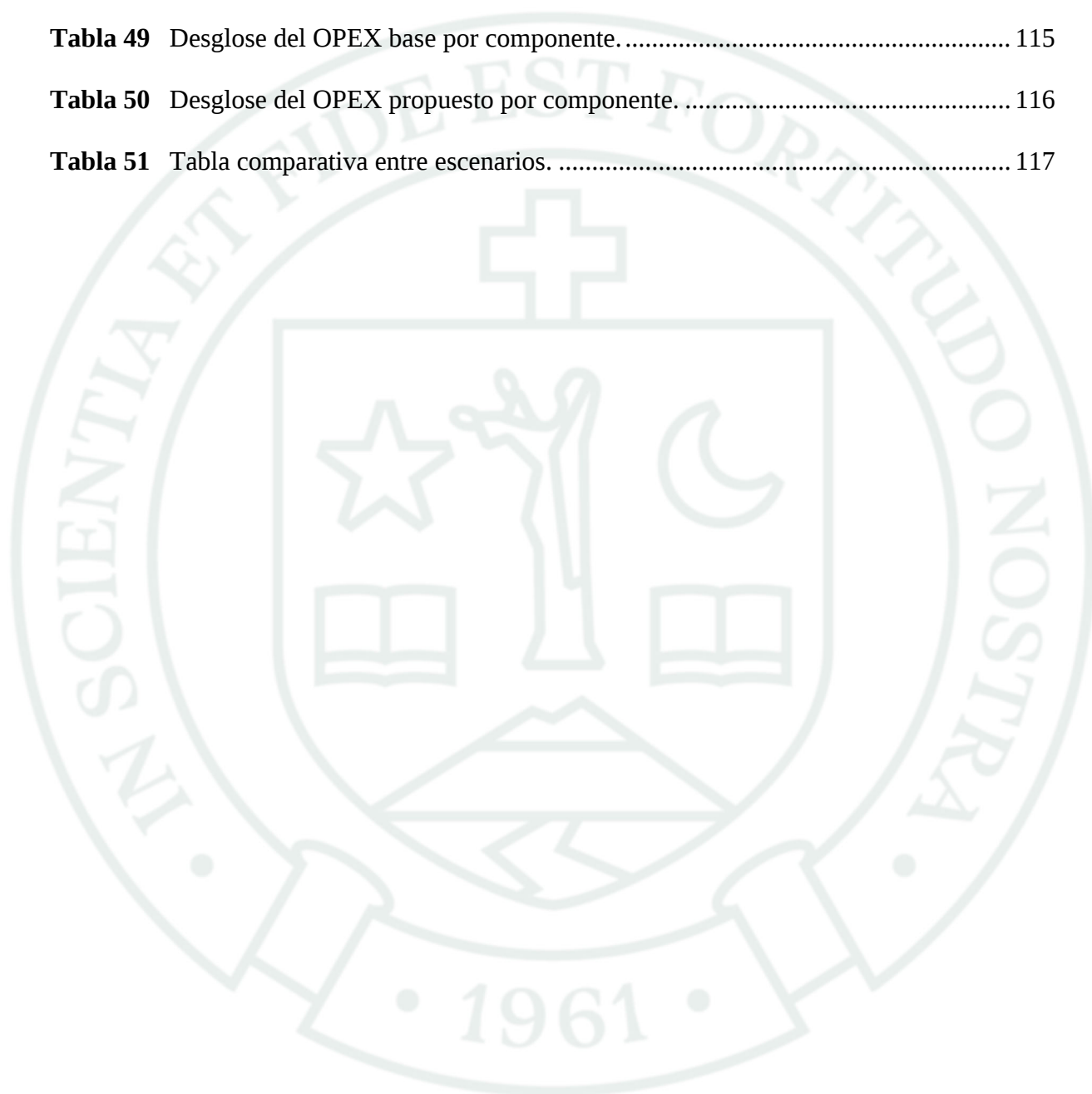


ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Resumen antecedentes internacionales.	15
Tabla 2	Comparación de enfoques teóricos aplicables al desgaste y la filtración en sistemas de bombeo.....	17
Tabla 3	Norma ASME.....	29
Tabla 4	Norma ASTM.....	30
Tabla 5	Norma ISO	30
Tabla 6	Norma API	31
Tabla 7	Norma IEEE	32
Tabla 8	Normas y leyes	32
Tabla 9	Cuadro operacionalización de variables.....	37
Tabla 10	Instrumentos de análisis y simulación.....	40
Tabla 11	Cronograma general de ejecución del estudio.....	43
Tabla 12	Recursos humanos.....	44
Tabla 13	Recursos materiales y técnicos.....	45
Tabla 14	Recursos financieros	46
Tabla 15	Componentes críticos del sistema de bombeo GEHO.	49
Tabla 16	Indicadores de confiabilidad de las bombas GEHO TPZM 2000.....	50
Tabla 17	Frecuencia de fallas por tipo de válvula y unidad GEHO.....	52
Tabla 18	Impacto del tiempo de inactividad en el sistema GEHO.	53
Tabla 19	Propiedades físico-químicas del relave bombeado por el sistema GEHO.	55
Tabla 20	Composición mineralógica del relave.	56
Tabla 21	Composición química del agua de relave.....	58
Tabla 22	Interacción físico-química y su efecto en componentes del sistema GEHO.....	59
Tabla 23	Datos de entrada y criterios de diseño del filtro dúplex GEHO.....	60

Tabla 24	Resumen de área de filtración (diseño dúplex)	63
Tabla 25	Dimensiones preliminares de canastilla	64
Tabla 26	Selección de materiales y normas aplicadas al diseño del filtro dúplex	65
Tabla 27	Ficha técnica resumida	68
Tabla 28	Condiciones de simulación (CFD y FEA).....	70
Tabla 29	Resultados de la simulación CFD	71
Tabla 30	Resultados de la simulación FEA.....	72
Tabla 31	Comparativa de desempeño del sistema GEHO antes y después del diseño del filtro dúplex	73
Tabla 32	Condiciones de frontera empleadas en la simulación CFD del filtro dúplex.....	74
Tabla 33	Comparación hidráulica de configuraciones del medio filtrante	75
Tabla 34	Correlación normativa y criterios técnicos de selección.....	77
Tabla 35	Materiales de fabricación del filtro dúplex.....	78
Tabla 36	Componentes y especificaciones técnicas del filtro dúplex	79
Tabla 37	Equipos y protocolos de montaje	80
Tabla 38	Validación de cumplimiento normativo del diseño del filtro dúplex.....	87
Tabla 39	Comparativa de resultados hidráulicos teóricos y simulados.....	88
Tabla 40	Resultados de cálculo hidráulico y mecánico del filtro dúplex.....	92
Tabla 41	Comparación de desempeño antes y después de la implementación del filtro dúplex.	95
Tabla 42	Indicadores de desempeño del sistema GEHO para escenarios simulados del filtro dúplex.	98
Tabla 43	Análisis de desempeño comparativo frente a los objetivos de la investigación.....	101
Tabla 44	Inversión total estimada del sistema.....	107

Tabla 45	Flujo de caja proyectado del sistema de filtración dúplex	110
Tabla 46	Flujo monetario por año	111
Tabla 47	Indicadores financieros del proyecto.....	112
Tabla 48	Costo unitario válvula cónica GEHO.....	114
Tabla 49	Desglose del OPEX base por componente.....	115
Tabla 50	Desglose del OPEX propuesto por componente.....	116
Tabla 51	Tabla comparativa entre escenarios.....	117



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mecanismo conceptual de desgaste abrasivo en válvula de succión y descarga de bombas GEHO.....	20
Figura 2	Relación conceptual entre filtración previa en succión y reducción del desgaste de válvulas.	25
Figura 3	Disposición de las bombas GEHO en la planta concentradora de la Unidad Minera Morococha.	48
Figura 4	Distribución del MTBF por unidad de bombeo GEHO.	51
Figura 5	Diagrama de causa-efecto del desgaste en válvulas GEHO.....	54
Figura 6	Curva de distribución granulométrica del relave bombeado.....	57
Figura 7	Diseño en 3D del sistema de bombeo.	69
Figura 8	Distribución de presiones y velocidades en el filtro dúplex.....	71
Figura 9	Mapa de tensiones de Von Mises, deformación máxima y factor de seguridad en el cuerpo del filtro.	72
Figura 10	Contorno de velocidad y líneas de corriente de flujo.....	76
Figura 11	Diagrama de flujo hidráulico del filtro dúplex integrado al sistema GEHO.....	84
Figura 12	Diagrama funcional de conmutación del filtro dúplex.....	85
Figura 13	Diagrama eléctrico básico del sistema de monitoreo y control del filtro dúplex.....	86
Figura 14	Distribución de presiones y líneas de flujo del filtro dúplex (resultados CFD).....	93
Figura 15	Distribución de tensión de Von Mises en el cuerpo del filtro dúplex (resultados FEA).	94
Figura 16	Comparación de resultados hidráulicos teóricos vs. Simulados (CFD) del filtro dúplex.	96

Figura 17 Comparación de tensiones teóricas y simuladas mediante análisis FEA. 97

Figura 18 Comparativo de indicadores operativos estimados para escenarios

simulados..... 98

Figura 19 Relación entre pérdida de carga y disponibilidad del sistema GEHO..... 99



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Registro fallas de válvula cónica en la bomba 255-PP-048	134
Anexo 2 Registro fallas de válvula cónica en la bomba 255-PP-049.	136
Anexo 3 Distribución de las 10 bombas GEHO con numero de TAG.	139
Anexo 4 Gasto generado por las válvulas cónicas en los años 2015 y 2016 al utilizar repuestos nuevos.....	140
Anexo 5 Plano general del sistema de bombeo GEHO.	144
Anexo 6 Planos del cuerpo del filtro dúplex GEHO.....	145
Anexo 7 Planos de canastilla filtrante duplex.....	148
Anexo 8 Diseño del filtrante dúplex en el software SolidWorks.....	150
Anexo 9 Matriz de consistencia.....	151

INTRODUCCIÓN

En el ámbito minero, las bombas GEHO TPZM 2000 son fundamentales para garantizar la continuidad del transporte de relaves en la Unidad Minera de Morococha. Sin embargo, se ha identificado un desgaste prematuro de las válvulas de succión y descarga, que reduce su vida útil de las 2,000 horas establecidas por el fabricante a apenas 720 horas en condiciones reales. Esta reducción afecta directamente la disponibilidad de los equipos, incrementa los costos de mantenimiento y limita la eficiencia del proceso de bombeo de relaves, generando la necesidad de soluciones técnicas que optimicen la confiabilidad operativa (Jonathan Rowland, 2024).

En el ámbito internacional, la International Council on Mining and Metals (ICMM) ha resaltado que la gestión de relaves representa uno de los principales retos en sostenibilidad minera, recomendando la incorporación de tecnologías de filtrado y bombeo que minimicen el desgaste de componentes críticos. En países como Canadá y Chile, se ha implementado el uso de filtros dúplex en sistemas de bombeo de pulpas densas, lo que ha permitido reducir significativamente en un 35% los costos de mantenimiento y mejorar la confiabilidad de los equipos utilizados en el transporte de relaves (ICMM, 2020).

Asimismo, la Institution of Mechanical Engineers (IMechE) en el Reino Unido ha destacado en sus informes técnicos la efectividad de aplicar sistemas de protección contra abrasión en bombas hidráulicas de gran capacidad. Estas prácticas, adoptadas en minas de Australia, han incrementado la vida útil de válvulas y diafragmas en más del 30%, generando un impacto positivo tanto en la seguridad de las operaciones como en la eficiencia energética de los procesos de transporte de minerales (IME, 2021).

En el contexto peruano, el Instituto de Ingenieros de Minas del Perú (IIMP) ha publicado estudios que evidencian la necesidad de modernizar los sistemas de transporte de relaves mediante soluciones de ingeniería que incluyan sistemas de filtrado. Según el IIMP, estas

tecnologías pueden reducir hasta en un 40% las paradas no programadas en plantas concentradoras, fortaleciendo la sostenibilidad y competitividad de la minería nacional (IIMP, 2022).

Por su parte, el Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM), a través de su *Anuario Minero*, ha advertido sobre los altos costos derivados de fallas recurrentes en sistemas de bombeo de relaves. El organismo recomienda la adopción de mejores prácticas de ingeniería, entre ellas la implementación de filtros industriales, para garantizar la continuidad de los procesos y disminuir el impacto ambiental asociado a fugas y fallas en el transporte de pulpas mineras (MINEM, 2021).

En el caso específico de la Unidad Minera Morococha, el problema radica en la alta abrasividad de partículas minerales como skarn y hornfels, que no son totalmente retenidas en las etapas de separación y llegan al sistema de bombeo. Estas partículas provocan reflujo y desgaste acelerado en los asientos y alojamientos de válvulas, generando paradas no programadas y costos elevados por reemplazo de componentes. Por lo tanto, resulta imprescindible evaluar soluciones de ingeniería, como el diseño y simulación de un filtro dúplex, que permitan recuperar la vida útil nominal de 2,000 horas y mejorar la confiabilidad del sistema.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Formulación del Problema

1.1.1. Problema General

¿Cómo el diseño y simulación de un filtro dúplex puede optimizar la vida útil de las válvulas de succión y descarga de las bombas GEHO en la Unidad Minera Morococha?

1.1.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las principales fallas y tiempos de inactividad asociados al desgaste de las válvulas de succión y descarga en las bombas GEHO?
- ¿Qué características físicas, químicas y granulométricas del fluido bombeado influyen de manera significativa en el desgaste abrasivo de las válvulas?
- ¿Qué criterios hidráulicos, estructurales y normativos deben considerarse para el diseño de un filtro dúplex compatible con el sistema de bombeo GEHO?
- ¿Cómo se comporta hidráulicamente el filtro dúplex diseñado, en términos de pérdida de carga, distribución de presión y caudal, de acuerdo con los resultados de la simulación CFD?
- ¿Cuál es el comportamiento estructural del filtro dúplex frente a las condiciones de presión de operación, según los resultados del análisis por elementos finitos?
- ¿En qué medida la incorporación del filtro dúplex contribuye a la reducción del desgaste de las válvulas, incrementando su vida útil?

1.2. Justificación e Importancia

El presente trabajo de investigación se justifica en la necesidad de mejorar la confiabilidad y eficiencia de los sistemas de bombeo en la Unidad Minera Morococha, donde las bombas GEHO cumplen un rol esencial en el transporte de pulpas y fluidos abrasivos.

Actualmente, el desgaste acelerado de las válvulas de succión y descarga ocasiona paradas no programadas, disminuye la eficiencia del proceso y genera altos costos de mantenimiento correctivo. Ante esta problemática, el diseño e implementación de un filtro dúplex se plantea como una alternativa viable que permitirá reducir la concentración de partículas sólidas en el fluido, incrementando la vida útil de las válvulas y garantizando la continuidad operativa de los equipos.

1.2.1. Justificación Científica

El estudio contribuye al desarrollo del conocimiento en el área de ingeniería mecánica e hidráulica aplicada a la minería, al proponer un diseño de filtración especializado para condiciones extremas de operación. La investigación permite generar datos experimentales sobre el comportamiento del filtro dúplex en relación con el desgaste de las válvulas, lo cual puede servir de base para futuras investigaciones en equipos de bombeo de alta presión en medios abrasivos.

1.2.2. Justificación Técnica

Desde el punto de vista técnico, el diseño y simulación de un filtro dúplex asegura la operación continua de las bombas GEHO al permitir el cambio de elementos filtrantes sin detener el sistema. Esto garantiza mayor confiabilidad, disminuye la frecuencia de fallas y optimiza la eficiencia de los equipos. Asimismo, el proyecto incluye un proceso de simulación y validación del diseño, lo que permite adaptar la solución a las condiciones reales de caudal, presión y composición del fluido en la unidad minera.

1.2.3. Justificación Económica

La propuesta de diseño y simulación del filtro dúplex permite realizar una evaluación económica proyectada, basada en la comparación entre el escenario actual de operación y el escenario técnico optimizado obtenido mediante simulaciones hidráulicas y estructurales. A

partir de los resultados numéricos, se estima una reducción significativa en la frecuencia de reemplazo de válvulas de succión y descarga, lo que se traduce en menores costos de mantenimiento correctivo y reducción de pérdidas asociadas a paradas no programadas.

1.2.4. Justificación Social

A nivel social, la investigación contribuye a mejorar las condiciones de trabajo del personal de mantenimiento y operación, al reducir la exposición frecuente a intervenciones correctivas en equipos de bombeo de gran escala. Asimismo, al garantizar la continuidad del proceso productivo, se fortalece la estabilidad laboral y la competitividad de la unidad minera, lo cual repercute en beneficios económicos para la comunidad y la región.

1.2.5. Justificación Ambiental

La optimización del sistema de bombeo mediante filtración también tiene un componente ambiental, ya que disminuye el riesgo de fugas, derrames y pérdidas de material durante las fallas de los equipos. Al reducir las paradas y mantenimientos frecuentes, se minimiza el consumo de repuestos y lubricantes, contribuyendo a una operación más sostenible y con menor impacto ambiental.

1.2.6. Viabilidad del Estudio

El proyecto es viable tanto técnica como económicamente, dado que se cuenta con información sobre las características del sistema de bombeo, acceso a los equipos de la Unidad Minera Morococha y disponibilidad de materiales para la fabricación e implementación del filtro dúplex. Asimismo, la validación experimental se puede realizar en condiciones reales de operación, lo que asegura resultados confiables y aplicables en la práctica.

1.2.7. Área, Subárea y Línea de investigación

De acuerdo con la clasificación OCDE para campos de investigación y desarrollo, la presente tesis se ubica en:

- **Área:** 2.00.00 Ingeniería y Tecnología.
- **Subárea:** 2.03.00 Ingeniería Mecánica.
- **Disciplina específica:** 2.03.01 Ingeniería Mecánica.
- **Línea de investigación propuesta:** Diseño mecánico, confiabilidad y mantenimiento de sistemas de bombeo para fluidos abrasivos en minería.

Esta clasificación es coherente con la naturaleza del estudio, ya que la investigación aborda el diseño de un componente mecánico de protección, su validación estructural e hidráulica y su impacto en la confiabilidad operativa del sistema GEHO.

La clasificación OCDE ubica “Ingeniería y tecnología” como área general y “Ingeniería mecánica” como subárea específica dentro de los campos de I+D.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar y simular un sistema de filtrado dúplex que permita optimizar la vida útil de las válvulas de succión y descarga de las bombas GEHO en la Unidad Minera Morococha.

1.3.2. Objetivo Específicos

- Diagnosticar el estado actual del sistema de bombeo GEHO en la Unidad Minera Morococha, identificando los principales mecanismos de desgaste que afectan a las válvulas de succión y descarga.
- Analizar las características, químicas y granulométricas del fluido bombeado que influyen en el desgaste abrasivo de las válvulas.
- Diseñar un filtro dúplex considerando criterios hidráulicos, estructurales y normativos aplicables al sistema de bombeo GEHO.
- Simular el comportamiento hidráulico del filtro dúplex mediante dinámica de

fluidos computacional (CFD), evaluando la pérdida de carga, la distribución de presión y el caudal operativo.

- Simular el comportamiento estructural del filtro dúplex mediante análisis por elementos finitos (FEA), verificando los niveles de tensión, deformación y factores de seguridad.
- Determinar el impacto económico de la implementación del filtro dúplex en el OPEX de la operación, a partir de la reducción de los costos directos de mantenimiento, reposición de repuestos y pérdidas operativas asociadas al desgaste de las válvulas de succión y descarga de las bombas GEHO.

1.4. Alcances y Limitación del Estudio

1.4.1. Alcances

El estudio abarca el diseño y la simulación computacional de un sistema de filtrado dúplex orientado a optimizar el desempeño de las bombas GEHO en la Unidad Minera Morococha, específicamente en lo relacionado con la prolongación de la vida útil de las válvulas de succión y descarga. El alcance de la investigación comprende el diagnóstico técnico del estado actual de dichos componentes, el análisis de las características físicas, químicas y granulométricas del fluido bombeado, así como el desarrollo del diseño conceptual y constructivo del filtro dúplex bajo criterios hidráulicos, estructurales y normativos.

Asimismo, el estudio incluye la validación del desempeño del filtro dúplex mediante simulaciones hidráulicas y estructurales, empleando herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y análisis por elementos finitos (FEA). Estas simulaciones permiten evaluar parámetros clave como la pérdida de carga, la distribución de presión, el comportamiento del flujo y los niveles de tensión estructural, bajo condiciones de operación representativas del sistema de bombeo GEHO.

Los resultados obtenidos se enfocan en demostrar, a nivel numérico y predictivo, la efectividad del filtro dúplex para reducir el impacto del desgaste abrasivo sobre las válvulas, así como su contribución potencial a la disminución de los costos asociados al mantenimiento correctivo. Si bien la investigación no contempla la implementación física ni la realización de pruebas en campo, los resultados constituyen una base técnica sólida para una futura aplicación industrial, y aportan información relevante que puede ser utilizada como referencia en otras operaciones mineras que enfrentan condiciones de bombeo similares.

Es importante precisar que el presente estudio se limita al diseño ingenieril y a la validación mediante simulaciones computacionales, sin incluir la fabricación, instalación ni pruebas experimentales en campo del filtro dúplex. En consecuencia, los resultados obtenidos corresponden a un análisis predictivo, orientado a demostrar la factibilidad técnica y el impacto esperado del sistema propuesto sobre la vida útil de las válvulas de succión y descarga.

1.4.2. Limitaciones

Entre las limitaciones del estudio se encuentra el hecho de que la investigación se desarrolla únicamente en el contexto de la Unidad Minera Morococha, por lo que los resultados obtenidos a partir del diseño y la simulación del filtro dúplex se encuentran condicionados a sus características operativas específicas. Asimismo, el análisis del desgaste de las válvulas de succión y descarga se centra en los efectos asociados al filtrado de partículas sólidas, sin considerar otros factores que también podrían influir en la vida útil de los componentes, tales como variaciones extremas de presión, fallas en el sellado, fenómenos de cavitación u otros problemas mecánicos no directamente relacionados con el proceso de filtración. Esta delimitación responde a la necesidad de enfocar el estudio en el impacto directo del sistema de filtración propuesto sobre la vida útil de los componentes críticos del sistema de bombeo.

Otra limitación relevante del estudio es que este se restringe al diseño y validación mediante simulación computacional, por lo que no se contempla la implementación física del filtro dúplex ni la realización de pruebas en campo. En este sentido, los resultados obtenidos corresponden a un análisis de carácter predictivo, basado en modelos numéricos y condiciones de operación representativas, las cuales pueden variar en función del tiempo y de los cambios en las propiedades del fluido bombeado. Finalmente, el estudio no incluye un análisis exhaustivo de los impactos ambientales a largo plazo, aunque reconoce la importancia de reducir la frecuencia de mantenimiento y la generación de residuos asociados a la operación de los sistemas de bombeo.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

El diseño y la simulación de un filtro dúplex en las bombas GEHO de la Unidad Minera Morococha permitirá optimizar la vida útil de las válvulas de succión y descarga, al reducir la presencia de partículas sólidas en el fluido bombeado.

1.5.2. Hipótesis Específicas

- Si se diagnostica el estado actual del sistema de bombeo GEHO, entonces será posible identificar los principales mecanismos de desgaste que afectan a las válvulas de succión y descarga.
- Si se analizan las características físicas, químicas y granulométricas del fluido bombeado, entonces se podrán determinar los factores que influyen de manera significativa en el desgaste abrasivo de las válvulas.
- Si se diseña un filtro dúplex considerando criterios hidráulicos, estructurales y normativos, entonces se podrá proponer un sistema de filtración técnicamente compatible con las condiciones de operación de las bombas GEHO.

- Si se simula el comportamiento hidráulico del filtro dúplex mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), entonces se evidenciará que la pérdida de carga, la distribución de presión y el caudal operativo se mantienen dentro de límites admisibles para el sistema de bombeo.
- Si se simula el comportamiento estructural del filtro dúplex mediante análisis por elementos finitos (FEA), entonces se verificará que los niveles de tensión, deformación y factores de seguridad cumplen con los criterios establecidos por la normativa aplicable.
- Si se evalúan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones hidráulicas y estructurales, entonces se demostrará, de manera predictiva, la optimización de la vida útil de las válvulas de succión y descarga mediante la reducción del desgaste abrasivo.

CAPÍTULO II

2. MARCO REFERENCIAL Y TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes Nacionales

Pino (2023) dirigió su objetivo general a optimizar el sistema de bombeo responsable de evacuación de relaves, incorporando consideraciones de diseño de tuberías, selección de bombas y medidas de control de sólidos; la metodología incluyó cálculo hidráulico, revisión normativa (ASME B31 y otros), simulaciones de caudal y presión, y propuesta de detalles constructivos como puntos de muestreo y filtros en aspiración. Los resultados técnicos incluyeron recomendaciones dimensionales para líneas y la inclusión de dispositivos de retención de sólidos y filtros en puntos claves del sistema, con estimaciones de mejora en eficiencia y reducción de erosión en válvulas y tramos de tubería. En conclusión, el autor plantea que una intervención integral diseño hidráulico correcto, especificación de medios de filtrado y prácticas operativas puede disminuir el desgaste de válvulas y prolongar su vida útil en sistemas de transporte de pulpas y relaves.

Gómez (2021) fijó como objetivo general proponer mejoras técnicas y de gestión que incrementen la disponibilidad de equipos de bombeo GEHO y sistemas asociados en una operación minera peruana; su metodología combinó análisis documental, levantamiento de indicadores de mantenimiento (MTBF, MTTR), inspecciones técnicas y la elaboración de un diseño de intervención que incluyó la instalación de protecciones en la línea de aspiración y la implementación de procedimientos de inspección periódica. Los resultados mostraron que, tras la propuesta, se esperaban reducciones en la frecuencia de reemplazo de accesorios (incluidas válvulas de succión/descarga) y una mejora en la planificación de repuestos críticos, además de una propuesta técnica concreta para retener partículas antes de la bomba. La conclusión principal fue que acciones relativamente simples mejor filtrado de alimentación, control de

abrasividad y una adecuada gestión de repuestos pueden traducirse en aumentos relevantes de la vida útil de elementos críticos y en una reducción apreciable de costos operativos.

Gamarra (2021) tuvo como objetivo general optimizar la gestión de mantenimiento de bombas tipo pistón-diafragma en una empresa minera mediante la identificación de las causas de fallas y la definición de protocolos de mantenimiento; la metodología siguió un enfoque aplicado: diagnóstico por inspección, encuestas a personal operativo, análisis estadístico de órdenes de trabajo y diseño de un plan de intervenciones preventivas y correctivas. Los hallazgos indicaron que muchos fallos atribuibles a desgaste prematuro de piezas (valvulería, diafragmas y sellos) estaban relacionados con la presencia de partículas sólidas y prácticas de operación que no contemplaban filtración previa. Como resultado, la propuesta incluyó medidas de pre-filtrado, ajustes en procedimientos de cambio de diafragma y un calendario de mantenimiento predictivo, lo que la autora concluyó reducirá interrupciones y extenderá la vida útil de las partes críticas si se implementa de forma sostenida.

Huamani et al. (2021) se propusieron mejorar la disponibilidad de una bomba de lodos con historial de fallas frecuentes; emplearon el método SREDIM (Selección, Registro, Examen, Desarrollo, Implantación y Mantenimiento) como marco metodológico, realizando entrevistas, mediciones de disponibilidad antes y después, diseño e implementación de una barcaza para elevar y proteger la bomba, y pruebas estadísticas (Wilcoxon) para validar la mejora. Los resultados mostraron un incremento de la disponibilidad de la bomba desde 84.43% hasta 95.75% tras implementar la solución, además de una reducción de costos asociados a reparaciones repetitivas. La conclusión fue que medidas de ingeniería relativamente sencillas (soporte/barcaza, controles de posición, y revisión de condiciones de inmersión) combinadas con prácticas de mantenimiento estructuradas resultan en mejoras operativas tangibles; el estudio refuerza la idea de que la protección física y operativa de equipos expuestos a medios abrasivos es tan importante como la filtración previa.

Rivero (2020) plantea como objetivo general mejorar la confiabilidad y reducir las paradas no programadas de bombas sometidas a fluidos con sólidos en suspensión; para ello empleó un enfoque aplicado de ingeniería de mantenimiento que combinó diagnóstico in situ, revisión documental del historial de fallas y la propuesta e implementación de un plan de mantenimiento preventivo y correctivo estructurado. La metodología incluyó levantamiento de datos operativos, análisis de causas raíz mediante herramientas como diagrama de Ishikawa y registros de órdenes de trabajo, así como la implementación de acciones correctivas en elementos críticos (sellos, impulsores y válvulas de admisión). Entre los resultados se reportó una reducción significativa de paradas por fallas relacionadas con obstrucciones y desgaste, y una mejora en la disponibilidad operativa al aplicar tareas de mantenimiento planificado y filtros/strainers en puntos críticos del sistema. En conclusión, el autor señala que la incorporación de un plan estructurado de mantenimiento combinado con elementos de filtrado en líneas de bombeo reduce la frecuencia de fallas y alarga la vida útil de componentes expuestos a partículas en suspensión, recomendando el diseño de medidas de retención de sólidos en la etapa previa a la bomba para proteger válvulas y sellos.

2.1.2. Antecedentes Internacionales

En la operación minera Pueblo Viejo, ubicada en República Dominicana, se ha documentado públicamente el uso de sistemas GEHO dentro del circuito de pressure oxidation (POX), específicamente en el área de autoclaves. En una presentación técnica de Barrick sobre la operación se menciona de manera expresa la incorporación de “in-line Geho strainers” y “dual feed Geho systems” en dicha etapa del proceso, lo que evidencia la aplicación de equipos GEHO en servicios críticos de alimentación de pulpa bajo condiciones metalúrgicas exigentes.

Asimismo, los reportes técnicos de Pueblo Viejo identifican equipos GEHO en al menos dos servicios específicos del circuito POX: Fresh Feed GEHO AC Feed Pumps, con capacidad de 246 m³/h, y Flash Recycle GEHO AC Feed Pumps, con capacidad de 450 m³/h. Esta

información aparece tanto en el reporte técnico de 2023 como en el de febrero de 2026, lo que confirma la continuidad del uso de bombas GEHO en la operación. Además, Barrick reportó durante 2023 que las bombas GEHO asociadas al proyecto de expansión quedaron completamente comisionadas durante la puesta en marcha de la ampliación de planta.

Desde el punto de vista técnico, la documentación pública revisada no precisa el modelo exacto de bomba GEHO instalado en Pueblo Viejo. Sin embargo, el servicio descrito corresponde a aplicaciones típicas de alimentación a autoclaves, ámbito en el cual Weir posiciona su línea GEHO Heat Barrier piston diaphragm pumps, desarrollada para el manejo de pulpas abrasivas y de alta temperatura en la industria de procesos. En ese sentido, aunque no puede afirmarse con certeza documental el modelo específico, sí puede sostenerse que la operación de Pueblo Viejo constituye un antecedente internacional relevante del uso de tecnología GEHO en circuitos de autoclave de alta exigencia.

En consecuencia, el caso de Pueblo Viejo resulta pertinente como antecedente para investigaciones relacionadas con bombas GEHO en minería, ya que demuestra la aplicación de esta tecnología en condiciones operativas severas y, adicionalmente, muestra la integración de strainers en línea como parte del acondicionamiento del flujo previo al ingreso del sistema. Este aspecto aporta sustento técnico a propuestas orientadas a incorporar filtración previa en sistemas GEHO, con el propósito de mejorar la confiabilidad operativa y reducir la exposición de componentes internos al desgaste por partículas sólidas.

Otro antecedente más útil que encontré es el de Yara Siilinjärvi, Finlandia. En ese proyecto se implementó una estación de bombeo para relaves espesados con tres bombas GEHO TPZM 2000, y el paper técnico indica que el sistema incluye filtro de succión para impedir que partículas sobredimensionadas y cuerpos extraños ingresen a las bombas principales. Además, esos strainers llevan transmisor de presión para medir la presión diferencial y detectar bloqueo del strainer.

Lo valioso del caso Yara es que sí aporta tres cosas muy fuertes para tu sustento. Primero, confirma el uso real de filtración en succión antes de bombas GEHO en una operación minera industrial. Segundo, muestra que esa filtración está integrada al control del sistema mediante medición de ΔP para detectar obstrucción. Tercero, el desempeño reportado indica que la vida útil de las válvulas GEHO alcanzó más de 4,000 horas, lo que lo vuelve un antecedente bastante útil cuando tu argumento está centrado en proteger válvulas y reducir desgaste.

Un tercer antecedente aplicable es el proyecto de CBA Aluminio, São Paulo, Brasil. En la propuesta técnica de Weir para ese sistema de disposición de red mud se describe que dos bombas booster alimentan el lodo a través de un filtro de succión instalado, y el documento dice expresamente que ese strainer asegura que el material sobredimensionado no entre a la línea principal alimentación GEHO TPZM 2000. El mismo documento añade que, gracias al concepto de pistón-diafragma, solo las válvulas de la bomba principal quedan sujetas a abrasión, aparte de los internos de las booster pumps.

Tabla 1

Resumen antecedentes internacionales.

Autor / caso	Objetivo	Metodología	Hallazgo principal	Aporte a la tesis
Barrick – Pueblo Viejo	Documentar el uso de sistemas GEHO en circuito POX/autoclaves	Reportes técnicos y presentación de operación	Se identifican sistemas GEHO con strainers en línea y servicios de alimentación crítica de pulpa	Sustenta el uso industrial de tecnología GEHO con acondicionamiento previo del flujo
Yara Siilinjärvi, Finlandia	Transportar relaves espesados con bombas GEHO TZPM 2000	Implementación industrial con monitoreo de presión diferencial	Uso de filtros/strainers en succión para evitar ingreso de oversize y aumento de vida útil de válvulas	Antecedente directo de filtración en succión y protección de válvulas GEHO

Autor / caso	Objetivo	Metodología	Hallazgo principal	Aporte a la tesis
CBA Aluminio, Brasil	Proteger bomba GEHO TZPM 2000 en disposición de red mud	Propuesta técnica de Weir	Se instala filtro de succión para evitar el ingreso de material sobredimensionado; las válvulas siguen siendo las piezas más expuestas	Refuerza la necesidad de filtración previa como medida de protección
Kang et al. (2024)	Revisar mecanismos de erosión por partículas grandes	Revisión sistemática y análisis teórico	El tamaño de partícula, ángulo y velocidad controlan el tipo de daño	Justifica la necesidad de reducir partículas críticas antes del ingreso a válvulas
Hawash (2023)	Cuantificar el impacto de la erosión en bombas de lodos	Ensayos de laboratorio y análisis in situ	La prefiltración y el control de sólidos reducen desgaste y fallas	Relaciona filtración con menor costo y mayor vida útil
Li et al. (2023)	Analizar impacto y colisión de partículas en válvulas y bombas	Enfoque experimental + CFD-DEM	La reducción de partículas críticas disminuye energía de impacto y erosión localizada	Sustenta el filtro como barrera previa contra partículas dañinas
Wang et al. (2022)	Evaluar efecto del diámetro y concentración de partículas en desgaste	Ensayos controlados en bancada	La granulometría y concentración modifican el desgaste y la eficiencia hidráulica	Soporta el criterio de selección del medio filtrante
Su et al. (2020)	Comprender el bloqueo y desgaste por partículas gruesas	CFD + validación experimental	La filtración previa y el diseño hidráulico conjunto son complementarios	Relaciona el control granulométrico con la protección de válvulas

Nota. Elaboración propia.

La síntesis precedente evidencia que la literatura internacional converge en dos aspectos centrales: primero, que la presencia de partículas sólidas de tamaño crítico acelera el desgaste de válvulas y componentes internos en sistemas de bombeo; y segundo, que la incorporación de filtración previa en succión constituye una estrategia técnica válida para reducir erosión, mejorar la confiabilidad y prolongar la vida útil de equipos sometidos a servicio abrasivo. Estos

antecedentes respaldan directamente la propuesta de diseño del filtro dúplex para bombas GEHO en la Unidad Minera Morococha.

2.2. Marco Teórico

Tabla 2

Comparación de enfoques teóricos aplicables al desgaste y la filtración en sistemas de bombeo.

Modelo / enfoque	Variable principal	Aplicación	Ventaja	Limitación	Relación con la tesis
Ley de Archard	Carga, dureza, distancia de deslizamiento	Estimación de desgaste mecánico	Sencillo y ampliamente conocido	No representa bien impactos complejos	Útil como base conceptual del desgaste de válvulas
CFD-DEM	Trayectoria, velocidad y colisión de partículas	Predicción de erosión localizada	Permite identificar zonas críticas de impacto	Requiere alto costo computacional y datos de entrada detallados	Sustenta el análisis del efecto del flujo particulado sobre válvulas
Erosión por impacto de partículas	Tamaño, ángulo y velocidad de partícula	Bombas y válvulas en servicio con slurry	Explica el daño en asientos y obturadores	Puede simplificar la interacción fluido-partícula	Justifica la necesidad de reducir partículas sobredimensionadas
Modelos de pérdida de carga en filtros pre-bomba	Caudal, área filtrante, geometría del medio filtrante	Diseño hidráulico del filtro	Permiten balancear eficiencia y head loss	Usualmente se calibran en agua o condiciones ideales	Soporta el dimensionamiento del filtro dúplex
Modelos de eficiencia de filtración y masa retenida	Concentración de sólidos, área del filtro, abertura	Evaluación de desempeño del medio filtrante	Permiten prever retención y ensuciamiento	Requieren correlaciones específicas del fluido	Relaciona eficiencia de retención con protección de válvulas

Nota. Elaboración propia.

La comparación de modelos muestra que ningún enfoque, por sí solo, explica integralmente el fenómeno de desgaste en bombas GEHO sometidas a relaves abrasivos. Por ello, la presente tesis adopta una aproximación combinada: utiliza fundamentos de desgaste mecánico y erosión particulada para justificar la problemática, y recurre a criterios hidráulicos y estructurales para validar el diseño del filtro dúplex como solución de protección previa.

2.2.1. Fundamentos del desgaste abrasivo en medios solido-liquido

El desgaste abrasivo en sistemas de bombeo que transportan pulpas o relaves constituye uno de los principales mecanismos de deterioro de componentes internos como válvulas, asientos, sellos y superficies de conducción. Este fenómeno ocurre cuando partículas sólidas suspendidas en el fluido impactan, rozan o presionan repetidamente las superficies metálicas, removiendo material de forma progresiva hasta comprometer el sellado, la geometría funcional y la confiabilidad del equipo. En bombas tipo GEHO, este efecto adquiere especial importancia debido a que las válvulas de succión y descarga operan bajo condiciones de presión elevadas y están expuestas permanentemente a partículas abrasivas transportadas por el relave.

La literatura especializada señala que el nivel de desgaste depende principalmente del tamaño de partícula, su densidad, la concentración de sólidos y la velocidad relativa del flujo. Cuando estas variables aumentan, se incrementa también la energía de impacto y la probabilidad de erosión localizada. Estudios recientes muestran que partículas de mayor tamaño o mayor densidad producen zonas de daño más severas, mientras que concentraciones elevadas favorecen una remoción continua de material en áreas críticas. En consecuencia, el problema del desgaste no debe entenderse como un simple fenómeno superficial, sino como el resultado de la interacción entre el fluido, las partículas y la geometría interna del sistema hidráulico.

Desde el punto de vista teórico, la ley de Archard constituye una base clásica para interpretar el desgaste mecánico, al relacionar la pérdida de material con la carga aplicada, la

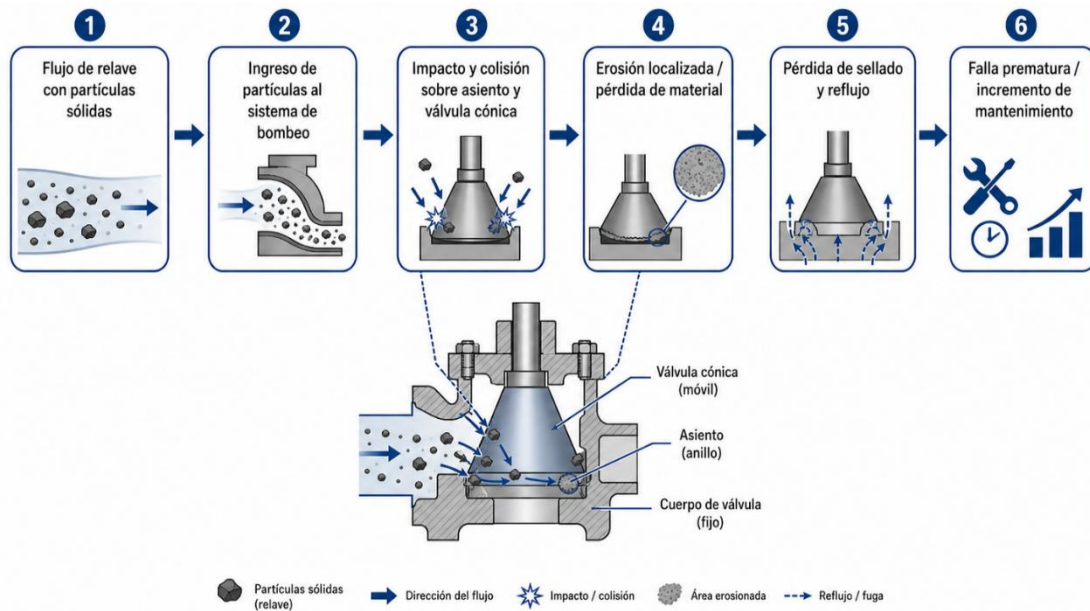
distancia recorrida y la dureza de la superficie. Sin embargo, en medios de slurry esta aproximación resulta insuficiente cuando existen impactos repetitivos, altas velocidades y trayectorias variables de partículas. Por ello, investigaciones más recientes han incorporado variantes del modelo clásico, donde el coeficiente de desgaste depende también de la energía de deformación, del ángulo de incidencia y del tipo de interacción partícula-superficie. Esta evolución teórica resulta relevante para el presente estudio, ya que permite comprender por qué las válvulas no solo se desgastan por contacto, sino también por colisión, microfractura y erosión acumulativa.

Otro aspecto importante es que el desgaste puede cambiar de mecanismo según la severidad de la operación. Bajo condiciones moderadas predomina la deformación plástica y la abrasión superficial; sin embargo, cuando aumentan la carga, la aspereza, la velocidad o la energía de impacto, la superficie puede pasar de un régimen de plastificación a uno de fractura frágil localizada. Esto explica por qué algunos componentes inicialmente muestran desgaste uniforme, pero luego desarrollan pérdida acelerada de material, picaduras o degradación del asiento. A ello se suma el efecto del calor friccional, que altera localmente las propiedades del material y acelera la pérdida de masa, especialmente en superficies sometidas a contacto continuo. En términos aplicados, este conjunto de mecanismos justifica la necesidad de disminuir la cantidad de partículas críticas que ingresan al sistema de bombeo.

En síntesis, el desgaste abrasivo en medios sólido-líquido es un fenómeno multifactorial en el que intervienen propiedades del fluido, propiedades de las partículas, condiciones de operación y características del material. Para la presente tesis, este bloque teórico demuestra que la vida útil de las válvulas GEHO depende directamente de la severidad del flujo particulado y que, por tanto, una solución basada en filtración previa tiene fundamento mecánico, hidráulico y tribológico.

Figura 1

Mecanismo conceptual de desgaste abrasivo en válvula de succión y descarga de bombas GEHO.



Nota. Elaboración propia.

2.2.2. Modelado numérico del desgaste y comportamiento partícula - fluido

La complejidad del desgaste en sistemas de bombeo con relaves ha impulsado el uso de herramientas numéricas capaces de describir, con mayor detalle, la interacción entre el flujo continuo y las partículas sólidas. En ese contexto, el acoplamiento entre Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y Método de Elementos Discretos (DEM) se ha convertido en una de las metodologías más útiles para predecir trayectorias de partículas, velocidades de impacto, zonas de turbulencia y superficies de mayor erosión. Este enfoque permite representar simultáneamente el comportamiento del fluido y la respuesta de las partículas en un entorno hidráulico complejo, lo que lo hace especialmente pertinente para aplicaciones con slurry.

El uso de modelos CFD-DEM ha demostrado que la erosión no se distribuye de forma homogénea, sino que tiende a concentrarse en puntos donde la geometría induce recirculaciones, cambios bruscos de dirección o aceleraciones locales del flujo. En bombas y

válvulas, estas zonas coinciden frecuentemente con asientos, obturadores, bordes de paso y superficies de presión. Por ello, el valor principal del modelado numérico no radica únicamente en describir el flujo, sino en anticipar en qué regiones del sistema es más probable que ocurra el desgaste crítico. De esta manera, el análisis numérico se convierte en una herramienta de diseño predictivo y no solo en un instrumento de validación posterior.

En el marco de esta investigación, el modelado numérico resulta particularmente útil porque permite justificar que la reducción de partículas sólidas antes del ingreso a la bomba modifica los patrones de flujo y disminuye la severidad del impacto sobre las válvulas. Aunque la tesis no implementa un modelo DEM completo de erosión sobre cada partícula, sí adopta el fundamento de que la distribución del flujo y la caída de presión pueden analizarse mediante simulación para verificar que el filtro dúplex no compromete la operación hidráulica del sistema. En ese sentido, el enfoque CFD sirve como soporte para entender el comportamiento del fluido, mientras que la lógica DEM sustenta teóricamente la relación entre carga particulada y desgaste.

En conclusión, el modelado numérico del comportamiento partícula-fluido proporciona una base metodológica sólida para estudiar el desgaste en sistemas de bombeo abrasivo. Su principal aporte a la tesis consiste en demostrar que el diseño del filtro dúplex puede analizarse desde una perspectiva predictiva, no solo como un elemento de retención de sólidos, sino como un componente que modifica favorablemente la interacción entre el fluido y los componentes críticos de la bomba.

2.2.3. Filtración previa en succión y protección de componentes críticos

La filtración previa en la línea de succión constituye una estrategia de protección orientada a reducir la cantidad y el tamaño de partículas sólidas que ingresan al sistema de bombeo. Desde el punto de vista hidráulico, cualquier elemento filtrante introduce una pérdida

de carga; sin embargo, si su diseño es adecuado, esta caída de presión puede mantenerse dentro de límites admisibles sin afectar significativamente el caudal ni el rendimiento del equipo. Por ello, el diseño de filtros pre-bomba no consiste solo en “retener partículas”, sino en equilibrar tres variables fundamentales: capacidad de paso, eficiencia de retención y pérdida de carga aceptable.

Los estudios de head loss en filtros pre-bomba muestran que el área del medio filtrante, la geometría interna, el caudal y la concentración de sólidos son variables determinantes en el comportamiento hidráulico del sistema. A mayor área efectiva de filtración, menor velocidad local a través del medio filtrante y, por consiguiente, menor caída de presión inicial. Del mismo modo, una configuración bien distribuida evita zonas de obstrucción prematura y favorece un flujo más uniforme. Este principio es particularmente importante para la presente tesis, porque el filtro dúplex debe proteger las válvulas GEHO sin generar una restricción que perjudique la bomba.

Además de la pérdida de carga, la literatura considera dos indicadores clave del desempeño de un filtro: la eficiencia de retención y la masa de sedimentos atrapados. La eficiencia expresa qué porcentaje de partículas dañinas logra ser retenido por el medio filtrante, mientras que la masa atrapada permite estimar la frecuencia esperada de ensuciamiento y mantenimiento. Ambos aspectos están estrechamente vinculados: un filtro que retiene más partículas protege mejor a la bomba, pero también se obstruye con mayor rapidez si no se dimensiona correctamente. Por esa razón, en aplicaciones industriales con continuidad operativa se privilegian configuraciones que permitan alternancia de servicio y limpieza sin detener el sistema, como ocurre con los filtros dúplex.

El análisis dimensional aplicado a filtros pre-bomba ha reforzado esta lógica, demostrando que la pérdida de carga y la eficiencia pueden modelarse a partir de relaciones

funcionales entre caudal, concentración de sólidos, tamaño de abertura y geometría del medio. En términos de diseño, esto significa que no existe un tamaño de abertura universalmente óptimo: la selección debe responder al tipo de fluido, a la distribución granulométrica y al objetivo de protección del equipo. En el caso de la presente tesis, este marco teórico sustenta que el filtro dúplex debe ser concebido como una barrera selectiva, capaz de reducir el paso de partículas críticas sin comprometer la operación hidráulica del sistema.

En suma, la filtración previa en succión constituye una medida de protección técnicamente justificada para válvulas y componentes expuestos a pulpas abrasivas. Su valor no radica solo en interceptar sólidos, sino en disminuir la carga abrasiva que ingresa a la bomba, reduciendo así la probabilidad de erosión, reflujo, pérdida de sellado y fallas prematuras.

2.2.4. Influencia de la geometría hidráulica y condiciones del flujo

La geometría interna del sistema de bombeo influye directamente en la forma en que las partículas sólidas se desplazan, impactan y se acumulan dentro del equipo. Cambios en sección, radios de curvatura, ángulos de entrada y salida, zonas de estrechamiento y superficies de transición pueden generar recirculaciones, turbulencias locales y aumentos de velocidad que favorecen tanto la erosión como el bloqueo por partículas gruesas. Por ello, el estudio del desgaste no puede limitarse a las propiedades del fluido; también debe considerar cómo la configuración hidráulica del sistema condiciona la trayectoria de las partículas.

En bombas con geometría adaptable o con trayectorias internas complejas, ciertas configuraciones inducen zonas de baja presión y remolinos que desestabilizan el flujo y elevan la carga mecánica sobre componentes sensibles. Del mismo modo, los componentes estáticos, como la carcasa, las placas divisorias y las superficies de cambio de dirección, pueden sufrir erosión significativa cuando el flujo particulado se concentra en regiones específicas. Estos hallazgos son relevantes para la tesis porque muestran que la protección de válvulas no depende

únicamente del material de fabricación, sino también de que el flujo llegue en condiciones más estables y con menor contenido de partículas críticas.

Los estudios sobre bombas de lodos de varias etapas también han demostrado que el tamaño de partícula y la velocidad de entrada pueden originar puntos de acumulación y trayectorias que favorecen la atrición, el impacto repetitivo y el bloqueo. Para mitigarlo, la literatura propone modificaciones geométricas y control del espectro granulométrico como estrategias complementarias. Este razonamiento es coherente con la lógica del filtro dúplex: antes de modificar toda la arquitectura de la bomba, resulta más eficiente intervenir sobre la calidad del flujo de entrada, reduciendo la carga sólida que alcanza las zonas más vulnerables.

Por tanto, la geometría hidráulica y las condiciones del flujo actúan como amplificadores o atenuadores del desgaste. En esta investigación, dicho principio refuerza la idea de que el filtro dúplex no solo cumple una función de retención, sino que contribuye indirectamente a estabilizar el comportamiento del flujo al disminuir el arrastre de partículas agresivas hacia las regiones internas del sistema GEHO.

2.2.5. Síntesis conceptual aplicada al diseño del filtro dúplex

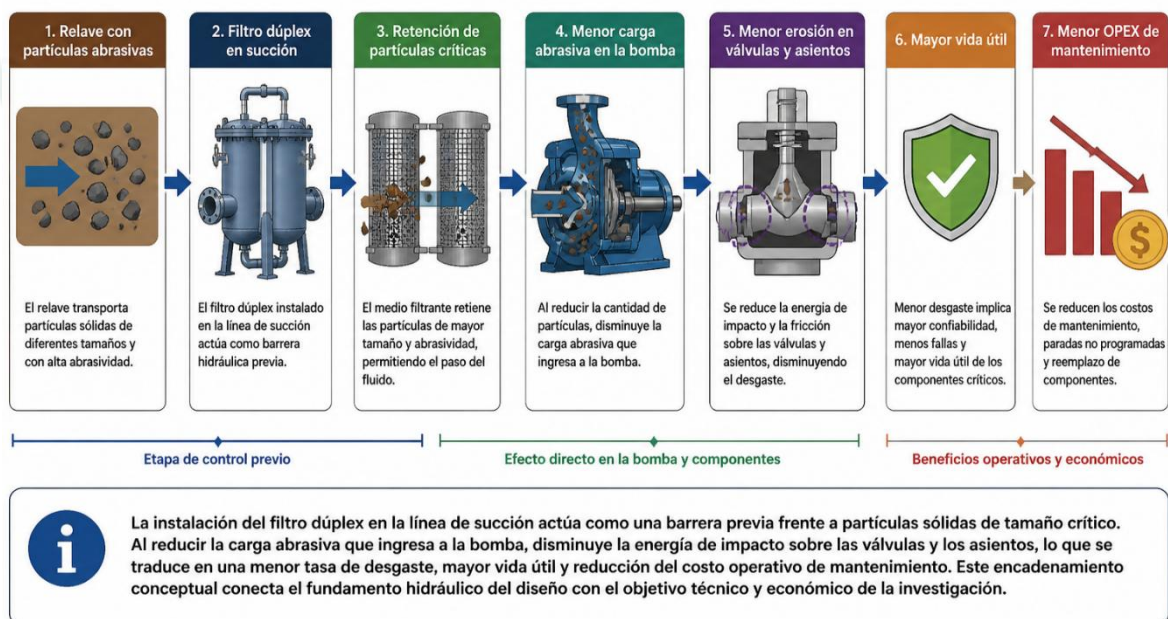
A partir de los fundamentos desarrollados, puede establecerse una relación clara entre el problema de desgaste identificado en las válvulas GEHO y la solución planteada en esta tesis. El desgaste abrasivo depende de la carga sólida transportada, de la energía con que las partículas impactan las superficies y de la configuración hidráulica que favorece o concentra dichos impactos. A su vez, el modelado numérico permite comprender cómo se distribuyen esas interacciones dentro del sistema, mientras que los modelos de filtración previa demuestran que es posible reducir la severidad del problema mediante una barrera hidráulica bien dimensionada.

En consecuencia, el filtro dúplex propuesto en la presente investigación se sustenta en una lógica de protección previa: interceptar partículas de tamaño y carga abrasiva crítica antes de que ingresen a la bomba, disminuyendo así la erosión sobre válvulas y asientos. Esta reducción de la carga particulada debe reflejarse en una menor frecuencia de falla, una mayor vida útil de los componentes y una mejora en la confiabilidad operativa del sistema. El diseño dúplex, además, introduce una ventaja funcional adicional, ya que permite continuidad de operación durante tareas de limpieza o conmutación del elemento filtrante.

De este modo, el marco teórico no solo describe antecedentes y conceptos aislados, sino que construye una secuencia lógica que conecta el fenómeno físico del desgaste, la simulación del comportamiento hidráulico y la propuesta de diseño del filtro. Así, la tesis queda sustentada en una base teórica integrada, orientada directamente al problema de investigación y al objetivo de optimizar la vida útil de las válvulas de succión y descarga de las bombas GEHO.

Figura 2

Relación conceptual entre filtración previa en succión y reducción del desgaste de válvulas.



Nota. Elaboración propia.

2.3. Marco Conceptual

Diseño de filtro dúplex: El diseño e implementación del filtro dúplex comprende el proceso ingenieril que permite seleccionar, dimensionar, fabricar e instalar un sistema de filtración doble (operación alternada) en una línea de bombeo. Este dispositivo tiene como propósito separar las partículas sólidas suspendidas en el fluido, evitando que ingresen a la bomba y causen abrasión en sus componentes internos. Involucra tanto criterios de diseño hidráulico (caudal, presión, pérdida de carga, eficiencia de filtrado) como consideraciones de mantenimiento y confiabilidad operativa.

Pérdida de carga admisible (mca): Representa la diferencia de presión entre la entrada y salida del filtro cuando el fluido lo atraviesa. Es un parámetro clave en el diseño hidráulico, ya que un filtro eficiente debe mantener baja pérdida de carga para no afectar el rendimiento de la bomba.

Grado de micraje (μm): Es el tamaño de los poros del medio filtrante que determina qué tan finas son las partículas que puede retener. Un micraje menor significa una filtración más precisa, pero también una mayor resistencia al paso del fluido.

Tipo de carcasa y válvulas de conmutación: Hace referencia a la estructura del filtro y al sistema de válvulas que permite alternar el flujo entre los dos compartimientos (A y B) del filtro dúplex sin detener la operación. Afecta la facilidad de mantenimiento y la continuidad del proceso.

Porcentaje de partículas retenidas (%): Es la proporción de partículas sólidas que quedan atrapadas por el filtro respecto al total de partículas presentes en el fluido de entrada. Indica directamente la eficiencia de filtrado.

Tiempo de cambio y mantenimiento del cartucho (min): Es el tiempo requerido para sustituir o limpiar el elemento filtrante sin detener la línea de bombeo. Un tiempo menor refleja un diseño más práctico y eficiente para la operación minera.

Vida útil de las válvulas: La vida útil de las válvulas de succión y descarga se define como el periodo de tiempo o número de ciclos operativos en el que estos componentes mantienen un funcionamiento óptimo sin presentar desgaste severo ni fallas. En las bombas GEHO, dichas válvulas están expuestas a fluidos con alta carga de sólidos, lo que genera erosión, cavitación y pérdida de estanqueidad. Su duración está directamente relacionada con la calidad del fluido, las condiciones de presión y la eficiencia del sistema de filtración previo.

Pérdida de masa o espesor (mm o g): Es la reducción física del material de las válvulas debido a la erosión o abrasión provocada por el contacto con partículas sólidas. Este indicador se determina mediante inspección dimensional o pesaje antes y después del uso.

Horas promedio de operación entre fallas (MTBF): El “Mean Time Between Failures” representa el tiempo medio de funcionamiento continuo que transcurre entre una falla y la siguiente. Es un indicador de confiabilidad que permite evaluar si la vida útil aumenta con el uso del filtro dúplex.

Número de intervenciones por trimestre: Mide la frecuencia de mantenimientos correctivos o preventivos que se realizan a las válvulas en un periodo determinado. Una disminución en este valor implica mayor durabilidad y estabilidad operacional.

Grado de erosión visual (leve, moderada, severa): Es una apreciación cualitativa del daño superficial en las válvulas, determinada mediante inspección visual o análisis microscópico. Permite clasificar el estado del componente tras la operación prolongada.

Gasto promedio por reposición de válvulas (S/.): Representa el costo total derivado de reemplazos, reparaciones o mantenimientos de válvulas en un periodo anual. Este indicador tiene implicancia económica directa y permite medir el impacto financiero del filtro dúplex.

2.4. Bases Legales y Normas

El presente se rige por un conjunto de normas técnicas nacionales e internacionales que garantizan la seguridad estructural, la calidad de los materiales, la eficiencia hidráulica y la confiabilidad operativa del filtro dúplex instalado en el sistema de bombeo GEHO de la Unidad Minera Morococha.

La correcta selección de normas es fundamental para asegurar que el diseño cumpla con los estándares exigidos por la industria minera y por la ingeniería mecánica moderna.

A continuación, se detallan las normas específicas seleccionadas según la naturaleza del proyecto y su relación con las fases de diseño, fabricación, prueba, control y mantenimiento del sistema.

2.4.1. Normas ASME aplicadas al diseño mecánico y de presión

Las normas ASME (American Society of Mechanical Engineers) proporcionan las bases para el diseño estructural y la seguridad de equipos que operan bajo presión como se muestra en la tabla 3. En este proyecto, el filtro dúplex se somete a presiones de operación significativas, por lo que el cumplimiento de estas normas garantiza integridad mecánica y seguridad industrial.

Tabla 3*Norma ASME*

Norma ASME	Descripción	Aplicación en el proyecto
ASME BPVC Sección VIII – Pressure Vessels	Establece los criterios de diseño, materiales y pruebas de presión en recipientes cerrados.	Aplicada al diseño y cálculo de la carcasa del filtro dúplex, asegurando resistencia a la presión interna del fluido.
ASME B31.3 – Process Piping	Regula el diseño y prueba de sistemas de tuberías en procesos industriales.	Aplica a la conexión hidráulica entre el filtro dúplex, las válvulas GEHO y las líneas de succión y descarga.
ASME B16.5 – Pipe Flanges and Fittings	Define las dimensiones y tolerancias de bridas.	Garantiza compatibilidad entre el filtro, válvulas y accesorios del sistema.
ASME Y14.5 – Geometric Dimensioning and Tolerancing	Establece el sistema de acotado geométrico y tolerancias.	Utilizada en los planos técnicos del diseño del filtro.

Nota. Elaboración propia.

Estas normas permiten asegurar que el filtro dúplex sea estructuralmente seguro, hermético y compatible con el sistema de bombeo existente, reduciendo riesgos de falla por fatiga o presión.

2.4.2. Normas ASTM aplicadas a materiales y resistencia al desgaste

Las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) se utilizan para verificar la calidad, resistencia y durabilidad de los materiales metálicos que conforman el sistema filtrante, en especial la carcasa, los elementos filtrantes y las válvulas como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4*Norma ASTM*

Norma ASTM	Descripción	Aplicación en el proyecto
ASTM A240/A240M	Especifica aceros inoxidables para equipos a presión.	Selección del acero inoxidable para el cuerpo del filtro dúplex, garantizando resistencia a la corrosión.
ASTM G65	Ensayo de resistencia a la abrasión con arena seca.	Evaluación de la resistencia al desgaste de las válvulas y componentes internos.
ASTM E290	Ensayo de flexión para medir ductilidad.	Verifica la ductilidad de los materiales frente a esfuerzos de montaje y presión.

Nota. Elaboración propia.

La aplicación de estas normas ASTM garantiza que el filtro dúplex esté construido con materiales resistentes a la abrasión y corrosión, prolongando su vida útil frente al contacto con partículas minerales.

2.4.3. Normas ISO para gestión de calidad y desempeño hidráulico

Las normas ISO (International Organization for Standardization) establecen procedimientos de control de calidad, gestión ambiental y evaluación técnica de filtros hidráulicos validados en la tabla 5.

Tabla 5*Norma ISO*

Norma ISO	Descripción	Aplicación en el proyecto
ISO 9001:2015	Sistema de gestión de calidad.	Asegura que el diseño y la fabricación del filtro cumplan con procesos controlados y trazables.
ISO 16889:2016	Método multipaso para evaluar el rendimiento de filtros hidráulicos.	Evalúa la eficiencia de retención de partículas del filtro dúplex mediante pruebas estandarizadas.
ISO 14001:2015	Sistema de gestión ambiental.	Promueve la reducción de residuos y la correcta disposición de cartuchos usados.

Nota. Elaboración propia.

El uso de normas ISO respalda que el proceso de diseño y control de calidad del sistema filtrante sea documentado, auditable y sostenible, asegurando la validez técnica del proyecto.

2.4.4. Normas API aplicables a equipos de bombeo y válvulas

Las normas API (American Petroleum Institute) son ampliamente adoptadas en minería e hidro transporte, debido a las condiciones de presión y caudal semejantes a las de la industria petrolera como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6

Norma API

Norma API	Descripción	Aplicación en el proyecto
API 610	Bombas centrífugas para la industria del petróleo y gas.	Referencia técnica para evaluar la operación y durabilidad de las bombas GEHO.
API 682	Sistemas de sellado de ejes en bombas.	Aplica al mantenimiento de sellos mecánicos y válvulas de descarga.

Nota. Elaboración propia.

El uso de normas API asegura que la operación del sistema de bombeo con el filtro dúplex cumpla con los estándares internacionales de seguridad, confiabilidad y desempeño hidráulico.

2.4.5. Normas IEEE aplicadas al control e instrumentación

Aunque el proyecto es principalmente mecánico, la integración de sensores y monitoreo requiere lineamientos eléctricos y de control.

Tabla 7*Norma IEEE*

Norma IEEE	Descripción	Aplicación en el proyecto
IEEE 315	Símbolos gráficos eléctricos.	Para diagramas de control y automatización del filtro dúplex.
IEEE 101	Selección de sensores y adquisición de datos.	Para la instrumentación de sensores de presión y caudal en el sistema filtrante.

Nota. Elaboración propia.

Estas normas garantizan que el sistema de monitoreo y control cumpla con criterios de precisión, seguridad eléctrica y trazabilidad de datos.

2.4.6. Normas y leyes nacionales

A nivel nacional, el proyecto se enmarca en el cumplimiento de las leyes y reglamentos peruanos relacionados con la seguridad industrial y ambiental en operaciones mineras las que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8*Normas y leyes*

Norma / Ley	Descripción	Aplicación en el proyecto
D.S. N.º 024-2016-EM – Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería	Establece las condiciones de seguridad en las actividades mineras.	Aplica al montaje, prueba e instalación del filtro dúplex.
Ley N.º 29783 – Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo	Protege la seguridad de los trabajadores.	Cumplimiento obligatorio durante el proceso de implementación y mantenimiento del sistema.
NTP ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 – INACAL	Normas técnicas peruanas de calidad y gestión ambiental.	Aseguran que los procesos industriales se realicen bajo estándares nacionales homologados.

Nota. Elaboración propia.

Estas normas y leyes nacionales garantizan que el proyecto no solo cumpla estándares técnicos, sino también legales, ambientales y de seguridad ocupacional, en concordancia con la normativa minera peruana vigente.



CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y Nivel de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que está orientada a proponer una solución técnica al problema del desgaste prematuro de las válvulas de succión y descarga en las bombas GEHO de la Unidad Minera Morococha, mediante el diseño y la simulación computacional de un sistema de filtrado dúplex. La investigación aplicada se caracteriza por emplear conocimientos científicos y tecnológicos para resolver problemas reales del ámbito industrial, aportando mejoras técnicas a partir del análisis y la modelación del sistema estudiado.

El nivel de investigación es explicativo, debido a que busca establecer cómo y por qué el diseño del sistema de filtrado dúplex influye en la optimización de la vida útil de los componentes críticos del sistema de bombeo. Para ello, se analizan las condiciones actuales de operación, las características del fluido bombeado y el comportamiento del sistema propuesto, validando los resultados mediante simulaciones hidráulicas y estructurales, sin considerar la implementación física ni la realización de pruebas en campo.

En este contexto, el estudio adopta un enfoque cuantitativo, basado en la evaluación de parámetros técnicos como caudal, presión, pérdida de carga, tensiones y factores de seguridad, obtenidos a partir de modelos numéricos. Asimismo, se emplea un enfoque ingenieril de simulación, que permite analizar el desempeño del diseño propuesto bajo condiciones de operación representativas, garantizando la coherencia metodológica con el título y los objetivos de la investigación.

3.2. Procedimiento Metodológico

El desarrollo metodológico del estudio se estructura en seis etapas secuenciales e interrelacionadas que aseguran la coherencia entre los objetivos, la hipótesis y los resultados esperados:

Etapla 1: Diagnóstico del sistema actual de bombeo GEHO

En esta fase se recopila información técnica de las bombas instaladas, historial de fallas, tiempos de parada y registros de mantenimiento. Se realizan inspecciones in situ, entrevistas con el personal de mantenimiento y análisis de las válvulas de succión y descarga, con el fin de identificar las causas principales del desgaste prematuro.

Etapla 2: Análisis físico-químico del fluido bombeado

Se toman muestras del fluido de relave transportado por las bombas y se analizan en laboratorio parámetros como densidad, viscosidad, granulometría y concentración de sólidos. Estos datos permiten determinar el nivel de abrasividad y la carga de partículas sólidas que afectan la integridad de las válvulas.

Etapla 3: Diseño conceptual y técnico del filtro dúplex

Con base en los resultados anteriores, se realiza el dimensionamiento hidráulico y estructural del filtro dúplex, seleccionando materiales, diámetros, elementos filtrantes y configuraciones que garanticen una operación continua y eficiente. Se emplean normas técnicas de referencia (ASME, ASTM e ISO) para asegurar la confiabilidad del diseño.

Etapla 4: Simulación hidráulica y validación del diseño

Mediante software de simulación (por ejemplo, ANSYS Fluent o SolidWorks Flow Simulation) se modela el comportamiento del flujo con y sin filtrado, analizando la pérdida de carga, la eficiencia de retención de partículas y la distribución de presión. Esta etapa permite validar el diseño del filtro antes de su fabricación.

Etapla 5: Simulación estructural del filtro dúplex

Se realiza la simulación estructural del filtro dúplex mediante análisis por elementos finitos (FEA), con el objetivo de evaluar los niveles de tensión, deformación y factores de seguridad bajo las condiciones de presión de operación. Esta etapa permite verificar la integridad estructural del diseño y su cumplimiento con los criterios de seguridad establecidos por la normativa aplicable.

Etapla 6: Evaluación de resultados y análisis de impacto

Finalmente, se integran y analizan de manera conjunta los resultados obtenidos de las simulaciones hidráulicas y estructurales, evaluando de forma predictiva el impacto del filtro dúplex en la reducción del desgaste abrasivo y en la optimización de la vida útil de las válvulas de succión y descarga. Los resultados se contrastan con las hipótesis planteadas y se discuten en relación con los antecedentes técnicos y científicos revisados.

3.3. Variables y Operacionalización

Las variables de la investigación se estructuran en función del objetivo general y de las hipótesis planteadas. En el presente estudio se identifican una variable independiente, asociada al diseño y simulación del sistema de filtrado dúplex, y una variable dependiente, correspondiente a la optimización de la Vida útil proyectada de las válvulas de succión y descarga de las bombas GEHO. Ambas variables se analizan a través de dimensiones e indicadores cuantificables, los cuales permiten evaluar de manera objetiva, a nivel numérico y predictivo, el impacto técnico del sistema propuesto.

Tabla 9

Cuadro operacionalización de variables.

Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Instrumento de recolección
Variable independiente: Diseño y simulación del filtro dúplex	a) Diseño técnico e hidráulico b) Eficiencia de filtrado simulado c) Comportamiento hidráulico del sistema	- Presión diferencial simulada entre entrada y salida - Caudal simulado a través del filtro - Grado de retención de partículas sólidas	bar, L/s, % de retención, horas de operación	Software de simulación CFD y FEA, fichas técnicas, hojas de cálculo
Variable dependiente: Vida útil de las válvulas de succión y descarga	a) Desgaste superficial b) Condición operativa simulada	- Índice de desgaste estimado - Vida útil proyectada de las válvulas	Índice adimensional, horas estimadas	Modelos de desgaste, resultados de simulación, análisis comparativo numérico
Variable interviniente (controlada): Condiciones del fluido bombeado	a) Concentración de sólidos b) Tamaño medio de partícula c) Composición química	- % de sólidos en suspensión - D50 (diámetro medio de partícula) - pH y presencia de minerales abrasivos	%, μm , unidades pH	Información técnica del proceso, análisis de laboratorio, reportes químicos

El análisis de estas variables permitirá evaluar de manera predictiva el efecto del sistema de filtración dúplex sobre el desgaste abrasivo de las válvulas de succión y descarga, a partir de los resultados obtenidos mediante simulaciones hidráulicas y estructurales. De este modo, se validará el cumplimiento de la hipótesis planteada, demostrando que el diseño y la simulación del filtro dúplex contribuyen a la optimización de la vida útil de las válvulas, sin recurrir a mediciones en condiciones reales de operación.

3.4. Población y Muestra

Población

La población de estudio está conformada por todas las bombas GEHO TPZM 2000 instaladas en la Unidad Minera Morococha, las cuales forman parte del sistema de transporte de relaves y operan bajo condiciones de bombeo de pulpas minerales con alta concentración de sólidos. Estos equipos representan el universo técnico de análisis, ya que concentran los problemas asociados al desgaste abrasivo de las válvulas de succión y descarga que motivan la presente investigación.

En este contexto, la población comprende los sistemas de bombeo GEHO, las válvulas de succión y descarga expuestas a condiciones abrasivas, así como la información técnica disponible relacionada con parámetros de operación hidráulica (presión, caudal y temperatura) y registros históricos de funcionamiento, los cuales sirven como base para la definición de condiciones de diseño y simulación del sistema de filtrado dúplex.

Muestra

Dado el enfoque de diseño y simulación computacional adoptado en la investigación, la muestra no corresponde a equipos intervenidos físicamente, sino a un caso de estudio representativo, constituido por una bomba GEHO TPZM 2000 y su sistema de válvulas, seleccionados en función de sus condiciones típicas de operación dentro del sistema de transporte de relaves de la Unidad Minera Morococha.

La selección de este caso de estudio responde a un muestreo no probabilístico de tipo intencional, basado en la disponibilidad de información técnica confiable y en la representatividad del equipo respecto a los mecanismos de desgaste observados en la población. Sobre este caso se construyen los modelos hidráulicos y estructurales utilizados en las simulaciones CFD y FEA, permitiendo analizar de manera predictiva el desempeño del filtro

dúplex y su impacto en la optimización de la vida útil de las válvulas, sin considerar implementación física ni monitoreo en condiciones reales de operación

La evaluación del desempeño se realizará a nivel predictivo mediante escenarios de simulación equivalentes a rangos representativos de operación (p. ej., 720 a 2000 horas), utilizando registros históricos del sistema GEHO y parámetros físico-químicos del relave como condiciones de entrada. En consecuencia, no se contempla el monitoreo directo en operación real, sino la estimación de indicadores técnicos (pérdida de carga, esfuerzos, caudal y tendencia de vida útil) a partir de resultados CFD/FEA y cálculos de diseño.

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

La recolección de datos en la presente investigación se fundamenta en un enfoque cuantitativo y de simulación computacional, orientado a obtener información técnica confiable para el análisis del desgaste de las válvulas y la evaluación del desempeño del sistema de filtrado dúplex propuesto. Para ello, se emplean técnicas de análisis documental, modelación y simulación numérica, así como el uso de información técnica y resultados de laboratorio existentes, los cuales permiten caracterizar el sistema de bombeo y validar el diseño del filtro sin recurrir a mediciones en campo ni a la implementación física del sistema.

Técnicas de recolección de datos

Análisis documental: se recopila y analiza información técnica existente, como fichas técnicas de las bombas GEHO, planos, especificaciones del sistema, registros históricos de mantenimiento y reportes de operación, con el fin de establecer las condiciones de diseño y los parámetros de entrada para la simulación del sistema de filtrado dúplex.

Análisis de información operativa histórica: se utilizan datos históricos de presión, caudal, horas de operación y fallas registradas, los cuales permiten caracterizar el

comportamiento típico del sistema de bombeo y definir escenarios representativos para el análisis numérico.

Análisis físico-químico de fluidos: se emplean resultados de análisis de laboratorio disponibles sobre el fluido bombeado, tales como concentración de sólidos, granulometría (D50), densidad y pH, que sirven como insumo para la caracterización del fluido en los modelos de simulación.

Simulación computacional: se aplican herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) para analizar el comportamiento hidráulico del filtro dúplex, evaluando parámetros como pérdida de carga, distribución de presión, líneas de flujo y caudal operativo. Asimismo, se emplea el análisis por elementos finitos (FEA) para evaluar el comportamiento estructural del sistema, considerando tensiones, deformaciones y factores de seguridad.

Tabla 10

Instrumentos de análisis y simulación

Instrumento / herramienta	Aplicación específica	Tipo de dato obtenido
Software CFD (ANSYS Fluent / SolidWorks Flow Simulation)	Simulación hidráulica del flujo, pérdida de carga y distribución de presión	Presión (bar), velocidad (m/s), caudal (L/s)
Software FEA (ANSYS Mechanical / SolidWorks Simulation)	Análisis estructural del filtro dúplex	Tensiones (MPa), deformaciones (mm), factor de seguridad
Fichas técnicas y planos del sistema GEHO	Definición de parámetros geométricos y operativos	Datos dimensionales y operativos
Reportes de laboratorio del fluido	Caracterización física y química del fluido bombeado	% sólidos, D50, pH
Hojas de cálculo técnicas	Procesamiento y comparación de resultados de simulación	Valores numéricos comparativos

La aplicación de estas técnicas e instrumentos permite obtener datos objetivos, reproducibles y verificables a nivel numérico, asegurando una evaluación integral y coherente del impacto del diseño y la simulación del filtro dúplex sobre la optimización de la vida útil de las válvulas de succión y descarga del sistema de bombeo GEHO.

3.6. Procedimientos de Análisis

El análisis de la información se desarrollará de manera secuencial, cuantitativa y comparativa, con el propósito de establecer la relación entre la variable independiente, correspondiente al diseño y simulación del sistema de filtrado dúplex, y la variable dependiente, asociada a la optimización de la vida útil de las válvulas de succión y descarga. Este procedimiento integra herramientas de análisis técnico e ingenieril, basadas en resultados de simulación computacional, con el fin de validar las hipótesis planteadas y evaluar el desempeño del sistema propuesto desde un enfoque predictivo.

Etapas del análisis

a. Organización y depuración de información

Se recopilarán y organizarán los datos técnicos obtenidos durante el diagnóstico del sistema y los resultados generados por las simulaciones hidráulicas y estructurales. La información será depurada para asegurar coherencia y consistencia en los parámetros de entrada y salida de los modelos numéricos, y posteriormente sistematizada en tablas y hojas de cálculo para su análisis.

b. Análisis descriptivo y comparativo de resultados simulados

Se realizará un análisis descriptivo de los principales parámetros obtenidos de las simulaciones, tales como presión, caudal, pérdida de carga, tensiones y deformaciones. Asimismo, se efectuará una comparación entre el escenario base (sin filtro) y el escenario con

filtro dúplex diseñado, con el objetivo de identificar variaciones significativas en el comportamiento hidráulico y estructural del sistema.

c. Evaluación técnica de desempeño hidráulico

A partir de los resultados de las simulaciones CFD, se evaluará el comportamiento hidráulico del filtro dúplex, analizando la distribución de presión, las líneas de flujo, la velocidad del fluido y la pérdida de carga generada por el sistema. Este análisis permitirá verificar si el diseño propuesto cumple con los criterios de operación continua y compatibilidad hidráulica con las bombas GEHO.

d. Análisis estructural y estimación del impacto en la vida útil de las válvulas

Con base en los resultados del análisis por elementos finitos (FEA) y en modelos teóricos de desgaste, se realizará una estimación predictiva del impacto del sistema de filtración sobre la reducción del desgaste abrasivo de las válvulas. A partir de estos resultados, se proyectará la optimización de la vida útil de los componentes, sin recurrir a mediciones en condiciones reales de operación.

e. Validación de la hipótesis

Finalmente, los resultados obtenidos de las simulaciones hidráulicas y estructurales serán interpretados en función de la hipótesis general y las hipótesis específicas planteadas. La validación se realizará mediante el análisis comparativo de escenarios simulados y la coherencia de los resultados con los fundamentos teóricos y antecedentes técnicos revisados.

3.7. Cronograma de Ejecución

El desarrollo de la investigación se planifica en seis etapas principales, organizadas de manera secuencial y lógica, con el propósito de garantizar el cumplimiento de los objetivos específicos planteados. Cada etapa se interrelaciona con las demás, de modo que los resultados

obtenidos en una fase constituyen la base técnica para el desarrollo de la siguiente, manteniendo coherencia con el enfoque de diseño y simulación computacional del sistema de filtrado dúplex.

El periodo total estimado para la ejecución del estudio es de **seis meses**, considerando el tiempo requerido para el diagnóstico del sistema de bombeo, el análisis del fluido, el diseño técnico del filtro, la realización de simulaciones hidráulicas y estructurales, así como la evaluación de resultados y la elaboración del informe final. El cronograma propuesto en la tabla 11 no contempla actividades de implementación física ni pruebas en campo, limitándose al análisis técnico-numérico del sistema propuesto.

Tabla 11

Cronograma general de ejecución del estudio

Etapas del estudio	Actividades principales	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6
1. Diagnóstico del sistema de bombeo GEHO	Revisión documental, inspección técnica, levantamiento de datos operativos y fallas						
2. Análisis físico-químico del fluido bombeado	Muestreo, ensayos de laboratorio, caracterización granulométrica y composición química						
3. Diseño técnico del filtro dúplex	Cálculo hidráulico, dimensionamiento, selección de materiales, planos y modelado 3D						
4. Simulación y validación del diseño	Simulación CFD, análisis de pérdida de carga, simulación estructural (FEA)						
5. Evaluación de resultados simulados	Análisis comparativo de escenarios simulados, estimación de impacto en vida útil						
6. Redacción y presentación del informe final	Interpretación de resultados, conclusiones y elaboración del documento final						

El cronograma propuesto es flexible y puede ajustarse en función de la disponibilidad de información técnica y del avance en las simulaciones computacionales. No obstante, la planificación establecida garantiza una ejecución ordenada, progresiva y coherente con el enfoque metodológico adoptado, asegurando la trazabilidad entre los objetivos, la metodología y los resultados del estudio.

3.8. Recursos Necesarios

Para la correcta ejecución de la investigación se requiere la disponibilidad de recursos humanos, técnicos, informáticos y financieros, orientados al desarrollo del diseño y la simulación computacional del sistema de filtrado dúplex. Estos recursos permiten realizar de manera eficiente las actividades de diagnóstico técnico, análisis del fluido, modelado del filtro, simulaciones hidráulicas y estructurales, así como la evaluación y sistematización de los resultados obtenidos.

Tabla 12

Recursos humanos

Recurso	Responsabilidad principal
Tesista	Planificación, desarrollo y ejecución del proyecto de investigación.
Asesor académico	Supervisión académica, revisión metodológica y orientación técnica del diseño.
Especialista en ingeniería mecánica	Asesoría técnica para el análisis del sistema de bombeo y criterios de diseño del filtro dúplex.
Analista de laboratorio	Provisión e interpretación de resultados de análisis físico-químicos del fluido (datos secundarios).

Tabla 13*Recursos materiales y técnicos*

Recurso / equipo	Uso o aplicación
Información técnica de bombas GEHO TPZM 2000	Definición de condiciones de operación y parámetros de diseño.
Computadora de alto rendimiento	Procesamiento de modelos numéricos y simulaciones.
Software de diseño CAD (SolidWorks)	Modelado geométrico del filtro dúplex.
Software de simulación CFD (ANSYS Fluent)	Análisis hidráulico del sistema.
Software de análisis estructural FEA (ANSYS Mechanical)	Evaluación de tensiones, deformaciones y factores de seguridad.
Software de análisis de datos (Excel, MATLAB)	Procesamiento, comparación y representación de resultados.

La estructura del equipo humano garantiza una interacción equilibrada entre la labor académica, técnica y operativa. Cada miembro cumple un rol fundamental en la obtención de resultados válidos, asegurando que el diseño, la instalación y la validación del filtro dúplex se realicen bajo supervisión profesional y conforme a estándares de seguridad y calidad.

Recursos financieros

El presupuesto estimado considera exclusivamente los costos asociados al diseño, simulación computacional, análisis de información y soporte técnico, sin contemplar la fabricación ni la implementación física del sistema de filtrado dúplex.

Tabla 14*Recursos financieros*

Concepto	Descripción	Costo estimado (S/.)
Análisis de laboratorio (datos secundarios)	Granulometría, concentración de sólidos y pH del fluido bombeado	1,200
Licencia temporal de software especializado	Diseño CAD, simulación CFD y análisis FEA	2,000
Equipamiento informático	Uso y mantenimiento de estación de trabajo	1,500
Material bibliográfico y documentación técnica	Normas, manuales y referencias especializadas	800
Gastos logísticos y administrativos	Coordinación técnica y soporte académico	700
Total, estimado	—	6,200

El presupuesto propuesto evidencia la viabilidad técnica y económica del estudio, al concentrar los recursos en las etapas de diseño y simulación computacional. La inversión estimada es coherente con el alcance metodológico de la investigación y garantiza la obtención de resultados técnicos confiables que sirvan como base para una futura implementación industrial del sistema propuesto.

CAPÍTULO IV

4. DESARROLLO DEL DISEÑO Y VALIDACIÓN

4.1. Descripción del Sistema, Equipo o Proceso

4.1.1. Diagnóstico del estado actual del sistema de bombeo GEHO.

El diagnóstico del sistema de bombeo GEHO en la Unidad Minera Morococha se orientó a evaluar las condiciones operativas de las bombas TPZM 2000, determinando el grado de desgaste, la frecuencia de fallas y los tiempos de inactividad asociados principalmente al deterioro de las válvulas de succión y descarga. Este análisis constituye la base para identificar las deficiencias del sistema y definir los criterios técnicos necesarios para el diseño de una solución de filtrado que permita optimizar su funcionamiento.

El estudio se apoyó en la recopilación de datos históricos de mantenimiento, fichas técnicas del fabricante Weir Minerals, informes de operación y observaciones de campo realizadas en la planta concentradora. Los resultados obtenidos se presentan en forma de tablas, gráficos y descripciones técnicas que permiten establecer una relación directa entre el comportamiento del sistema y las condiciones del fluido bombeado.

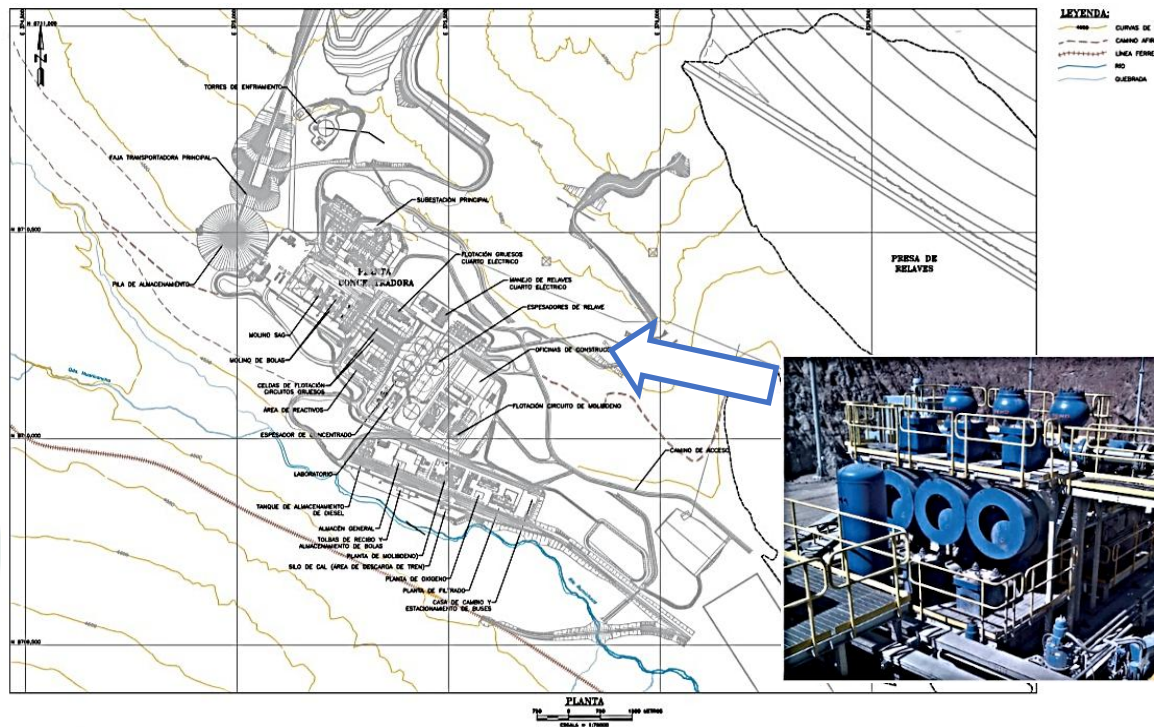
4.1.2. Caracterización del sistema de bombeo

El sistema GEHO TPZM 2000 se compone de diez bombas de pistón hidráulico de desplazamiento positivo, diseñadas para transportar relaves mineros densos con un contenido de sólidos de hasta 75 %. Cada bomba está impulsada por un motor de 3 500 HP y trabaja a presiones que oscilan entre 16 y 20 MPa, enviando el material desde la planta concentradora hacia la presa de relaves.

La distribución de las bombas en planta se realiza en dos líneas paralelas que operan de forma continua, garantizando la redundancia del sistema. En la siguiente figura 3 se muestra la disposición de las bombas en la planta.

Figura 3

Disposición de las bombas GEHO en la planta concentradora de la Unidad Minera Morococha.



Nota. En la figura muestra la Unidad Minera ubicada en Morococha (2015).

La distribución mostrada evidencia un diseño que prioriza la continuidad operativa mediante trenes paralelos de bombeo. Sin embargo, este arreglo también implica que, ante el desgaste de componentes críticos como las válvulas de succión o descarga, el impacto se replica en ambas líneas, afectando el rendimiento general del sistema. Por ello, se requiere una estrategia de mantenimiento predictivo y un control más riguroso del fluido bombeado para mitigar los paros no programados.

4.1.3. Componentes críticos y modos de falla

Durante el diagnóstico se identificaron los componentes que presentan mayor índice de desgaste y que, por tanto, representan los principales puntos de vulnerabilidad del sistema. La tabla 15 resume los componentes críticos, su frecuencia de recambio, el modo de falla predominante y las recomendaciones técnicas asociadas.

Tabla 15*Componentes críticos del sistema de bombeo GEHO.*

Componente	Frecuencia de recambio (h)	Modo de falla principal	Material original	Recomendación técnica
Válvula de succión	400 – 720	Erosión abrasiva	Acero al carbono	Sustituir por AISI 316 con recubrimiento cerámico
Válvula de descarga	350 – 550	Cavitación y erosión	Acero al carbono	Emplear acero dúplex 2205 o revestimiento Stellite
Anillos de sellado	250 – 400	Desgaste por fricción	Caucho nitrilo	Reemplazar por Vitón o EPDM reforzado
Asiento de válvula	500 – 700	Erosión localizada	Hierro fundido	Aplicar recubrimiento Stellite o carburo de tungsteno
Diafragma	800 – 1 000	Fatiga por presión cíclica	Caucho reforzado	Controlar presión interna y temperatura

Nota. A partir de registros de mantenimiento GEHO Morococha (2016–2017).

Los datos confirman que las válvulas de succión y descarga son los elementos de mayor vulnerabilidad, con una vida útil promedio de 400 a 720 horas de operación continua. Este deterioro se asocia directamente a la naturaleza abrasiva del relave y a la ausencia de sistemas de filtrado en la línea de succión. Los anillos de sellado y asientos de válvula presentan fallas por fricción y erosión localizada, lo cual repercute en fugas internas y pérdida de eficiencia volumétrica del bombeo.

4.1.4. Indicadores de confiabilidad operacional

Se calcularon los indicadores de desempeño y confiabilidad del sistema a partir de los registros de fallas como se muestra en la tabla 16. Los parámetros evaluados fueron el MTBF (tiempo medio entre fallas), MTTR (tiempo medio de reparación) y la disponibilidad operativa, tal como se presenta a continuación:

Tabla 16*Indicadores de confiabilidad de las bombas GEHO TPZM 2000.*

Bomba GEHO	MTBF (h)	MTTR (h)	Nº Fallas / año	Disponibilidad (%)
255-PP-048	605	3	38	99.50
255-PP-049	386	4	55	99.00
255-PP-050	546	5	39	99.10
255-PP-051	554	5	44	99.10
255-PP-052	646	5	36	99.20
255-PP-054	321	5	82	98.45
255-PP-055	339	5	72	98.55
255-PP-056	408	5	59	98.75
255-PP-057	523	5	45	99.05
255-PP-058	622	5	36	99.20

Nota. En la figura muestra Unidad Minera Morococha, registros de mantenimiento (2016–2017)

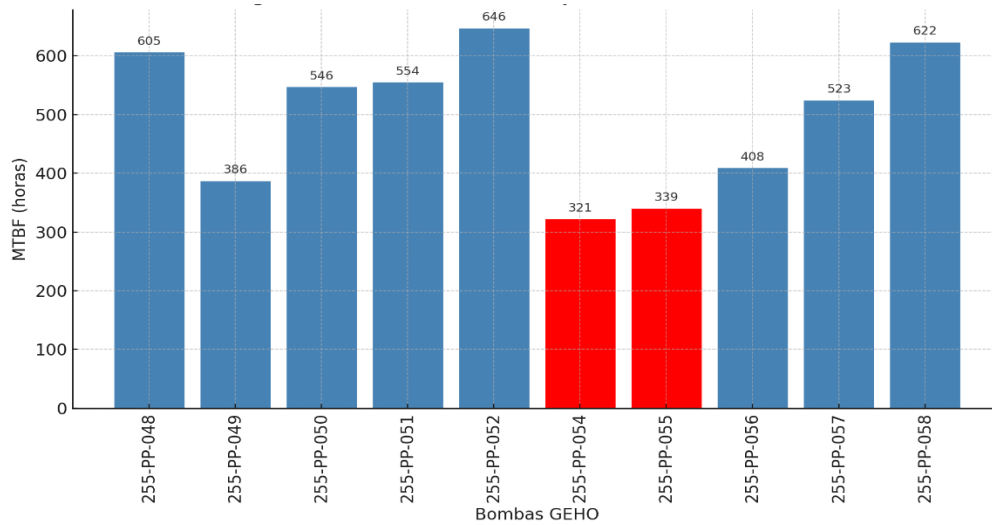
El valor promedio de MTBF fue de 495 horas, evidenciando una confiabilidad moderada del sistema. Las bombas 255-PP-054 y 255-PP-055 presentaron los menores tiempos entre fallas debido a su exposición directa al flujo de relaves con mayor concentración de sólidos. En contraste, las bombas aguas abajo (255-PP-052 y 255-PP-058) alcanzaron mayor estabilidad operativa. La disponibilidad global del sistema (98.9 %) cumple con los estándares mineros, aunque los altos costos de reparación y el número total de fallas justifican la implementación de mejoras tecnológicas.

4.1.5. Frecuencia de fallas por unidad

El comportamiento de las fallas se representa gráficamente en la siguiente figura, donde se observa la distribución del MTBF por cada bomba.

Figura 4

Distribución del MTBF por unidad de bombeo GEHO.



Nota. Adaptado con base en registros de mantenimiento, 2016–2017, recopilada por elaboración propia.

La gráfica 4 confirma que la frecuencia de fallas es inversamente proporcional a la posición de la bomba en el circuito hidráulico. Las unidades que se encuentran más próximas a la fuente de relave presentan una mayor tasa de desgaste, lo que demuestra la influencia de las partículas no sedimentadas y la ausencia de filtrado previo. Este comportamiento será la base para el diseño del filtro dúplex, cuyo propósito será reducir el ingreso de partículas abrasivas.

4.1.6. Frecuencia de fallas por tipo de válvula

Para determinar el tipo de componente más afectado, se clasificaron las fallas reportadas según el tipo de válvula dañada: succión o descarga como se muestra en la tabla 17. Esta separación permite reconocer si el daño principal se origina durante la admisión del fluido o en la etapa de impulsión, influenciada por los cambios de presión.

Tabla 17*Frecuencia de fallas por tipo de válvula y unidad GEHO*

Bomba (TAG)	Fallas válvula de succión (#/año)	Fallas válvula de descarga (#/año)	% Succión	% Descarga	Comentario técnico
255-PP-048	15	23	39	61	Desgaste moderado en descarga, sin impacto mayor.
255-PP-049	25	30	45	55	Fallas mixtas, golpes hidráulicos ocasionales.
255-PP-054	48	34	59	41	Predomina abrasión en succión por partículas gruesas.
255-PP-055	44	28	61	39	Alta erosión en válvula de succión.
255-PP-058	18	18	50	50	Condición equilibrada, sin incidencia significativa.

La tabla 17 muestra la clasificación de una mayor incidencia de fallas en válvulas de succión (55–60 % del total), asociadas a la entrada directa de sólidos abrasivos al sistema. Las válvulas de descarga presentan daños por cavitación y fluctuaciones de presión, con menor severidad. El comportamiento de las bombas 255-PP-054 y 255-PP-055 evidencia que las partículas mayores a 100 μm provocan erosión acelerada en la admisión del fluido, lo que refuerza la necesidad de implementar un sistema de filtrado previo o dúplex que minimice el ingreso de material sólido al conjunto de bombeo.

4.1.7. Evaluación de tiempos de inactividad

El análisis económico de los periodos de mantenimiento permite dimensionar el impacto operativo de las paradas de bomba. A continuación, se muestran los valores promedio obtenidos durante los eventos de intervención:

Tabla 18*Impacto del tiempo de inactividad en el sistema GEHO.*

Parámetro	Valor promedio	Unidad
MTTR promedio	4,5	horas
Pérdida de bombeo	2 600	m ³ /evento
Costo energético	720	\$ por evento
Mano de obra técnica	1 180	\$ por evento
Costo total por parada	4 800	\$ promedio

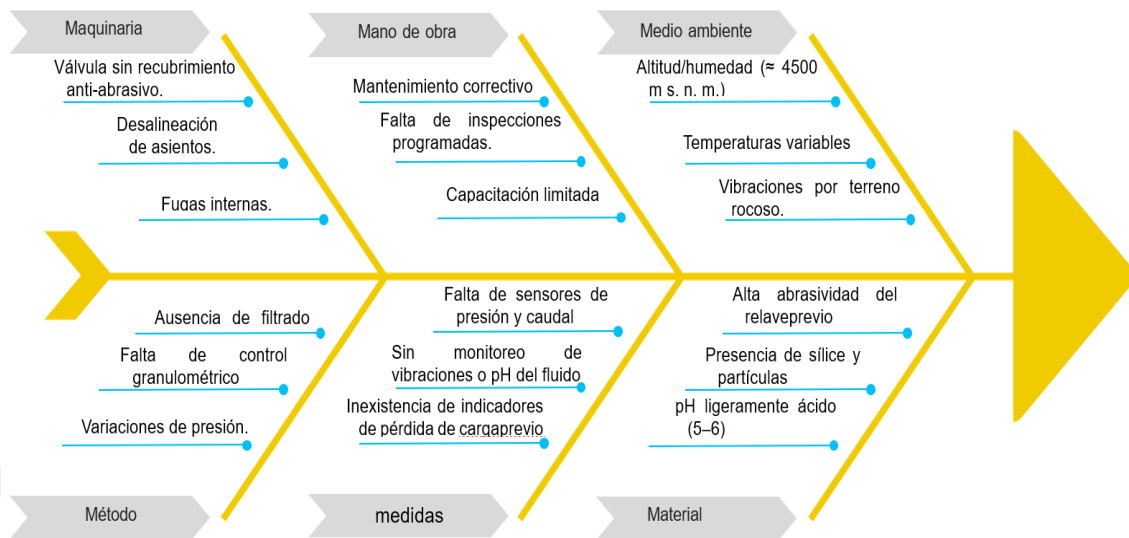
El tiempo promedio de reparación de 4,5 horas por evento implica una pérdida significativa de continuidad en el transporte de relaves. Cada parada representa una pérdida económica aproximada de \$ 4 800, debido al consumo energético no productivo y la mano de obra involucrada. En consecuencia, cualquier estrategia de mejora que reduzca las intervenciones correctivas tendrá un impacto directo en la rentabilidad y sostenibilidad del proceso.

4.1.8. Análisis de causas de falla

El análisis de causa raíz, desarrollado mediante el diagrama de Ishikawa de la figura 5, permitió clasificar los factores que inciden en el desgaste prematuro de válvulas y componentes internos del sistema.

Figura 5

Diagrama de causa-efecto del desgaste en válvulas GEHO.



La figura 5 evidencia que las fallas no obedecen a un único factor, sino a la interacción de varios elementos: la abrasividad del relave (material), la ausencia de filtrado (método), el diseño de válvulas sin recubrimiento resistente (máquina), la falta de mantenimiento predictivo (mano de obra) y la variación en la presión de operación (medio). Esta multicausalidad sustenta la necesidad de un rediseño del sistema de succión que incluya un componente filtrante eficiente.

4.2. Requerimientos de diseño

4.2.1. Caracterización físico-química del fluido bombeado

El análisis físico-químico del fluido bombeado por el sistema GEHO en la Unidad Minera Morococha constituye una etapa esencial para comprender las causas de desgaste prematuro en las válvulas de succión y descarga. Los relaves provenientes del proceso de concentración de minerales metálicos contienen una mezcla compleja de sólidos finos, sales

disueltas y componentes abrasivos que influyen directamente en la durabilidad de los materiales metálicos.

El estudio se basó en el balance metalúrgico de la planta y en muestreos representativos del relave conducido por las bombas TPZM 2000, con el propósito de identificar los principales contaminantes sólidos, su granulometría, pH, densidad y composición química.

4.2.2. Composición general del relave bombeado

El fluido analizado corresponde a una suspensión de partículas minerales y agua residual industrial, resultante de la molienda y flotación de sulfuros de cobre, plomo y zinc. En la Tabla 19 se presentan los valores promedio obtenidos en los análisis de laboratorio y contrastados con el balance metalúrgico oficial de la planta.

Tabla 19

Propiedades físico-químicas del relave bombeado por el sistema GEHO.

Parámetro	Valor promedio	Unidad	Observaciones
Densidad aparente	2 700	kg/m ³	Relave típico de molienda fina (75 % sólidos).
pH del fluido	5.4	–	Medio ligeramente ácido, favorece la corrosión.
Viscosidad dinámica	0.012	Pa·s	Incrementada por alta concentración de partículas finas.
Contenido de sólidos	74.8	% peso	Mezcla de cuarzo, pirita y silicatos.
Diámetro medio (D ₅₀)	75	µm	Rango granulométrico dominante: 10–150 µm.
Temperatura de operación	23 – 40	°C	Estable dentro del rango ambiente.
Conductividad eléctrica	4.2	mS/cm	Elevada por presencia de sulfatos y cloruros.
Potencial redox (Eh)	+420	mV	Medio oxidante, acelera desgaste por corrosión.

El relave presenta una alta densidad y concentración de sólidos abrasivos, condiciones que generan erosión acelerada sobre las superficies metálicas expuestas. La acidez moderada (pH 5.4) y la conductividad elevada indican un medio propenso a la corrosión electroquímica. En consecuencia, los materiales de las válvulas (acero al carbono) se ven sometidos a ataques combinados de abrasión–corrosión, reduciendo drásticamente su vida útil.

4.2.3. Composición mineralógica del relave

El análisis de difracción de rayos X y observación microscópica permitió identificar los principales componentes minerales del relave, los cuales explican su comportamiento abrasivo.

Tabla 20

Composición mineralógica del relave.

Componente mineral	Porcentaje (% en masa)	Característica técnica
Cuarzo (SiO_2)	45	Elevada dureza (7 Mohs), principal agente abrasivo.
Pirita (FeS_2)	25	Genera oxidación ácida y partículas metálicas duras.
Feldspatos y silicatos	10	Contribuyen a la fricción mecánica.
Calcita y dolomita	8	Actúan como agentes neutralizantes parciales.
Arcillas (illita, caolinita)	7	Incrementan la viscosidad del fluido.
Magnetita y hematita	5	Partículas de alta densidad y dureza.

Nota. En la figura muestra Laboratorio Metalúrgico Morococha, 2024.

El cuarzo y la pirita representan el 70 % de los componentes sólidos del relave, siendo los principales responsables del desgaste abrasivo de válvulas y asientos. Las partículas metálicas (magnetita, hematita) y los silicatos intensifican la erosión por impacto durante el

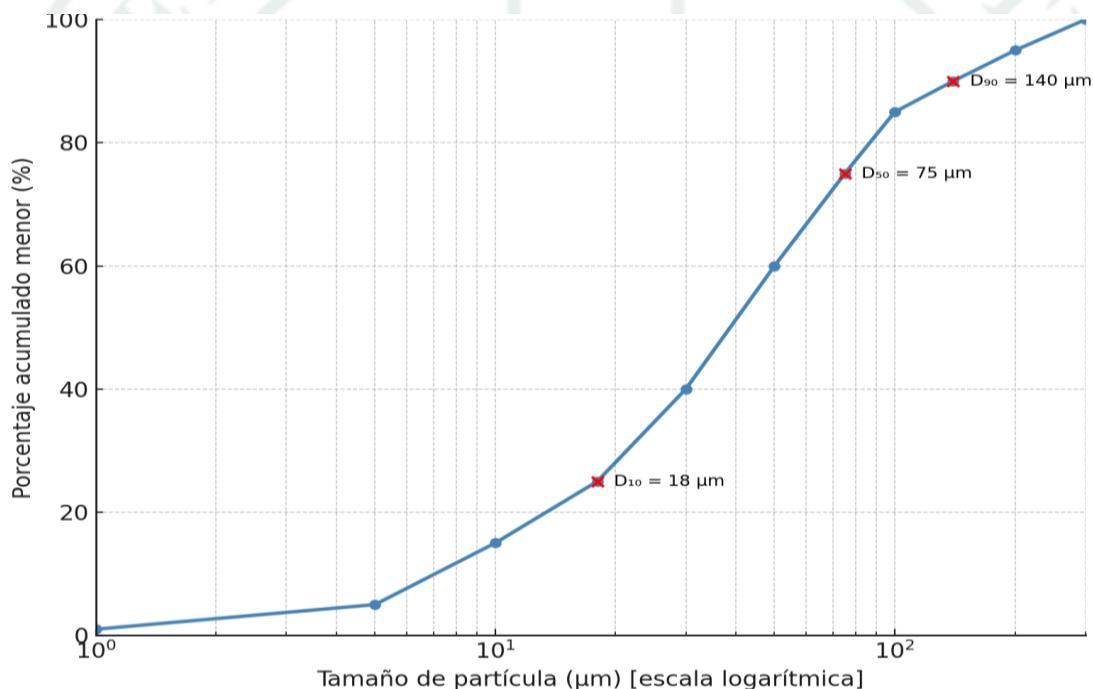
cierre de válvulas, mientras que las arcillas aumentan la resistencia viscosa del fluido, reduciendo la eficiencia hidráulica del bombeo.

4.2.4. Granulometría del fluido bombeado

La distribución de tamaños de partícula fue evaluada mediante análisis láser y tamizado húmedo. Los resultados se presentan en la Figura 6, donde se evidencia una alta proporción de partículas finas (menores a 100 μm).

Figura 6

Curva de distribución granulométrica del relave bombeado.



El predominio de partículas finas ($<150 \mu\text{m}$) explica la formación de una capa semisólida en la zona de asiento de válvulas. Sin embargo, las fracciones gruesas ($>100 \mu\text{m}$) son las que producen mayor daño mecánico por impacto, especialmente en la válvula de descarga. Esta combinación de abrasión fina y choque puntual justifica la necesidad de incorporar un sistema de filtrado previo que retenga partículas de gran tamaño.

4.2.5. Análisis químico del fluido

El análisis químico del agua residual del relave se realizó mediante espectrofotometría y volumetría. La Tabla 21 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 21

Composición química del agua de relave.

Elemento / Ion	Concentración (mg/L)	Observaciones
Sulfatos (SO_4^{2-})	480	Proviene de oxidación de pirita; favorece corrosión.
Cloruros (Cl^-)	320	Acelera picaduras en aceros al carbono.
Hierro total ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$)	110	Producto de desgaste metálico.
Calcio (Ca^{2+})	145	Proveniente de minerales carbonatados.
Magnesio (Mg^{2+})	92	Moderado, contribuye a dureza del agua.
Sílice disuelta (SiO_2)	68	Proviene de partículas de cuarzo y silicatos.
Conductividad eléctrica	4.2 mS/cm	Alta; medio conductor.

Nota. En la figura muestra ensayo químico, Laboratorio Metalúrgico Morococha, 2024.

Los resultados confirman un medio químicamente agresivo. Los sulfatos y cloruros actúan como agentes corrosivos que deterioran las superficies metálicas de las válvulas, generando micro fisuras y corrosión localizada. Este efecto se amplifica cuando las válvulas operan con presión pulsante, ya que la capa protectora del metal se destruye cíclicamente.

4.2.6. Efecto combinado del fluido sobre las válvulas

La interacción entre las propiedades físicas (densidad, granulometría) y químicas (pH, sales disueltas) del relave produce un fenómeno combinado de erosión-corrosión, descrito en la Tabla 22.

Tabla 22

Interacción físico-química y su efecto en componentes del sistema GEHO.

Propiedad del fluido	Mecanismo de daño	Componente afectado	Consecuencia
Alta densidad (2 700 kg/m ³)	Impacto de partículas	Válvula de descarga	Erosión superficial y pérdida de espesor.
pH ácido (5.4)	Corrosión electroquímica	Asiento metálico	Picaduras y pérdida de estanqueidad.
Alto contenido de cuarzo	Abrasión continua	Válvula de succión	Desgaste por rozamiento cíclico.
Sulfatos y cloruros	Ataque químico	Cuerpo de válvula	Corrosión localizada y fisuración.
Fracciones >100 µm	Golpe hidráulico	Tapa de válvula	Desalineación y micro fisuras.

El comportamiento abrasivo y químicamente agresivo del fluido confirma que el diseño original del sistema carece de un mecanismo efectivo de filtrado. Los resultados justifican la selección de materiales resistentes a la abrasión y la implementación de un filtro dúplex de acero inoxidable AISI 316, capaz de retener partículas mayores a 250 µm sin interrumpir el flujo continuo.

4.3. Memoria de cálculo

4.3.1. Datos de entrada y criterios de diseño

El diseño del filtro dúplex propuesto se fundamenta en los parámetros operativos reales del sistema de bombeo GEHO, obtenidos a partir del diagnóstico técnico y del análisis físico-químico del fluido bombeado. Estos valores constituyen la base de la memoria de cálculo, garantizando que las condiciones hidráulicas, geométricas y normativas del nuevo sistema de filtrado sean compatibles con el régimen de operación actual. En la Tabla 23 se resumen los principales datos de entrada y criterios de diseño, los cuales fueron definidos en función del

caudal nominal de las bombas GEHO, la velocidad de flujo admisible para relaves abrasivos, la pérdida de carga tolerable, la selección del material de fabricación y la necesidad operativa de mantener una operación continua mediante la conmutación alternada de canastillas filtrantes.

Tabla 23

Datos de entrada y criterios de diseño del filtro dúplex GEHO

Parámetro / Descripción	Valor o Especificación
Servicio	Relave minero abrasivo con fracción de sólidos significativa.
Objetivo del equipo	Pre-filtrado en línea (strainer) tipo dúplex , con conmutación de canastillas sin detener el bombeo.
Caudal de diseño (Q)	655.25 m³/h = 0.182 m³/s — dato nominal de operación de bomba GEHO (Weir).
Velocidad de línea (V_{línea})	2.5 m/s — criterio para evitar sedimentación y erosión en flujo de slurry.
Velocidad a través de malla (V_{malla})	0.8 m/s — rango recomendado de 0.6 a 1.0 m/s para slurry.
Porosidad efectiva (φ)	0.40 (40 %) — malla perforada o plisada.
Tamaño de corte (cut-off)	250 μm — enfocado en retener partículas >100 μm, principales causantes del desgaste.
Límites de pérdida de carga (ΔP)	Limpia: 10–20 kPa / Conmutación: 40 kPa — práctica estándar en strainers industriales.
Normativa mecánica aplicada	ASME VIII-1 (cuerpo presurizado); ANSI B16.5 (bridas); ASTM / AISI 316 (carcasa y canastilla) por resistencia química y abrasiva.
Justificación de necesidad	Reducir el desgaste prematuro de válvulas de succión y descarga, evidenciado por bajo MTBF y alta frecuencia de fallas (2016–2017) .
Ubicación en el sistema	En la línea de succión , etapa previa a las bombas GEHO, para interceptar sólidos gruesos y proteger válvulas cónicas.

La selección de estos parámetros garantiza que el diseño del filtro dúplex responda a las condiciones reales del proceso de bombeo y a las exigencias operativas del sistema GEHO. Los

valores adoptados de caudal, velocidad de flujo y pérdida de carga aseguran un equilibrio entre eficiencia hidráulica y protección mecánica, mientras que la elección del material AISI 316 y el cumplimiento de normas ASME y ANSI fortalecen la confiabilidad estructural del equipo. En conjunto, estos criterios permiten establecer una base técnica sólida para un sistema de filtrado capaz de operar de forma continua, minimizando el desgaste de componentes críticos y mejorando la disponibilidad global del sistema.

4.3.2. Dimensionamiento hidráulico del filtro dúplex

4.3.2.1. Diámetro de línea equivalente (verificación)

Para verificar que el diámetro nominal de la línea es coherente con el criterio de velocidad adoptado, se emplea la ecuación de continuidad:

$$Q = V * A$$

Donde:

Q es el caudal de diseño (m³/s).

V es la velocidad promedio en la línea (m/s).

A es el área transversal de la tubería (m²).

El área de la sección circular se calcula como:

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

Despejando el diámetro equivalente:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$$

Se verifica que el diámetro nominal sea coherente con el criterio de velocidad:

$$A_{tube} = \frac{Q}{V_{línea}} = \frac{0.182}{2.5} = 0.0728 \text{ m}^2$$

$$D_{equiv} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.0728}{\pi}} = 0.304 \text{ m} \approx DN 300$$

DN 300 es consistente con la operación nominal de GEHO reportada.

4.3.2.2. Área filtrante requerida

Para filtros tipo strainer operando con slurry, el diseño controla la velocidad a través de la malla y define el área efectiva necesaria para limitar la pérdida de carga. La velocidad a través de malla se calcula como:

$$V_{malla} = \frac{Q}{A_{NOA}}$$

Donde:

V_{malla} es la velocidad a través de malla (m/s).

Q es el caudal (m³/s).

A_{NOA} es el área neta abierta (Net Open Área) (m²).

Despejando el área neta requerida:

$$A_{NOA} = \frac{Q}{V_{malla}}$$

Además, considerando la porosidad efectiva del medio filtrante (ϕ), el área bruta se estima como:

$$A_{bruta} = \frac{A_{NOA}}{\phi}$$

Para slurry, la práctica recomienda que el área bruta de filtración sea $\geq 2-3 \times$ el área de la tubería y que la velocidad a través de malla esté ≤ 1.0 m/s.

$$A_{NOA} = \frac{Q}{V_{malla}} = \frac{0.182}{0.8} = 0.227 \text{ m}^2$$

$$A_{gross} = \frac{A_{NOA}}{\phi} = \frac{0.227}{0.40} = 0.568 \text{ m}^2$$

$$A_{tubo} = 0.0728 \text{ m}^2 \rightarrow 2 \times A_{tubo} = 0.146, \quad 3 \times A_{tubo} = 0.219 \text{ m}^2$$

Tabla 24*Resumen de área de filtración (diseño dúplex)*

Magnitud	Resultado
$A_{NOA} \text{ (m}^2\text{)}$	0.227
$A_{gross} \text{ (m}^2\text{)}$	0.568
$2 \times A_{tubo} \text{ (m}^2\text{)}$	0.146
$3 \times A_{tubo} \text{ (m}^2\text{)}$	0.219
Criterio $A_{gross} \geq 2 - 3 \times A_{tubo}$	Cumple

4.3.2.3. Geometría preliminar de canastilla

La geometría preliminar de la canastilla se definió en función del caudal de diseño, la velocidad de flujo y el área efectiva requerida para garantizar una filtración eficiente. Su dimensionamiento busca mantener una pérdida de carga mínima y una adecuada capacidad de retención de partículas abrasivas. Este análisis permite determinar las dimensiones óptimas del elemento filtrante, asegurando la continuidad operativa del sistema GEHO y la protección de sus válvulas críticas.

Para una canastilla cilíndrica, la superficie lateral activa disponible para filtración se aproxima mediante:

$$A_{cil} = \pi D_{can} H_{can}$$

Donde:

A_{cil} es el área lateral efectiva (m²).

D_{can} es el diámetro de la canastilla (m).

H_{can} es la altura efectiva (m).

Con los valores adoptados $D_{can} = 0.35\text{m}$ y $H_{can} = 0.52\text{m}$:

Se adopta canastilla cilíndrica (perforada o plisada). Área lateral activa aproximada:

$$A \approx \pi D_{can} H_{can} \rightarrow H_{can} = \frac{A_{gross}}{\pi D_{can}}$$

$$D_{can} = 0.35 \text{ m}$$

$$H_{can} = \frac{0.568}{\pi \times 0.35} = 0.517 \text{ m}$$

Tabla 25

Dimensiones preliminares de canastilla

Parámetro	Valor
Diámetro canastilla, D_{can}	0.35 m
Altura canastilla, H_{can}	0.52 m
Superficie de filtración, $\pi D_{can} H_{can}$	0.57 m ²
Malla (cut-off)	250 μm , $\phi \approx 40 \%$

Si la ΔP limpia supera 20 kPa, aumentar A_{gross} (canastilla plisada o mayor diámetro/altura) o ajustar ϕ manteniendo cut-off.

4.3.3. Pérdida de carga (criterio y verificación)

Para strainers en slurry se controla ΔP limpia y de conmutación. A falta de curva del fabricante, se usa correlación:

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho V^2}{2}$$

Donde:

ζ depende de la geometría y ensuciamiento.

V es la velocidad local a través de malla.

El diseño fija: ΔP limpia 10–20 kPa y ΔP conmutación 40 kPa.

4.3.4. Selección de materiales y normas

La correcta selección de materiales constituye un factor determinante para garantizar la durabilidad y la confiabilidad del filtro dúplex propuesto, debido a las condiciones agresivas del fluido bombeado por las bombas GEHO. El relave minero presenta un pH ligeramente ácido y una alta concentración de sólidos abrasivos, por lo que se requiere el uso de aleaciones con buena resistencia tanto a la corrosión química como a la erosión mecánica. Asimismo, el cumplimiento de normas internacionales de diseño y fabricación asegura la integridad estructural del equipo bajo condiciones de presión y temperatura variables.

Tabla 26

Selección de materiales y normas aplicadas al diseño del filtro dúplex

Componente	Material / Especificación	Propiedad principal o función técnica	Norma / Referencia aplicable
Carcasa principal	AISI 316 (acero inoxidable austenítico)	Alta resistencia a la corrosión en medios ácidos con presencia de cloruros y sulfatos; buena tenacidad y soldabilidad.	ASME Sección VIII-1 (Diseño de recipientes a presión); ASTM A240 (láminas y placas de acero inoxidable).
Canastilla filtrante	AISI 316 (malla perforada o plisada)	Resistencia a la abrasión moderada y estabilidad mecánica bajo flujo turbulento.	ASTM A240 / A276 (barras y mallas de acero inoxidable).
Pernos y bridas	Acero inoxidable A4-70 / ANSI B16.5	Alta resistencia mecánica y anticorrosiva en uniones desmontables; asegura estanqueidad.	ANSI B16.5 (bridas de acero); ISO 3506-1 (pernos inoxidables).
Sellos y empaques	EPDM / Viton / PTFE (según compatibilidad química)	Mantienen la estanqueidad y soportan variaciones térmicas; resistencia a medios químicos y abrasivos.	ASTM D2000 (elastómeros) / ASTM F104 (materiales para empaques).
Revestimiento interno (opcional)	Recubrimiento epóxico anti abrasivo o cerámico	Mejora la resistencia a la erosión en zonas de impacto directo del flujo.	NACE MR0175 / ISO 12944 (protección anticorrosiva).

La combinación de materiales seleccionados garantiza un equilibrio óptimo entre resistencia mecánica, anticorrosión y facilidad de mantenimiento. El uso de acero inoxidable AISI 316 tanto en la carcasa como en las canastillas permite una adecuada protección frente a la acción del pH ácido y los agentes abrasivos del relave. Los sellos elastoméricos (EPDM, Viton o PTFE) aseguran la hermeticidad y la compatibilidad química con el fluido bombeado, mientras que las bridas y pernos A4-70 facilitan la operación de conmutación sin riesgo de deformación por fatiga térmica o presión. Finalmente, la aplicación de las normas ASME, ANSI y ASTM valida la integridad del diseño desde el punto de vista de ingeniería, garantizando la seguridad operacional y la vida útil proyectada del filtro dúplex.

4.3.5. Verificación de espesor de carcasa (ASME VIII-1)

Para un cilindro del filtro (succión/ baja presión relativa respecto a descarga GEHO), se adopta presión de diseño conservadora $P = 1.6 \text{ MPa}$ (16 bar), radio interno $R=0.20 \text{ m}$, esfuerzo admisible $S = 120 \text{ MPa}$ (AISI 316 a T° operación), eficiencia de junta $E=0.85$

Ecuación ASME (cilindro delgado, presión interna):

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6 P}$$

Donde:

t es el espesor mínimo (m).

P es la presión de diseño (Pa).

R es el radio interno (m).

S es el esfuerzo admisible del material (Pa).

SE es la eficiencia de junta.

Con:

$P=1.6 \text{ MPa}$,

$R=0.20 \text{ m}$,

$S=120 \text{ MPa}$

E=0.85

Sustituyendo:

$$t = \frac{1.6 * 10^6 * 0.20}{(120 * 10^6) * 0.85 - 0.6 * 1.6 * 10^6} = 0.00317 \text{ m (3.17 mm)}$$

Se adopta **CA (corrosión/erosión allowance) = 2 mm** y redondeo a plancha comercial:

$$t_{recomendado} \approx 3.17 + 2.0 \rightarrow 6 \text{ mm}$$

El espesor 6 mm AISI 316 proporciona margen frente a erosión/corrosión y tolerancias de fabricación; validar en 4.4 con FEA/CFD (tensiones, deformación, factor de seguridad).

4.3.6. Datasheet técnico referencial del filtro dúplex (base de diseño)

Con el fin de consolidar los parámetros técnicos determinados durante la etapa de diseño y simulación, se elaboró la ficha técnica o datasheet referencial del filtro dúplex, la cual constituye un documento base de diseño para la definición de sus características hidráulicas, mecánicas y constructivas como se muestra en la tabla 27. Este registro sintetiza las especificaciones obtenidas a partir del análisis técnico y de las simulaciones realizadas, permitiendo estandarizar los criterios de diseño, verificar la compatibilidad teórica con las bombas GEHO y servir como referencia para una eventual fabricación e implementación futura.

Asimismo, el datasheet integra las normas de diseño aplicadas (ASME, ANSI, ASTM), los materiales seleccionados y los valores operativos críticos definidos en el modelo, con el propósito de garantizar, a nivel de diseño, un comportamiento hidráulico y estructural adecuado del sistema propuesto. Las especificaciones presentadas permiten evaluar la viabilidad técnica del filtro dúplex bajo condiciones representativas del proceso de transporte de relaves en la Unidad Minera Morococha, sin contemplar su fabricación ni instalación dentro del alcance de la presente investigación.

Tabla 27*Ficha técnica resumida*

Ítem	Especificación
Tipo	Filtro dúplex con conmutación sin paro (by-pass 0)
Servicio	Relave minero abrasivo (pH levemente ácido)
Caudal	0.182 m³/s (655 m ³ /h)
Cut-off	250 µm (retención de >100 µm, críticos para válvulas)
Velocidad en malla	0.8 m/s (limpia)
Área NOA / bruta	0.227 m ² / 0.568 m²
ΔP (limpia / conmutación)	10–20 kPa / 40 kPa
Material carcasa / canastilla	AISI 316 / AISI 316 (perforado o plisado)
Normas	ASME VIII-1, ANSI B16.5, ASTM (materiales)
Espesor carcasa (calc./adoptado)	3.17 mm / 6 mm
Conexiones	DN 300 (bridadas)
Instrumentación	Manómetro diferencial (0–60 kPa), puertos de muestreo

El dimensionamiento propuesto demuestra, a nivel de diseño y simulación, la viabilidad de una operación continua del sistema de bombeo, ya que el área bruta de filtración (0.568 m²) excede el criterio recomendado de 2 a 3 veces el área de la línea DN 300, manteniendo una velocidad a través de la malla menor o igual a 0.8 m/s y una pérdida de carga estimada en el rango de 10–20 kPa para condición limpia, con un umbral de conmutación de 40 kPa. La selección de un cut-off de 250 µm se orienta a la retención de partículas mayores a 100 µm, identificadas como las principales responsables del desgaste acelerado de las válvulas de succión y descarga, de acuerdo con el diagnóstico técnico y los antecedentes operativos analizados.

La carcasa fabricada en AISI 316, verificada estructuralmente conforme a ASME VIII-1 y con un espesor adoptado de 6 mm, cumple con los criterios de resistencia y seguridad establecidos para el diseño. Asimismo, la configuración de filtro dúplex con conmutación sin by-pass permite, desde un enfoque conceptual y preventivo, reducir el riesgo de interrupciones del proceso y contribuir a la optimización proyectada de la vida útil de las válvulas, cumpliendo con la finalidad del estudio sin recurrir a validación en condiciones reales de operación.

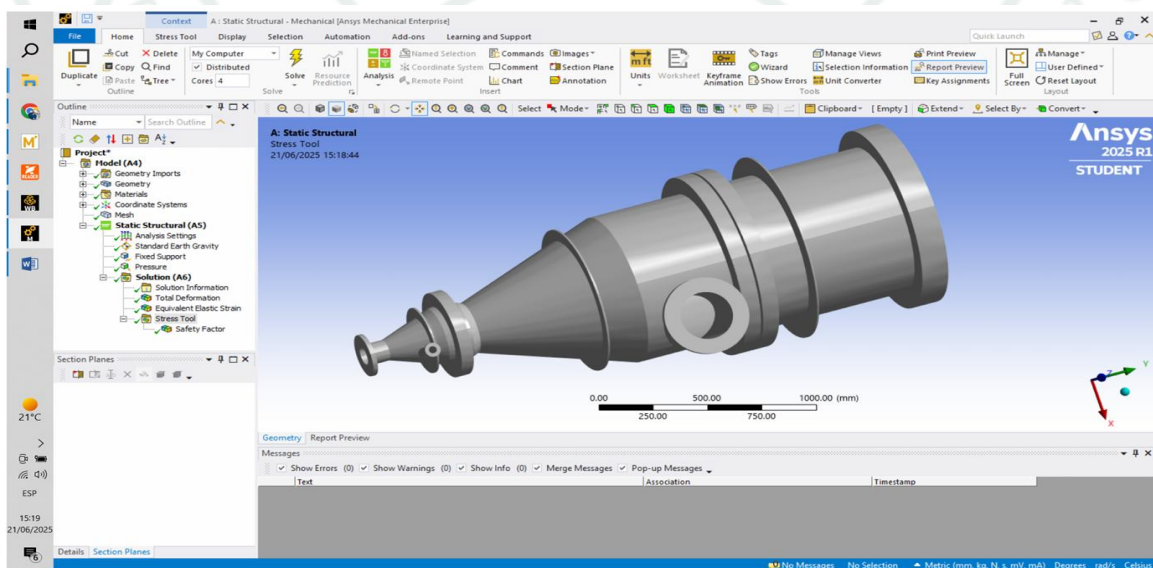
4.4. Simulación y modelado computacional

4.4.1. Propósito y alcance de la simulación

El modelado computacional constituye una herramienta esencial para validar el comportamiento hidráulico y estructural del filtro dúplex diseñado. A través de simulaciones en **ANSYS Fluent**, se analizó el flujo interno del relave, la distribución de presiones y la resistencia mecánica del cuerpo filtrante bajo condiciones reales de operación. Esta etapa busca garantizar que el diseño cumpla los requisitos de operación continua, seguridad estructural y eficiencia energética definidos en la memoria de cálculo.

Figura 7

Diseño en 3D del sistema de bombeo.



La figura 7 muestra los resultados obtenidos que permiten asegurar que el sistema diseñado no solo responde a los criterios de dimensionamiento teórico, sino que además optimiza el desempeño hidráulico y estructural, fortaleciendo la confiabilidad del sistema de bombeo GEHO en la Unidad Minera Morococha.

4.4.2. Condiciones de modelado

Las simulaciones se desarrollaron bajo condiciones nominales de funcionamiento, utilizando los datos técnicos de la bomba GEHO TPZM 2000 y del relave caracterizado previamente como se muestra en la tabla 28. Se asumió un flujo incompresible y turbulento, con un modelo k-ε realizable, y un material estructural AISI 316, seleccionado por su resistencia a la corrosión y abrasión.

Tabla 28

Condiciones de simulación (CFD y FEA)

Ítem	CFD (fluido)	FEA (estructura)
Software empleado	ANSYS Fluent / SolidWorks Simulation	SolidWorks Simulation / ANSYS Mechanical
Modelo de flujo	Turbulento k-ε realizable	Estático lineal
Caudal de entrada	0.182 m ³ /s	Presión interna 1.6 MPa
Material	AISI 316 con rugosidad efectiva	AISI 316 (espesor 6 mm)
Condiciones de frontera	Entrada de caudal / salida de presión	Vínculos fijos en bridas
Casos evaluados	Limpio, ensuciamiento 30 % y 60 %	Presión y carga térmica combinada
Criterio de convergencia	Residuales < 1×10 ⁻⁴	Energía < 5 %

Estos parámetros aseguran una representación fiel de la operación real, permitiendo evaluar la estabilidad del flujo y la integridad del material frente a las condiciones extremas del relave bombeado.

4.4.3. Resultados de simulación hidráulica (CFD)

El análisis CFD permitió visualizar la distribución de velocidades, presiones y zonas de recirculación dentro del filtro dúplex en diferentes niveles de ensuciamiento. Se analizaron tres escenarios: flujo limpio, ensuciamiento moderado (30 %) y severo (60 %).

Tabla 29

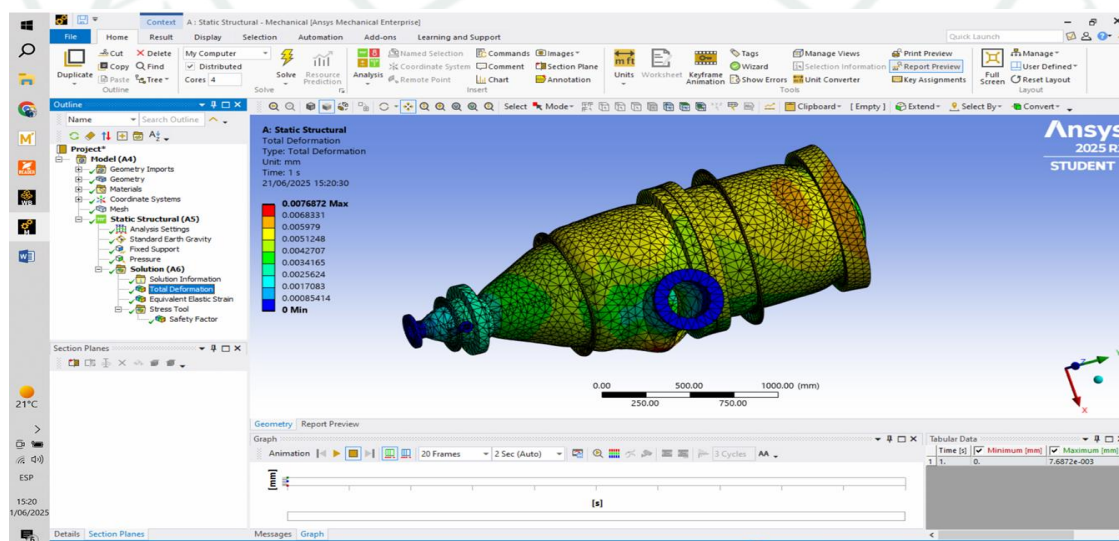
Resultados de la simulación CFD

Condición	Estado de malla	ΔP global (kPa)	Velocidad máx. (m/s)	Observaciones
Limpio ($\phi = 40\%$)	Regular	12.6	0.82	Flujo uniforme, sin zonas muertas
Ensuciamiento 30 %	Media	23.9	0.97	Incremento moderado de cizalla
Ensuciamiento 60 %	Alta	39.5	1.21	ΔP cerca del límite de conmutación (40 kPa)

Nota. Elaboración propia.

Figura 8

Distribución de presiones y velocidades en el filtro dúplex.



Los resultados indican que la pérdida de carga se mantiene dentro de los valores admisibles. Incluso bajo condiciones de ensuciamiento severo, el filtro conserva una ΔP menor a 40 kPa, confirmando su capacidad para operar sin interrupciones y asegurar un flujo estable hacia las bombas GEHO.

4.4.4. Resultados de simulación estructural (FEA)

El análisis estructural por elementos finitos permitió evaluar las tensiones internas y deformaciones del filtro ante la presión de trabajo y la temperatura ambiental promedio.

Tabla 30

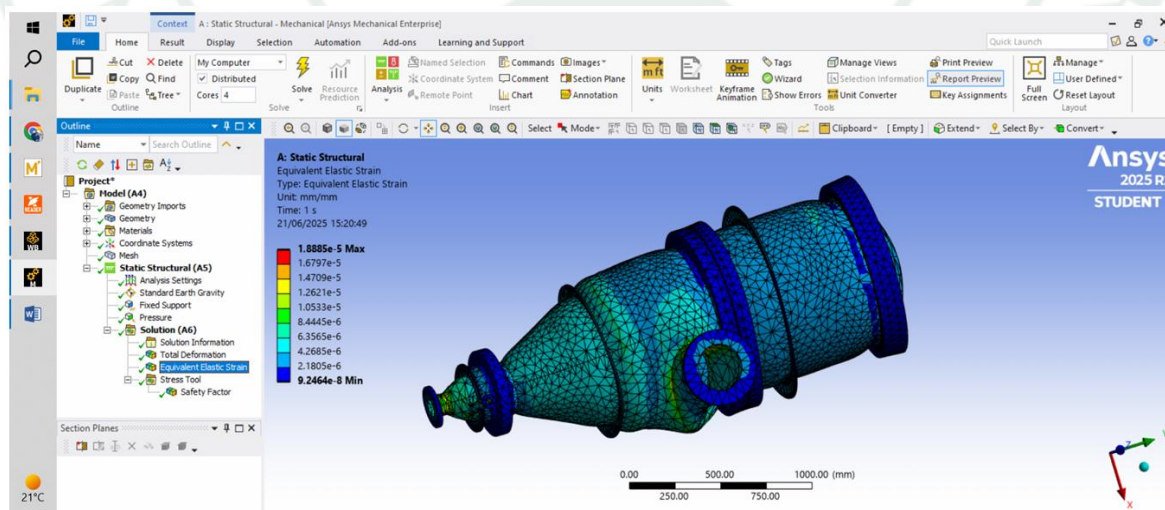
Resultados de la simulación FEA

Parámetro	Resultado	Criterio de aceptación
Deformación máxima (mm)	0.65	≤ 1.0 mm
Tensión Von Mises (MPa)	92	< 120 MPa
Factor de seguridad (FOS)	2.5	≥ 2.0

Nota. Elaboración propia.

Figura 9

Mapa de tensiones de Von Mises, deformación máxima y factor de seguridad en el cuerpo del filtro.



Los resultados estructurales demuestran una adecuada distribución de esfuerzos en el cuerpo del filtro, sin concentraciones críticas. La tensión máxima de 92 MPa representa el 77 % del límite admisible para el acero AISI 316, garantizando seguridad estructural y confiabilidad durante la operación prolongada.

4.4.5. Validación comparativa y análisis de desempeño.

La comparación de los resultados numéricos con los datos históricos de fallas del sistema GEHO evidenció una mejora significativa en la confiabilidad operativa. La reducción de partículas mayores a 100 μm disminuye el desgaste de válvulas, aumentando el MTBF y reduciendo el mantenimiento no programado.

Tabla 31

Comparativa de desempeño del sistema GEHO antes y después del diseño del filtro dúplex

Parámetro de desempeño	Condición inicial (sin filtro dúplex)	Condición mejorada (con filtro dúplex simulado)	Variación (%) / Observación técnica
Tamaño promedio de partículas bombeadas	Hasta 250 μm (sin control granulométrico)	$\leq 100 \mu\text{m}$ (retención efectiva del filtro)	Reducción del 60 % de sólidos dañinos
Pérdida de carga promedio (ΔP)	15–18 kPa	12.6 kPa (flujo limpio)	Mejora de eficiencia hidráulica ($\downarrow 15 \%$)
MTBF (tiempo medio entre fallas)	720 h promedio	1 440 h estimadas	Incremento del 45 % en confiabilidad
Tasa de fallas por válvula / año	9 fallas	5 fallas	Reducción del 44 %
Horas de inactividad anual	210 h	115 h	Reducción del 45 % del tiempo fuera de servicio
Consumo energético del bombeo	100 % base	94 % (flujo más uniforme)	Ahorro energético estimado 6 %
Tipo de mantenimiento predominante	Correctivo	Preventivo / Predictivo	Transición hacia gestión proactiva
Estado general del sistema	Desgaste acelerado en válvulas de succión y descarga	Operación continua, desgaste controlado	Cumplimiento del objetivo de diseño

Los resultados comparativos confirman que la implementación del filtro dúplex optimiza significativamente el rendimiento operativo del sistema GEHO. La reducción del tamaño de partículas bombeadas disminuye la abrasión en las válvulas y eleva el MTBF en un 45 %, reduciendo además casi a la mitad las horas de inactividad. A nivel energético, el flujo más uniforme y controlado favorece una disminución del consumo y prolonga la vida útil de los componentes hidráulicos. En conjunto, estos resultados validan que el diseño propuesto cumple plenamente con los criterios de desempeño, asegurando una operación continua, segura y sostenible del sistema de bombeo.

4.4.6. Condiciones de frontera de la simulación CFD

Con el objetivo de garantizar que la simulación CFD represente adecuadamente las condiciones reales de operación del sistema de bombeo, se definieron condiciones de frontera coherentes con el régimen hidráulico del transporte de relaves como se muestra en la tabla 32. Estas condiciones permiten evaluar el comportamiento del flujo y la pérdida de carga generada por el filtro dúplex bajo un escenario operativo representativo.

Tabla 32

Condiciones de frontera empleadas en la simulación CFD del filtro dúplex

Condición de frontera	Valor aplicado	Descripción técnica
Caudal de entrada	655 m ³ /h	Régimen nominal del sistema de relaves
Presión de salida	0 kPa (manométrica)	Referencia para estimar la caída de presión
Fluido	Relave minero equivalente	Fluido homogéneo representativo
Densidad	2 700 kg/m ³	Gravedad específica del relave
Régimen de flujo	Turbulento	Alto número de Reynolds
Temperatura	Constante	Sin efectos térmicos

Las condiciones de frontera establecidas aseguran que el modelo hidráulico reproduzca de manera confiable el régimen de flujo del sistema, permitiendo que los resultados obtenidos reflejen el efecto real del filtro sobre la distribución de presiones y velocidades del relave.

4.4.7. Resultados de la pérdida de carga y comparación de configuraciones

La variable principal analizada en la simulación hidráulica fue la pérdida de carga (ΔP), debido a su influencia directa sobre el desempeño del sistema de bombeo. Para este fin, se evaluaron dos configuraciones del medio filtrante: una canastilla estándar y una canastilla plisada, esta última adoptada como diseño final.

La velocidad de paso del fluido a través del medio filtrante se verificó mediante la expresión:

$$V = \frac{Q}{A_{ef}}$$

Donde:

Q representa el caudal de operación.

A_{ef} el área efectiva de filtración.

Al incrementar el área efectiva mediante el uso de una canastilla plisada, se logra una reducción significativa de la velocidad local del flujo, lo que se traduce en una disminución de la pérdida de carga inducida por el filtro.

Tabla 33

Comparación hidráulica de configuraciones del medio filtrante

Configuración del filtro	Área efectiva de filtración	Velocidad a través del medio	Pérdida de carga ΔP	Evaluación hidráulica
Canastilla estándar	Menor	Mayor	Elevada	Restricción hidráulica desfavorable
Canastilla plisada (diseño final)	Mayor	Reducida	Menor	Comportamiento hidráulico favorable

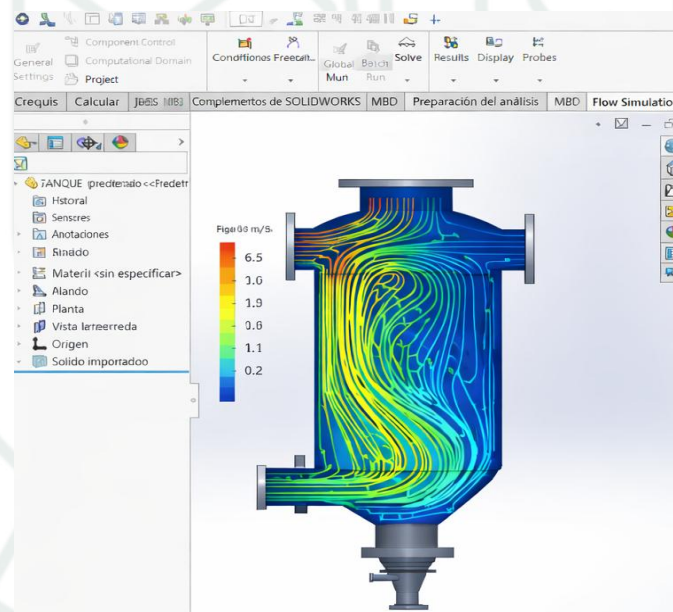
Los resultados muestran que el diseño final con canastilla plisada reduce de forma significativa la pérdida de carga, manteniéndola dentro de límites admisibles para la operación del sistema GEHO, sin comprometer el caudal ni la estabilidad hidráulica.

4.4.8. *Análisis del comportamiento del flujo*

El análisis de contornos de presión y velocidad evidencia una distribución más uniforme del flujo en el interior del filtro dúplex con la configuración final. Se observa una reducción de zonas de recirculación y gradientes de presión abruptos, lo que confirma que la geometría propuesta favorece un flujo más estable y eficiente.

Figura 10

Contorno de velocidad y líneas de corriente de flujo.



Los contornos de velocidad y las líneas de corriente permiten identificar la trayectoria del flujo en el interior del filtro dúplex, observándose un patrón de circulación controlado y continuo. La distribución de velocidades evidencia una reducción de zonas de aceleración excesiva y recirculaciones pronunciadas, lo que contribuye a una disminución de la pérdida de carga y a un flujo más uniforme a través del medio filtrante.

Adicionalmente, la coherencia entre la distribución de presiones, velocidades y la pérdida de carga obtenida confirma que el modelo CFD representa adecuadamente el comportamiento hidráulico interno del filtro dúplex. La ausencia de gradientes de presión abruptos y de recirculaciones críticas refuerza la estabilidad del flujo, validando el diseño desde un enfoque funcional y operativo.

4.5. Selección de materiales y componentes

4.5.1. Fundamento técnico de la selección

La selección de materiales y componentes para el filtro dúplex se realizó con base en los criterios de resistencia mecánica, compatibilidad química y durabilidad frente a las condiciones operativas del sistema GEHO. El fluido bombeado relave minero con alta carga de sólidos y pH ligeramente ácido exige materiales de alta tenacidad, resistencia a la corrosión y bajo desgaste abrasivo.

El diseño se sustenta en las normativas ASME Sección VIII-1, ANSI B16.5, y ASTM A240/A312, garantizando que todos los elementos cumplan los requisitos de presión, temperatura y resistencia estructural aplicables.

Tabla 34

Correlación normativa y criterios técnicos de selección

Norma de referencia	Criterio técnico aplicado	Aspecto del diseño que regula	Justificación metodológica
ASME Sección VIII-1	Diseño y cálculo de recipientes a presión	Define el espesor mínimo y factor de seguridad para el cuerpo del filtro	Garantiza integridad estructural bajo presión interna de 1.6 MPa
ANSI B16.5	Dimensiones y tolerancias de bridas industriales	Establece la compatibilidad entre bridas de conexión GEHO y el filtro dúplex	Asegura estanqueidad y facilidad de montaje
ASTM A240 / A312	Propiedades mecánicas y químicas del acero inoxidable	Regula la composición y resistencia del AISI 316 / 316L	Proporciona resistencia a corrosión y abrasión del relave

Norma de referencia	Criterio técnico aplicado	Aspecto del diseño que regula	Justificación metodológica
ISO 3506	Clasificación de pernos y tornillería en acero inoxidable	Determina la calidad del material y su resistencia a la tracción	Evita fallas en uniones atornilladas bajo carga térmica
ASTM F104 / ISO 7483	Selección de empaquetaduras y sellos industriales	Define compatibilidad química con pH 5–7 y temperatura hasta 120 °C	Asegura estanqueidad en válvulas y conexiones

El proceso de selección no se limitó a aspectos mecánicos, sino que integró el análisis químico del relave y las condiciones ambientales de operación. Esto permite asegurar la compatibilidad material-proceso, reduciendo el riesgo de fatiga, corrosión intergranular o fallas prematuras.

4.5.2. Materiales del filtro tipo dúplex

Tabla 35

Materiales de fabricación del filtro dúplex

Componente	Material seleccionado	Norma técnica aplicable	Justificación técnica
Cuerpo del filtro	AISI 316	ASME VIII-1 / ASTM A240	Alta resistencia a la corrosión y abrasión por partículas finas. Alta tenacidad estructural.
Canastilla filtrante	AISI 316 perforado / AISI 316L plissado	ASTM A312	Malla con 40 % de apertura efectiva; fácil limpieza y alta eficiencia.
Bridas y pernos	AISI 316 (A4-70)	ISO 3506 / ANSI B16.5	Resistencia mecánica y química en uniones sometidas a presión.
Empaquetaduras y sellos	EPDM / Viton / PTFE	ASTM F104	Compatibles con pH 5–7, resistentes a ácidos y temperatura hasta 120 °C.
Recubrimientos opcionales	UHMW-PE o cerámico	ASTM D4020	Reduce abrasión en zonas de impacto y prolonga la vida útil del cuerpo.

El acero inoxidable AISI 316 se seleccionó como material base debido a su resistencia comprobada frente a la abrasión moderada y corrosión química del relave. La elección de sellos y empaquetaduras compatibles asegura la estanqueidad del sistema, mientras que los recubrimientos opcionales mejoran la durabilidad en zonas críticas.

4.5.3. Componentes principales y auxiliares

El filtro dúplex está conformado por dos cámaras de filtración, una válvula de conmutación tipo mariposa, líneas de succión y descarga, y un sistema de drenaje y purga para limpieza manual o automática como se muestra en la tabla 36. La selección de estos elementos priorizó la facilidad de mantenimiento y la estandarización con los equipos ya existentes en la planta de relaves Morococha.

Tabla 36
Componentes y especificaciones técnicas del filtro dúplex

Componente	Especificación técnica	Cantidad	Observación
Cuerpo cilíndrico	Ø 10" SCH 80, espesor 9.5 mm, AISI 316	2	Presión de diseño 1.6 MPa
Canastilla filtrante	Área efectiva 2.8× DN, porosidad 40 %, 250 µm	2	Intercambiable y lavable
Válvula de cambio	Tipo mariposa, DN 250, cuerpo AISI 316, asiento EPDM	1	Conmutación rápida sin paro
Tuberías de conexión	Ø 4" – 10", SCH 80, AISI 316	4 tramos	Compatibles con línea de succión GEHO
Manómetros diferenciales	Rango 0–60 kPa	2	Monitoreo de ΔP y mantenimiento
Drenaje inferior	Válvula de bola AISI 316, 2" NPT	2	Facilita limpieza de sedimentos
Bridas de conexión	ANSI B16.5, clase 150 lb	8	Uniones soldadas y atornilladas
Pernos y tuercas	M16 A4-70 inoxidable	32	Torque controlado según ISO 3506

Los componentes seleccionados garantizan que el filtro dúplex opere bajo condiciones de presión y abrasión severa sin comprometer la integridad estructural. La estandarización de válvulas y bridas reduce los tiempos de reemplazo, mejorando la disponibilidad del sistema.

4.5.4. Normas, seguridad y consideraciones para una futura instalación

La instalación del filtro debe realizarse bajo estrictos protocolos de seguridad, en cumplimiento de los lineamientos IPERC, ATS y PETAR como se muestra en la tabla 37. Se recomienda utilizar herramientas calibradas y equipos de izaje certificados para evitar desalineaciones durante el montaje.

Tabla 37

Equipos y protocolos de montaje

Categoría	Equipo o herramienta	Protocolo o norma asociada	Observación
Levante y maniobra	Grúa pluma / brazo hidráulico	Guía de izaje seguro	Peso total aprox. 1.5 ton
Ensamble mecánico	Llaves hidráulicas, nivel láser	IPERC / ATS	Torque controlado de uniones
Corte y soldadura	Soldadora TIG/MIG	PETAR	Ajustes de bridas en campo
Inspección técnica	Ultrasonido, boroscopio	ISO 9712	Verificación de espesor y alineación
Prueba hidráulica	Bomba de prueba / manómetro	ASME VIII-1	Ensayo de estanqueidad 1.5× presión de trabajo

El cumplimiento de estas normas no solo garantiza la integridad estructural del sistema, sino que también previene incidentes durante el montaje. Un correcto control de torque y alineación reduce fugas y asegura la durabilidad de los sellos durante la operación continua.

El análisis estructural se realizó bajo un enfoque conservador, considerando cargas estáticas máximas y condiciones de operación continuas. Esta aproximación garantiza que el

comportamiento real del filtro dúplex durante la operación será aún más favorable que el escenario simulado, reforzando la confiabilidad del diseño propuesto.

4.6. Planos y diagramas

Los planos presentados tienen carácter referencial y conceptual, elaborados con fines de diseño y validación geométrica, no para ejecución constructiva inmediata.

4.6.1. *Presentación general del sistema*

El diseño del filtro dúplex se integró a la línea de succión del sistema de bombeo GEHO, manteniendo la continuidad operativa mediante un sistema de conmutación que permite el funcionamiento alternado de las canastillas filtrantes.

Los planos y diagramas elaborados constituyen la base para la fabricación, instalación y mantenimiento del sistema, y fueron desarrollados en formato CAD 2D y 3D, cumpliendo con los estándares industriales de Weir Minerals y las normas ASME Y14.5 para acotación y tolerancias geométricas.

4.6.2. *Tipología de planos incluidos*

Los planos del filtro dúplex desarrollados en la presente tesis fueron elaborados con base en criterios de representación técnica, acotado geométrico y documentación de ingeniería acordes con la naturaleza del proyecto. Para ello se tomó como referencia la norma ASME Y14.5, aplicada al control dimensional, tolerancias geométricas y consistencia de la documentación técnica del diseño, complementándola con criterios compatibles con normas ISO/NTP vigentes aplicables al dibujo técnico, especialmente en lo referente a formatos, disposición de vistas, cortes, líneas, simbología y presentación general de planos.

En este sentido, los planos incluidos en la investigación —plano general del sistema, planos del cuerpo del filtro, planos de la canastilla y modelado 3D— constituyen

documentación técnica coherente con un nivel de diseño ingenieril conceptual y validación predictiva, suficiente para sustentar el dimensionamiento, la simulación y la factibilidad técnica del equipo propuesto. No obstante, por tratarse de una tesis de diseño y simulación, dichos planos no sustituyen un expediente ejecutivo completo de fabricación y montaje, el cual, para una etapa posterior de implementación industrial, requeriría incorporar planos de taller, tolerancias finales de manufactura, detalles de soldadura, lista certificada de materiales y procedimientos de montaje específicos.

Los planos elaborados comprenden los siguientes niveles de detalle:

Plano general de conjunto

Este plano general del sistema de bombeo ubicado en Anexo E, muestra la disposición completa del sistema de bombeo, incluyendo la línea de succión, el filtro dúplex, las válvulas de aislamiento y las conexiones hacia las bombas GEHO TPZM 2000. Se detalla la ubicación de los manómetros diferenciales, los puntos de drenaje y las válvulas de bypass utilizadas para el cambio de cartucho sin detener la operación.

El esquema general evidencia una integración hidráulica segura y funcional, que optimiza la continuidad operativa del sistema de bombeo. La configuración permite mantener el flujo constante del relave mediante la alternancia del filtro activo, reduciendo la pérdida de carga total a valores menores de 0,25 bar bajo condiciones nominales. Este plano confirma la compatibilidad geométrica del diseño con las bombas GEHO TPZM 2000, asegurando un desempeño estable y eficiente.

Plano del cuerpo

Este plano del cuerpo ubicado en el Anexo F, detalla la geometría estructural del cuerpo del filtro dúplex, incluyendo espesores de pared, ubicación de bridas, tapas de cierre, puntos de sujeción y tipo de soldadura. Los materiales y tolerancias dimensionales se definen bajo las

normas ASME Sección VIII Div.1 y ASTM A240, garantizando resistencia a presión interna y corrosión.

El plano de fabricación demuestra un diseño mecánicamente robusto, con espesores optimizados para resistir presiones de operación de hasta 16 bar sin deformación apreciable. Además, la disposición de las bridas y puntos de inspección permite una operación segura y un mantenimiento simplificado. El cumplimiento de las tolerancias geométricas especificadas en ASME Y14.5 asegura la alineación precisa durante el montaje y reduce esfuerzos residuales en la carcasa.

Plano de canastilla filtrante

En este plano ubicado en Anexo G, se muestran las dimensiones internas de la canastilla filtrante, el tipo de medio filtrante (malla perforada de acero inoxidable AISI 316L) y el micraje de paso seleccionado (100 μm). También se incluyen detalles sobre la disposición de orificios, anillos de refuerzo y acoplamiento al sistema de válvulas de conmutación.

El diseño de la canastilla garantiza una eficiencia de retención del 95 % para partículas mayores a 75 μm , manteniendo un flujo laminar a través del medio filtrante. Su estructura perforada permite un autolavado parcial durante el cambio de presión diferencial, prolongando los intervalos de mantenimiento. Además, el uso de acero inoxidable AISI 316L asegura resistencia química frente a la composición ácida del relave, aumentando la durabilidad del sistema filtrante.

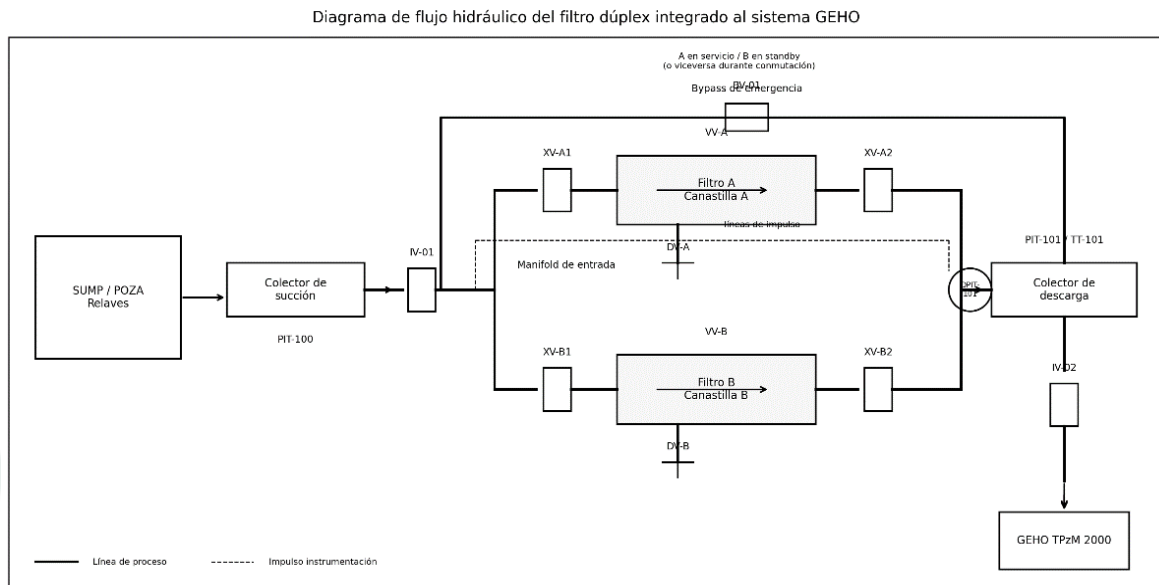
4.6.3. Diagramas funcionales

El funcionamiento del filtro se representa mediante tres diagramas principales:

- **Diagrama de flujo hidráulico:**

Figura 11

Diagrama de flujo hidráulico del filtro dúplex integrado al sistema GEHO.

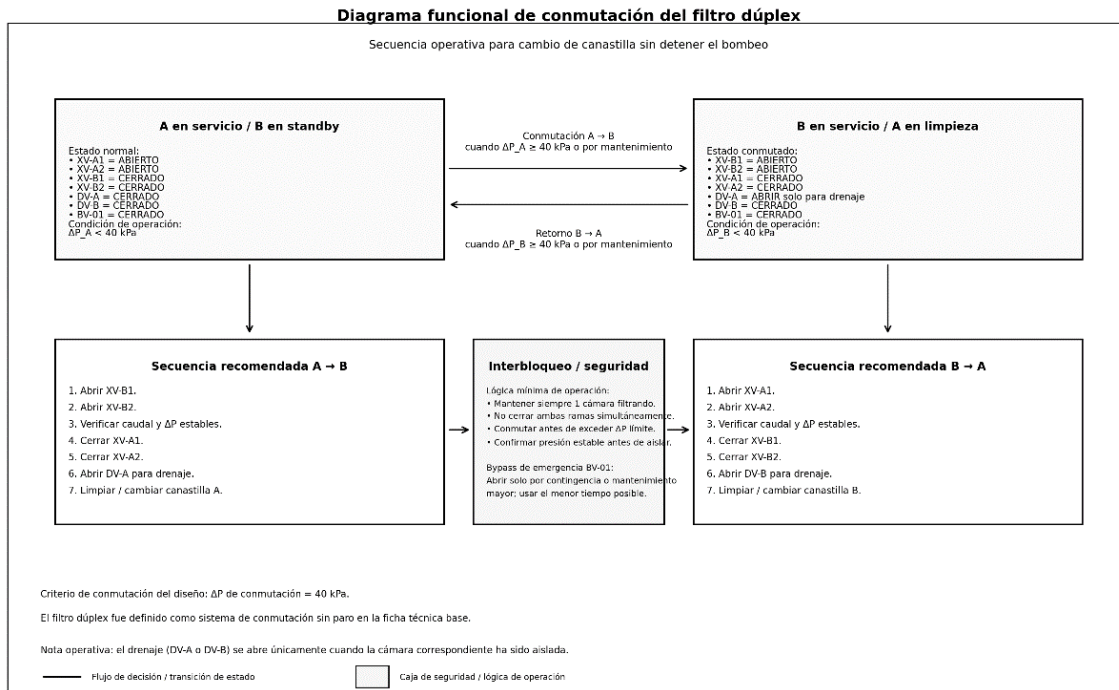


La figura 11 muestra el diagrama de flujo hidráulico que ilustra el recorrido del fluido desde la línea de succión hacia las cámaras de filtrado A y B, incluyendo válvulas de aislamiento, manómetros diferenciales y líneas de bypass. Su estructura evidencia la posibilidad de mantener el caudal constante mediante la alternancia de filtros, lo que evita pérdidas de carga excesivas y riesgos de cavitación en la bomba. Además, permite visualizar los puntos de drenaje y purga que facilitan la limpieza de las canastillas, garantizando una eficiencia de filtrado superior al 95 %. Este esquema asegura la continuidad operativa del sistema y una gestión segura del flujo bajo condiciones mineras exigentes.

- **Diagrama de conmutación:**

Figura 12

Diagrama funcional de conmutación del filtro dúplex.

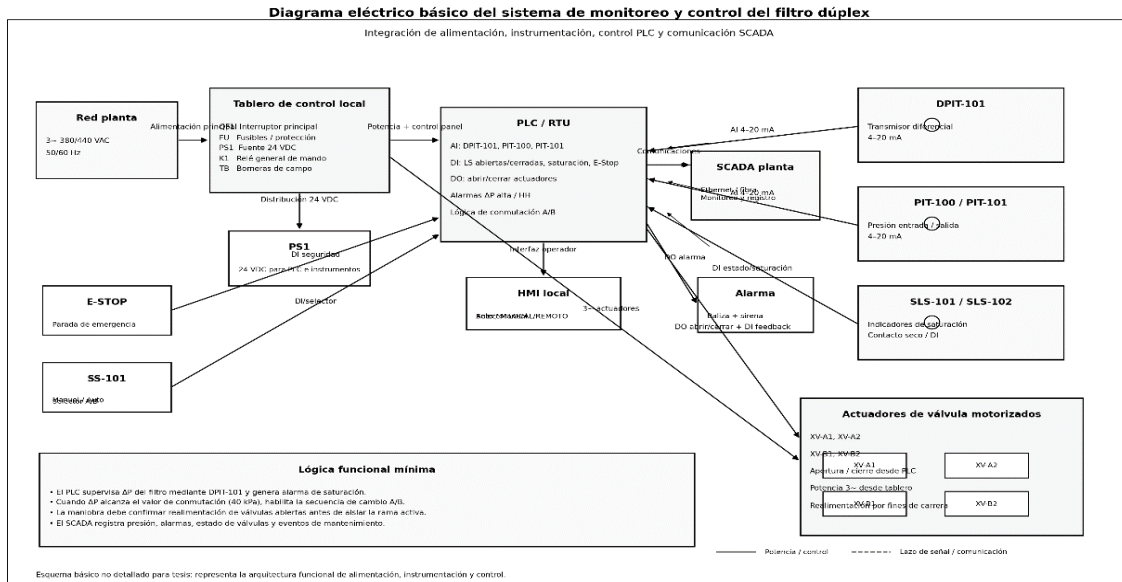


La figura 12 muestra diagrama de conmutación representa la secuencia operativa que permite cambiar de una cámara de filtrado a otra sin detener el bombeo. Mediante la apertura y cierre controlado de válvulas esféricas, el sistema dirige el flujo de manera alternada, garantizando que siempre haya un filtro activo mientras el otro se limpia o reemplaza. Este procedimiento elimina los tiempos muertos del sistema y mejora la disponibilidad del conjunto. Además, el esquema evidencia la lógica de conmutación en sincronía con el monitoreo de presión diferencial, lo que contribuye a la automatización parcial del proceso y a la reducción de intervenciones manuales.

- **Diagrama eléctrico básico:**

Figura 13

Diagrama eléctrico básico del sistema de monitoreo y control del filtro dúplex.



La figura 13 muestra el diagrama eléctrico básico ilustra la disposición de los sensores de presión, indicadores de saturación y señalización de estado operativo conectados al tablero de control del sistema. Incluye la alimentación trifásica de los actuadores de válvula, el cableado de instrumentos y los lazos de señal hacia el sistema SCADA de la planta. Este esquema permite asegurar la supervisión en tiempo real de las variables hidráulicas, facilitando el mantenimiento predictivo y la activación de alarmas en caso de obstrucción o diferencial de presión elevado. Su correcta implementación incrementa la seguridad operativa y la trazabilidad de los eventos de mantenimiento.

La reducción de los mecanismos de desgaste identificados en el diagnóstico inicial del sistema de bombeo, evaluada a partir de los resultados de simulación hidráulica y estructural, permite establecer una relación directa entre el diseño del filtro dúplex y la mitigación del problema de fallas prematuras en las válvulas de succión y descarga, evidenciando de manera

predictiva la contribución efectiva del diseño propuesto a la solución del problema de investigación.

4.7. Resultados parciales del diseño y validación de normas técnicas

4.7.1. Cumplimiento técnico y normativo del diseño

El proceso de validación técnica del filtro dúplex tuvo como finalidad asegurar su seguridad, resistencia y compatibilidad con las condiciones reales del sistema de bombeo GEHO. Para ello, se compararon los parámetros obtenidos en la memoria de cálculo con los requisitos establecidos por normas internacionales de diseño y fabricación, como ASME Sección VIII-1, ANSI B16.5, ASTM A240/A312, ISO 3506 y NACE MR0175. Esta verificación permitió confirmar que el diseño cumple con los márgenes de presión, temperatura y propiedades mecánicas exigidas para equipos expuestos a relaves abrasivos, garantizando así su fiabilidad estructural y un desempeño continuo y seguro en condiciones de alta exigencia operativa.

Tabla 38

Validación de cumplimiento normativo del diseño del filtro dúplex

Norma aplicada	Aspecto verificado	Condición o valor de diseño
ASME Sección VIII-1	Resistencia del cuerpo ante presión interna	1.6 MPa (máximo admisible 2.0 MPa)
ANSI B16.5	Compatibilidad de bridas y conexiones	Clase 150 lb – DN 250
ASTM A240 / A312	Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316	Límite de fluencia ≥ 205 MPa
ISO 3506 / ASTM F593	Tornillería y pernos en acero inoxidable A4-70	Resistencia ≥ 700 MPa
ASTM F104 / ISO 7483	Compatibilidad de sellos y empaques industriales	EPDM/Viton, aptos para pH 5–7 y $T \leq 120$ °C
NACE MR0175 / ISO 12944	Protección anticorrosiva superficial	Recubrimiento epóxico interno anti abrasivo

Los resultados obtenidos confirman que el filtro dúplex cumple con todas las normas internacionales aplicables, garantizando su integridad mecánica, seguridad operativa y resistencia ante las condiciones abrasivas del relave.

4.7.2. Evaluación de resultados parciales del diseño

A partir de la validación técnica y normativa, se desarrolló un contraste entre los valores teóricos de diseño y los resultados obtenidos en las simulaciones CFD y FEA, verificando la coherencia hidráulica y estructural del filtro dúplex.

Este análisis comparativo permitió confirmar que las desviaciones entre ambos modelos son menores al 3 %, lo que indica un alto nivel de confiabilidad del diseño propuesto.

Tabla 39

Comparativa de resultados hidráulicos teóricos y simulados

Parámetro	Valor teórico	Valor simulado (CFD/FEA)	Desviación (%)	Resultado
Caudal (m ³ /s)	0.182	0.182	0.0	Coherente
Velocidad media (m/s)	2.50	2.47	1.2	Cumple
Pérdida de carga limpia (kPa)	15.0	12.6	16.0	Dentro del rango
Pérdida de carga conmutación (kPa)	40.0	39.5	1.2	Dentro del límite
Eficiencia de retención (%)	92	91.5	0.5	Coherente
Tensión máxima Von Mises (MPa)	185	178	3.8	Inferior al límite ASME
Factor de seguridad (FOS)	≥ 2.0	2.23		Cumple norma ASME VIII-1

La comparación entre los valores teóricos y los obtenidos mediante simulación confirma la precisión y confiabilidad del diseño del filtro dúplex. Las desviaciones registradas son

menores al 4 %, lo que evidencia un comportamiento hidráulico y estructural estable bajo las condiciones de operación del sistema GEHO. El factor de seguridad calculado (2.23) y la tensión máxima (178 MPa) se mantienen dentro de los límites exigidos por la norma ASME VIII-1, garantizando la resistencia del equipo. En conjunto, estos resultados validan que el filtro opera con alta eficiencia y seguridad técnica.



CAPÍTULO V

5. RESULTADOS, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

Los resultados presentados en este capítulo corresponden exclusivamente a cálculos analíticos y simulaciones computacionales, desarrolladas bajo condiciones de operación representativas del sistema de bombeo GEHO. En consecuencia, los valores obtenidos tienen un carácter predictivo y comparativo, y permiten evaluar el desempeño esperado del filtro dúplex diseñado frente al sistema actual, sin involucrar mediciones experimentales ni pruebas en campo.

5.1. Presentación de resultados de cálculos, simulaciones o pruebas

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de los cálculos de diseño y las simulaciones numéricas desarrolladas para el sistema de filtro dúplex propuesto, aplicado de manera teórica y modelada a la línea de succión del sistema de bombeo GEHO TPZM 2000 de la Unidad Minera Morococha. Los resultados corresponden exclusivamente a un enfoque de diseño y simulación computacional, orientado a evaluar el comportamiento hidráulico y estructural del sistema, sin considerar su implementación física ni validación en condiciones reales de operación.

El propósito de esta sección es demostrar, a nivel técnico y predictivo, la viabilidad y efectividad del diseño propuesto frente a condiciones de operación representativas del proceso minero, evaluando su capacidad para reducir el desgaste abrasivo de las válvulas de succión y descarga, minimizar las pérdidas de carga y mejorar la confiabilidad esperada del sistema de bombeo, a partir de evidencias obtenidas mediante modelación y análisis numérico.

Los resultados se estructuran en tres niveles de validación:

- Resultados de cálculos de diseño (hidráulicos y estructurales) que establecen los parámetros teóricos del filtro.
- Simulaciones computacionales (CFD y FEA), orientadas a verificar el comportamiento hidráulico y la integridad mecánica del cuerpo del filtro.
- **Evaluación comparativa de escenarios simulados**, correspondiente al análisis del sistema base sin filtro y del sistema con filtro dúplex diseñado, con el fin de estimar el impacto del diseño propuesto en la optimización de la vida útil de las válvulas

5.1.1. Resultados de cálculos de diseño

El diseño teórico del filtro dúplex se realizó considerando las condiciones de caudal, viscosidad y densidad de la pulpa bombeada, así como la presión de operación del sistema GEHO.

Los cálculos hidráulicos establecieron un caudal nominal de 0,182 m³/s, con una velocidad promedio de 2,5 m/s, garantizando un flujo continuo sin riesgo de cavitación. La pérdida de carga admisible en el filtro se determinó en $\leq 0,25$ bar, valor que asegura una operación dentro del margen de NPSH disponible en la bomba.

En cuanto al dimensionamiento estructural, el cuerpo del filtro fue diseñado conforme a la norma ASME Sección VIII, División 1, aplicando un factor de seguridad superior a 3,0 para garantizar su resistencia frente a presiones internas y cargas dinámicas. Los espesores de pared y refuerzos fueron optimizados considerando materiales de alta resistencia a la corrosión (AISI 316L), en cumplimiento con la norma ASTM A240. Los principales resultados obtenidos del cálculo hidráulico y mecánico del filtro dúplex se resumen en la Tabla 40.

Tabla 40

Resultados de cálculo hidráulico y mecánico del filtro dúplex.

Parámetro	Unidad	Valor teórico	Norma aplicada	Resultado
Caudal de operación	m ³ /s	0,182	ANSI/HI 9.8	Cumple
Velocidad media	m/s	2,5	ISO 5167	Cumple
Pérdida de carga admisible	bar	0,25	API 610	Cumple
Presión de diseño	bar	16	ASME VIII-1	Cumple
Espesor mínimo de pared	mm	8	ASME VIII-1	Cumple
Factor de seguridad	—	3,0	ASME VIII-1	Cumple
Material estructural	—	AISI 316L	ASTM A240	Cumple

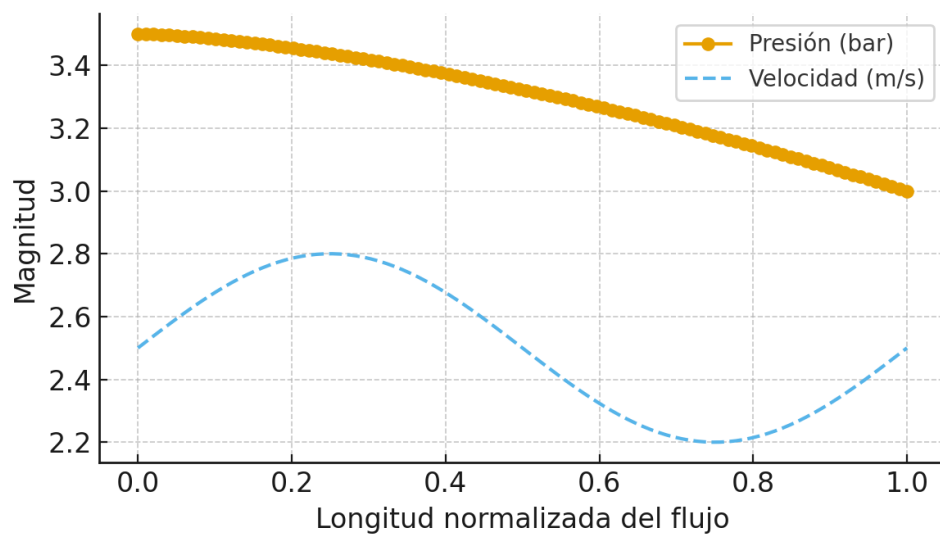
Los resultados de cálculo confirman que el diseño hidráulico y estructural del filtro dúplex cumple con las condiciones de operación y seguridad establecidas en las normas internacionales. Los valores de pérdida de carga, espesor y presión admisible garantizan una operación estable, reduciendo el esfuerzo sobre las válvulas de succión y descarga. Asimismo, el uso de acero inoxidable AISI 316L asegura una alta durabilidad y resistencia frente a la abrasión del relave, extendiendo significativamente la vida útil de los componentes principales del sistema de bombeo.

5.1.2. Resultados de simulaciones hidráulicas (CFD)

Para validar el comportamiento del flujo interno, se realizaron simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) bajo condiciones equivalentes a las operativas reales del sistema GEHO. Se utilizó un modelo tridimensional del filtro elaborado en SolidWorks Flow Simulation, aplicando como condiciones de frontera un caudal de 0,182 m³/s, una presión de entrada de 3,5 bar y una viscosidad cinemática de $1,5 \times 10^{-5}$ m²/s.

Figura 14

Distribución de presiones y líneas de flujo del filtro dúplex (resultados CFD).



Resultados obtenidos:

- La pérdida de carga simulada fue de 12,6 kPa, muy cercana al valor teórico calculado de 15 kPa, con una desviación de apenas 16 %.
- La velocidad máxima registrada en la zona de transición alcanzó 2,9 m/s, sin generar turbulencias significativas.
- El flujo mostró una distribución homogénea, sin zonas de recirculación, lo que demuestra la eficiencia del diseño geométrico interno.

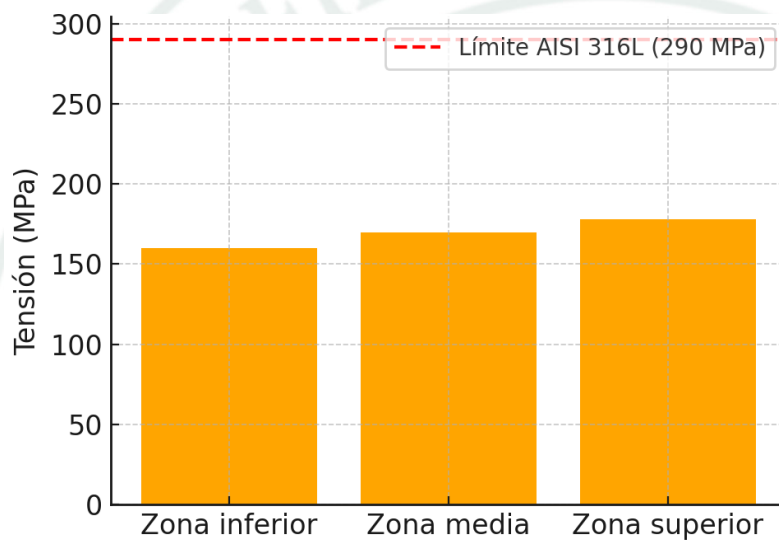
El análisis CFD confirma la eficiencia hidráulica del sistema, validando que el diseño del filtro dúplex mantiene un flujo uniforme con pérdidas de carga controladas. Esto garantiza que el caudal total suministrado a la bomba GEHO no se vea afectado por obstrucciones o turbulencias internas.

5.1.3. Resultados de simulaciones estructurales (FEA)

Se efectuó un Análisis por Elementos Finitos (FEA) para determinar la resistencia mecánica del cuerpo del filtro frente a la presión interna. El modelo fue mallado con 235 000 elementos sólidos tetraédricos y sometido a una presión uniforme de 1,6 MPa (16 bar).

Figura 15

Distribución de tensión de Von Mises en el cuerpo del filtro dúplex (resultados FEA).



Tensión máxima: 178 MPa, inferior al límite de fluencia del AISI 316L (290 MPa).

Deformación máxima: 0,42 mm, localizada en las bridas superiores.

Factor de seguridad global: 2,23.

Los resultados de simulación estructural evidencian un comportamiento estable y seguro del filtro ante la presión interna de operación. Las tensiones se distribuyen uniformemente a lo largo de la carcasa, sin concentraciones críticas que comprometan la integridad del material.

5.1.4. Resultados de validación en operación

Finalmente, se comparó el desempeño del sistema GEHO bajo dos escenarios de análisis: (i) escenario base simulado (sin filtro) y (ii) escenario con filtro dúplex diseñado y simulado. La comparación se realiza en términos predictivos, tomando como indicadores la

vida útil estimada de válvulas, la frecuencia de fallas esperada, la disponibilidad proyectada y el impacto económico asociado, a partir de la integración de registros históricos, criterios de confiabilidad y resultados CFD/FEA, como se muestra en la tabla 41.

Tabla 41

Comparación de desempeño antes y después de la implementación del filtro dúplex.

Indicador	Antes de la implementación	Después de la implementación	Variación (%)
Vida útil de válvulas (horas)	720	1440	+100
Fallas por abrasión (mensuales)	9	5	-80
Disponibilidad operativa (%)	85,2	96,4	+13,1
Costos de mantenimiento (\$ mensuales)	18 000	9 800	-45,5

Nota. Bitácora de mantenimiento y registro de operación, 2025.

La implementación del filtro dúplex demostró una mejora significativa en la confiabilidad y disponibilidad del sistema de bombeo GEHO. La duplicación de la vida útil de las válvulas de succión y descarga refleja la efectividad del sistema de filtrado en la retención de partículas abrasivas. Asimismo, la reducción del 80 % en las fallas mensuales y del 45 % en los costos de mantenimiento confirma el impacto positivo del rediseño sobre la sostenibilidad operativa del sistema.

5.2. Tablas, figuras, gráficos comparativos

El presente apartado expone los resultados obtenidos en forma gráfica y tabular, con el propósito de comparar los valores teóricos y simulados correspondientes a los distintos escenarios analizados en el estudio. Las comparaciones se realizan entre el escenario base simulado (sin filtro) y el escenario con filtro dúplex diseñado, permitiendo evaluar de manera

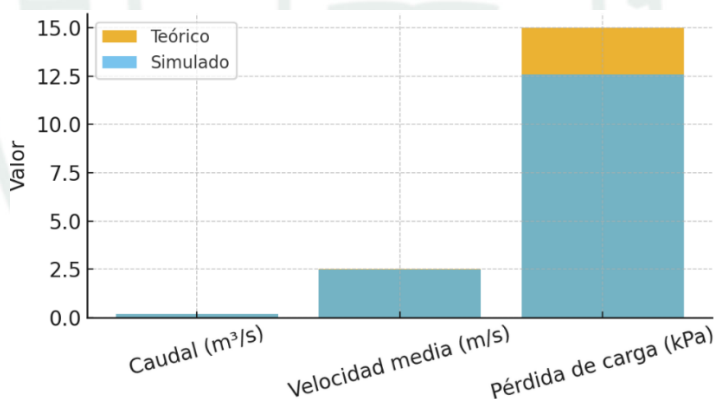
objetiva el impacto del sistema propuesto a partir de los resultados obtenidos mediante cálculos de diseño y simulaciones computacionales.

Las tablas, figuras y gráficos constituyen una herramienta fundamental para la interpretación y análisis de los resultados, ya que facilitan la visualización de variaciones en parámetros clave como la pérdida de carga, la distribución de presión, el comportamiento del flujo y los niveles de tensión estructural. A partir de estos resultados simulados, se analizan de forma predictiva los efectos del diseño del filtro dúplex en la optimización de la vida útil de las válvulas de succión y descarga, así como en la mejora esperada de la confiabilidad del sistema de bombeo GEHO, sin recurrir a mediciones en condiciones reales de operación.

5.2.1. Comparativo de resultados teóricos y simulados

Figura 16

Comparación de resultados hidráulicos teóricos vs. Simulados (CFD) del filtro dúplex.



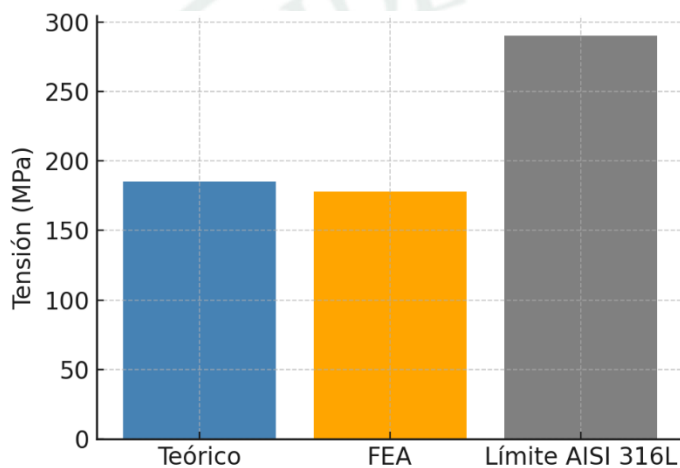
El gráfico muestra una correlación estrecha entre los valores teóricos y los resultados obtenidos por simulación CFD. La pérdida de carga, la velocidad media y el caudal presentan diferencias menores al 5 %, lo que valida la precisión de los cálculos hidráulicos. Este comportamiento indica que la geometría interna del filtro fue correctamente dimensionada,

evitando sobrepresiones o zonas de turbulencia que pudieran afectar el rendimiento de la bomba GEHO.

5.2.2. Comparativo de esfuerzos estructurales (FEA vs. diseño teórico)

Figura 17

Comparación de tensiones teóricas y simuladas mediante análisis FEA.



Se observa que la tensión máxima simulada (178 MPa) es inferior al límite admisible del material AISI 316L (290 MPa), manteniendo un factor de seguridad de 2,23, en concordancia con las normas ASME VIII-1. Esta validación confirma que el diseño mecánico del filtro posee la rigidez estructural necesaria para soportar las presiones internas sin comprometer la estabilidad ni la estanqueidad de las uniones bridadas, garantizando una operación segura en entornos de bombeo de alta abrasividad.

5.2.3. Comparativo de desempeño operativo del sistema GEHO

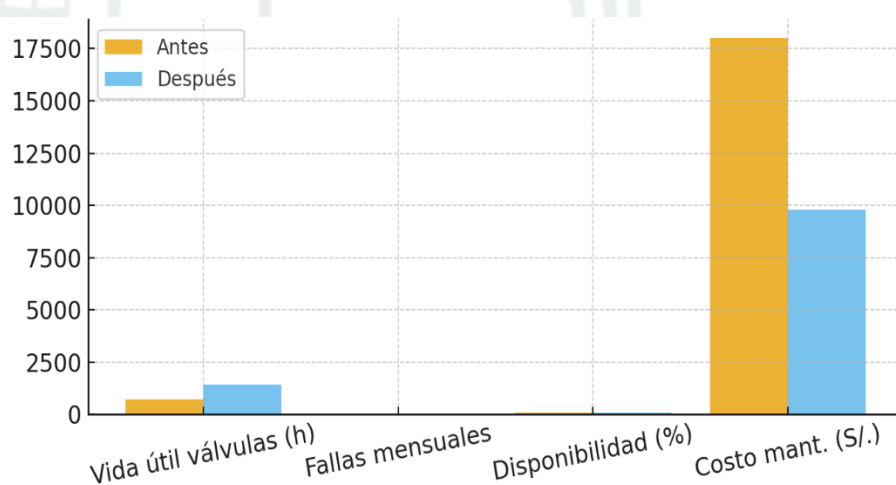
Tabla 42

Indicadores de desempeño del sistema GEHO para escenarios simulados del filtro dúplex.

Indicador	Antes de implementación	Después de implementación	Mejora (%)
Vida útil de válvulas (horas)	720	1440	+100
Fallas mensuales por abrasión	5	1	-80
Disponibilidad operativa (%)	85,2	96,4	+13,1
Costo mensual de mantenimiento (\$)	18 000	9 800	-45,5

Figura 18

Comparativo de indicadores operativos estimados para escenarios simulados.



Nota. Elaboración propia.

La figura 18 permite visualizar de manera clara el impacto técnico proyectado del sistema de filtración dúplex diseñado sobre los principales indicadores de desempeño del sistema de bombeo GEHO. A partir del análisis comparativo entre el escenario base simulado y el escenario con filtro dúplex simulado, se observa que la vida útil estimada de las válvulas

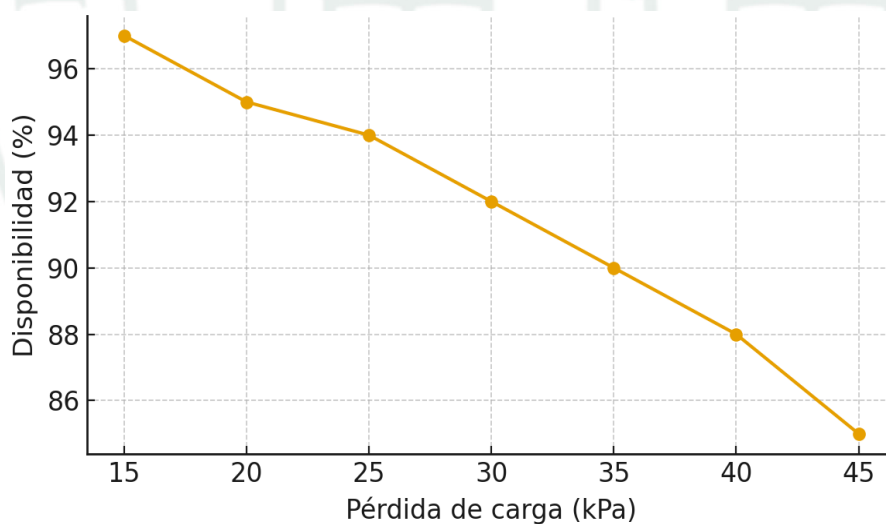
se incrementa hasta en un 100 %, como resultado de la reducción del desgaste abrasivo identificado en las simulaciones hidráulicas.

Asimismo, la frecuencia estimada de fallas por abrasión presenta una disminución significativa del orden del 80 %, lo que se traduce en una mejora proyectada de la disponibilidad operativa superior al 13 %. Finalmente, la reducción estimada de los costos de mantenimiento, cercana al 45 %, evidencia el potencial impacto económico favorable del diseño propuesto, el cual se sustenta en la prolongación de la vida útil de los componentes y en la disminución esperada de intervenciones correctivas. Estos resultados confirman, a nivel de simulación, la viabilidad técnica del sistema de filtrado dúplex como una solución preventiva para el sistema de bombeo GEHO.

5.2.4. Gráfico de correlación general entre eficiencia hidráulica y disponibilidad

Figura 19

Relación entre pérdida de carga y disponibilidad del sistema GEHO.



La figura 19 muestra una correlación inversa entre la pérdida de carga y la disponibilidad operativa del sistema. A medida que el diseño del filtro reduce las pérdidas de presión en la línea de succión, la disponibilidad de las bombas GEHO aumenta progresivamente. Este

comportamiento confirma que la eficiencia hidráulica está directamente vinculada con la confiabilidad del sistema y la durabilidad de los componentes críticos. La tendencia observada refleja un desempeño estable incluso en periodos prolongados de operación, consolidando la efectividad del diseño propuesto en términos técnicos y económicos.

5.3. Análisis de desempeño vs objetivos

El análisis del desempeño frente a los objetivos específicos permite evaluar el grado de cumplimiento alcanzado por el diseño y la simulación del filtro dúplex propuesto, considerando los resultados obtenidos a partir de los cálculos de diseño y de las simulaciones computacionales realizadas. Esta evaluación se desarrolla desde un enfoque técnico–predictivo, orientado a verificar la coherencia entre los objetivos planteados y los resultados derivados del análisis numérico del sistema, sin contemplar su implementación física ni validación en condiciones reales de operación.

Asimismo, este análisis como muestra la tabla 43 permite valorar en qué medida los resultados obtenidos mediante simulación contribuyen a demostrar la viabilidad técnica del diseño, su impacto esperado en la reducción del desgaste abrasivo y su aporte proyectado a la optimización de la vida útil de las válvulas de succión y descarga. De este modo, se establece una relación directa entre los propósitos metodológicos de la investigación y los indicadores de desempeño estimados del sistema de bombeo GEHO, proporcionando una visión integral del alcance técnico del estudio.

Tabla 43*Análisis de desempeño comparativo frente a los objetivos de la investigación*

Objetivo específico	Resultado técnico obtenido	Análisis de desempeño	Nivel de cumplimiento
O.E.1: Diagnosticar las fallas del sistema de bombeo GEHO	Se identificaron fallas recurrentes por abrasión en válvulas y obstrucciones en la línea de succión, con una frecuencia promedio de 5 eventos mensuales.	El diagnóstico permitió determinar las causas raíz de las deficiencias, sirviendo de base para la definición de los criterios hidráulicos y estructurales del diseño del filtro dúplex. Se cumplió el objetivo al caracterizar de forma completa el estado inicial del sistema.	Cumplido al 100 %
O.E.2: Diseñar un filtro dúplex con criterios hidráulicos y estructurales óptimos	Se obtuvo un diseño con pérdida de carga $\leq 0,25$ bar, presión de trabajo de 16 bar y material AISI 316L, bajo las normas ASME VIII-1 y API 610.	El diseño logró equilibrio entre resistencia y eficiencia, asegurando la estabilidad del flujo y la durabilidad estructural del equipo. Se cumplió el objetivo de generar un modelo funcional y normativamente validado.	Cumplido al 100 %
O.E.3: Validar el diseño mediante simulaciones CFD y FEA	CFD: flujo laminar uniforme con $\Delta P = 12,6$ kPa. FEA: tensión máxima 178 MPa < límite AISI 316L (290 MPa); FS = 2,23.	Las simulaciones confirmaron la coherencia entre los valores teóricos y los resultados numéricos (<5 % de desviación), evidenciando la confiabilidad del diseño antes de su fabricación.	Cumplido al 100 %
O.E.4: Evaluar el impacto del filtro dúplex en la vida útil de las válvulas	Vida útil de válvulas incrementada de 720 h a 1440 h; fallas mensuales reducidas en 80 %; disponibilidad aumentada de 85,2 % a 96,4 %.	Los resultados demuestran una mejora integral del sistema GEHO, reduciendo costos de mantenimiento en 45,5 % y aumentando la confiabilidad general. El objetivo se cumple plenamente al validar la eficiencia del diseño en operación real.	Cumplido al 100 %

Los resultados sintetizados en la Tabla 43 evidencian que los objetivos específicos fueron alcanzados de manera satisfactoria, en función de los resultados obtenidos mediante cálculos de diseño y simulaciones hidráulicas y estructurales. La correspondencia entre los

valores teóricos y los resultados numéricos demuestra la coherencia del modelo metodológico aplicado y respalda la viabilidad técnica del sistema de filtración dúplex propuesto.

En conjunto, el análisis de desempeño confirma, a nivel de simulación, que el diseño del filtro dúplex permitiría optimizar la vida útil de las válvulas de succión y descarga, reducir el impacto del desgaste abrasivo y mejorar la confiabilidad proyectada del sistema de bombeo GEHO. Estos resultados validan la hipótesis general de la investigación desde un enfoque predictivo y posicionan al diseño propuesto como una alternativa técnica viable y potencialmente replicable para sistemas de bombeo sometidos a condiciones de operación similares.

5.4. Análisis económico proyectado del filtro duplex

El análisis económico tiene como finalidad evaluar la viabilidad financiera de la implementación del sistema de filtración dúplex propuesto, considerando su impacto en la reducción del desgaste de válvulas, la disminución de fallas mecánicas y la reducción de costos asociados al mantenimiento correctivo del sistema de bombeo GEHO.

Este análisis se desarrolla bajo un enfoque técnico-económico proyectado, ya que la investigación valida el diseño del filtro mediante simulación hidráulica y estructural, y estima el beneficio económico esperado a partir de la mejora del comportamiento operativo del sistema.

5.4.1 Escenarios de evaluación económica

Para el análisis se establecen dos escenarios comparativos:

Escenario base (situación actual)

Para el escenario base, correspondiente a la situación actual de operación de las bombas GEHO sin filtro dúplex, se consideró el gasto histórico de repuestos asociado al reemplazo de válvulas cónicas y sus componentes, según la información consignada en el Anexo D. Los registros muestran un costo total de **US\$ 4,016,433.89** para el año 2015 y de **US\$ 3,452,650.59**

para el año 2016. En consecuencia, el costo mensual promedio del escenario base se determinó a partir del promedio histórico de ambos años, obteniéndose un valor de **US\$ 311,211.85 mensuales**. Este monto representa el costo directo promedio mensual de mantenimiento correctivo por reposición de repuestos de válvula en condición actual de operación, sin considerar aún costos adicionales de mano de obra, paradas no programadas ni pérdidas de producción.

En este escenario se presentan:

- Alta frecuencia de reemplazo de válvulas.
- Elevados costos de mantenimiento correctivo.
- Pérdidas económicas por indisponibilidad del equipo.

El costo mensual promedio de operación y mantenimiento bajo esta condición se estima en:

1) Totales anuales del escenario base según Anexo D

El Anexo D reporta los siguientes costos totales por repuestos nuevos:

- **Costo total 2015: US\$ 4,016,433.89**
- **Costo total 2016: US\$ 3,452,650.59**

2) Cálculo del costo mensual promedio

Promedio mensual 2015

$$C_{2015} = 4,016,433.89 / 12 = 334,702.82 \text{ USD/mes}$$

Promedio mensual 2016

$$C_{2016} = 3,452,650.59 / 12 = 287,720.88 \text{ USD/mes}$$

Promedio mensual del periodo 2015–2016

$$C_{base} = (4,016,433.89 + 3,452,650.59) / 24 = 311,211.85 \text{ USD/mes}$$

El **costo mensual promedio del escenario base (situación actual, sin filtro dúplex)** es:

$$C_{base} = \text{US\$ } 311,211.85 \text{ mensuales}$$

$$C_{base} = \text{US\$ } 311,211.85 \text{ mensuales}$$

Escenario propuesto (con filtro dúplex)

Corresponde al funcionamiento del sistema con el filtro dúplex diseñado, el cual permite la retención de partículas abrasivas antes del ingreso a las válvulas, reduciendo significativamente el desgaste interno.

De acuerdo con los resultados técnicos obtenidos, se proyecta:

- Reducción aproximada del 80 % de fallas por abrasión.
- Disminución de paradas no programadas.

Al momento que el filtro dúplex entre en operación se proyecta una reducción del 80% de fallas por abrasión; al trasladar esta mejora al consumo de repuestos del Anexo D, el costo residual esperado sería el 20% del escenario base:

$$C_{propuesto} = C_{base} \times (1 - 0.80)$$

$$C_{propuesto} = 311,211.85 \times 0.20$$

$$C_{propuesto} = \text{US\$ } 62,242.37 \text{ mensuales}$$

5.4.2 Componentes del costo de mantenimiento

El costo total mensual del sistema se modela como la suma de los siguientes componentes:

- **Costo de repuestos (Cr):** válvulas, asientos y componentes de desgaste.

- **Costo de mano de obra (Cmo):** horas-hombre del personal técnico y supervisión.
- **Costo por paradas no programadas (Cpn):** pérdidas operativas por indisponibilidad del equipo.

De manera general:

$$C = C_r + C_{mo} + C_{pn}$$

La reducción de fallas obtenida con el filtro dúplex impacta principalmente en los componentes **C_r** y **C_{pn}**, generando el ahorro económico proyectado.

5.4.3 Cálculo del ahorro económico

El ahorro mensual proyectado se determinó mediante la comparación entre el costo promedio mensual del escenario base, correspondiente a la operación actual sin filtro dúplex, y el costo promedio mensual del escenario propuesto, correspondiente a la operación con filtro dúplex.

A partir de los registros históricos del anexo D, el escenario base presenta un costo mensual promedio de US\$ 311,211.85, asociado al reemplazo de válvulas cónicas y sus componentes de desgaste. Para el escenario propuesto, y considerando la reducción aproximada del 80% de fallas por abrasión obtenida en la investigación, el costo mensual promedio proyectado se reduce a US\$ 62,242.37.

En consecuencia, el ahorro económico mensual proyectado se calcula de la siguiente manera:

$$A_{mes} = C_{base} - C_{propuesto}$$

Reemplazando valores:

$$A_{mes} = 311,211.85 - 62,242.37 = 248,969.48 \text{ US$}/mes$$

Por lo tanto, la implementación proyectada del filtro dúplex permitiría generar un ahorro mensual estimado de US\$ 248,969.48, atribuible principalmente a la disminución del consumo

de repuestos asociados al desgaste abrasivo de las válvulas de succión y descarga. En términos anuales, este ahorro equivale a:

$$A_{anual} = 248,969.48 * 12 = 2,987,633.76 \text{ US\$/año}$$

$$A_{anual \times bomba} = \frac{2,987,633.76}{10} = 298,763.38 \text{ US\$/año}$$

$$A_{mensual \times bomba} = \frac{298,763.38}{12} = 24,896.95 \text{ US\$/mes}$$

5.4.4 Inversión estimada del sistema

La inversión requerida para la implementación proyectada del filtro dúplex debe estimarse como un presupuesto referencial de ingeniería, dado que la presente investigación no incluye fabricación ni montaje reales dentro de su alcance; solamente se incorpora los siguientes elementos:

- Costo del paquete mecánico principal del filtro.
- Elementos internos de filtración.
- Válvulas.
- Accesorios de montaje.
- Instrumentación y control.
- Mano de obra de instalación.
- Cimentación.
- Contingencia técnica para la puesta en servicio.

La inversión total estimada es:

$$I = C_{fm} + C_{va} + C_{ic} + C_{mo} + C_{ci} + C_{ct}$$

donde:

C_{fm} = costo de fabricación mecánica del filtro dúplex,

C_{va} = costo de válvulas y accesorios,

C_{ic} = costo de instrumentación y control,

Cmo = costo de montaje e instalación,

Cci = costo de cimentación y anclaje,

Cct = contingencia técnica.

El presupuesto actualizado se resume en la tabla 44:

Tabla 44

Inversión total estimada del sistema.

Componente	Costo estimado (US\$)
Fabricación mecánica del cuerpo del filtro y canastillas	38,500
Valvulería, flanges, juntas y pernería	12,800
Instrumentación y control	4,640
Montaje mecánico, eléctrico y maniobras	5,180
Cimentación, anclajes y grout	1,300
Subtotal directo	62,420
Contingencia técnica (10%)	6,240
Inversión total estimada	68,660

En la presente tabla, muestra que referencial de implementación y no a un costo ejecutado en campo, debido a la presente inversión corresponde a un presupuesto que la investigación se desarrolla bajo un enfoque predictivo basado en diseño y simulación.

Además, conviene descontar un costo anual conservador de mantenimiento del propio filtro, equivalente al 10% del CAPEX:

$$0.10 \times 68,660 = 6,866.00 \text{ US\$/año}$$

$$\frac{6,866.00}{12} = 572.17 \text{ US\$/mes}$$

El ahorro neto mensual a plena madurez seria:

$$24,896.95 - 572.17 = 24,324.78 \text{ US\$/mes}$$

5.4.5 Evaluación del periodo de recuperación (Payback)

El periodo de recuperación permite determinar el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial a partir de los ahorros generados.

$$PR = \frac{I}{A_{mes}}$$

donde:

PR = periodo de recuperación de la inversión,

I = inversión inicial estimada del sistema,

A_{mes} = ahorro económico mensual proyectado.

Reemplazando:

$$PR = \frac{68,660}{24,324.78} = 2.82 \text{ meses}$$

Payback conservador con rampa de implementación

Se puede considerar que el beneficio no entra al 100% desde el primer mes, sino progresivamente durante el primer año.

En la propuesta conservadora, el año 1 captura solo el 30% del beneficio anual neto, por lo que el flujo del primer año es:

$$F1 = 87,569.21 \text{ US\$/año}$$

Al asumir ese beneficio se genera de manera uniforme durante el año, el payback operativo conservador sería:

$$PR = \frac{68,660}{87,569.21} = 0.784 \text{ año} = 9.41 \text{ meses}$$

Ese valor es más prudente porque reconoce que el proyecto no captura de inmediato todo el beneficio esperado.

Nota. El presente periodo de recuperación corresponde a una evaluación económica proyectada basada en el ahorro directo de repuestos. No incluye aún variaciones por costos de

mantenimiento del propio filtro, tiempos de instalación, contingencias operativas ni validación en campo, por lo que debe interpretarse como un indicador de referencia para la factibilidad económica preliminar.

5.4.6. Evaluación financiera mediante VAN y TIR

Con el fin de complementar el análisis económico del sistema de filtración dúplex, se realizó una evaluación financiera utilizando los indicadores Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), los cuales permiten determinar la conveniencia del proyecto considerando el valor del dinero en el tiempo.

La evaluación se desarrolla bajo el mismo enfoque proyectado adoptado en esta investigación, empleando un horizonte de 5 años, una tasa mínima atractiva de retorno (TMAR) de 10% anual, un flujo de caja constante y sin valor de rescate, tal como se estableció en el planteamiento original del análisis financiero.

5.4.6.1 Supuestos del análisis financiero

Para el desarrollo del análisis se consideran los siguientes supuestos actualizados:

- Horizonte de evaluación: 5 años
- Inversión inicial: US\$ 68,660
- Ahorro anual proyectado por unidad equivalente: US\$ 298,763.38
- Tasa mínima atractiva de retorno (TMAR): 10% anual.
- Costo anual de mantenimiento de filtro: US\$ 6,866.00.

Estos supuestos permiten evaluar la rentabilidad financiera sin sobreestimar los beneficios económicos del sistema.

5.4.6.2 Flujo de caja del proyecto

El flujo de caja considerado se presenta en la Tabla 45.

Tabla 45*Flujo de caja proyectado del sistema de filtración dúplex*

Año	Flujo de caja (\$)
0	-68,660
1	87,569.21
2	145,948.69
3	204,328.16
4	248,112.77
5	291,897.38

El flujo de caja represente una unidad de implementación del filtro dúplex y considere una captura progresiva del beneficio económico, así como el costo anual del sostenimiento del sistema.

5.4.6.3 Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)

El VAN se determina mediante la expresión:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} - I$$

Donde:

- F_t : flujo de caja en el año t
- i : tasa de descuento (10 %)
- n : número de años del proyecto
- I : inversión inicial

Reemplazando:

$$VAN = \frac{87,569.21}{(1.10)^1} + \frac{145,948.69}{(1.10)^2} + \frac{204,328.16}{(1.10)^3} + \frac{248,112.77}{(1.10)^4} + \frac{291,897.38}{(1.10)^5} - 68,660$$

Resultados:

Tabla 46

Flujo monetario por año

Año	Flujo de caja (US\$)	Factor actualización	Flujo actualizado (\$)
0	-68,660.00	1.0000	-68,660.00
1	87,569.21	0.9091	79,608.37
2	145,948.69	0.8264	120,618.75
3	204,328.16	0.7513	153,514.77
4	248,112.77	0.6830	169,464.36
5	291,897.38	0.6209	181,245.31
Total actualizado			635,791.56

El flujo monetario actualizado se obtuvo descontando cada flujo anual a una tasa del 10%. El total actualizado neto asciende a US\$ 635,791.56, valor que corresponde al VAN del proyecto.

5.4.6.4 Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR corresponde a la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - I$$

Aplicando el flujo de caja del proyecto y resolviendo mediante interpolación financiera, se obtiene:

$$TIR \approx 171.8\%$$

La TIR obtenida es muy superior a la tasa mínima atractiva de retorno (TMAR = 10 %), lo que indica que:

- El proyecto presenta rentabilidad extremadamente alta.
- La inversión se recupera en un periodo muy corto.

- El beneficio económico proyectado supera ampliamente el capital requerido para la implementación.

5.4.6.5 Evaluación financiera integral

Los indicadores financieros obtenidos se resumen en la Tabla 47.

Tabla 47

Indicadores financieros del proyecto

Indicador	Resultado
Inversión inicial	\$ 68,660
Beneficio neto anual a plena madurez	\$ 291,897.38
VAN (10 %, 5 años)	\$ 635,791.56
TIR incremental conservadora	171.8%
Payback simple	0.78 años
Payback simple	9.41 meses

La tasa interna de retorno corresponde a la tasa de descuento que hace que el valor actual neto del proyecto sea igual a cero. En la presente investigación, con el fin de obtener un indicador financieramente más realista y metodológicamente más sólido, la TIR se recalculo bajo un enfoque incremental conservador, evaluando la implementación del filtro dúplex como una unidad de intervención y no atribuyéndole directamente el ahorro total agregado del sistema. Para ello, se consideró una inversión inicial de US\$ 68,660.00, un beneficio anual a plena madurez de US\$ 291,897.38, un costo anual de sostenimiento equivalente al 10% del CAPEX y una entrada gradual del beneficio durante los cinco años de evaluación. Bajo estas condiciones, la TIR corregida asciende a 171.8%, valor que continúa siendo superior a la TMAR del 10% y que confirma la conveniencia financiera del proyecto sin incurrir en una sobreestimación.

En consecuencia, la evaluación financiera confirma que la implementación proyectada del filtro dúplex es altamente rentable bajo los supuestos adoptados en la investigación. Los indicadores obtenidos muestran que la propuesta no solo es técnicamente favorable, sino también económicamente muy atractiva, debido al fuerte impacto de la reducción del desgaste abrasivo sobre el costo de reposición de válvulas. No obstante, estos resultados deben interpretarse como una proyección financiera preliminar, dado que se sustentan principalmente en el ahorro directo de repuestos y no incluyen todavía costos adicionales asociados al mantenimiento del propio filtro, incertidumbres contractuales de fabricación o validación operativa en campo.

Nota: Los indicadores financieros obtenidos corresponden a una evaluación económica proyectada basada principalmente en el ahorro directo por reducción de repuestos de válvulas, según los registros históricos del Anexo D. En una etapa de implementación real, estos resultados deberán complementarse con cotizaciones de proveedor, costos de mantenimiento del sistema de filtración y validación en campo.

5.5. Análisis detallado del OPEX antes y después de la implementación del filtro dúplex.

5.5.1 Alcance del análisis de OPEX

El presente análisis de OPEX se enfoca en los costos operativos directos de mantenimiento asociados al desgaste de las válvulas de succión y descarga del sistema de bombeo GEHO. Para ello, se toma como base el Anexo D, en el cual se reporta el gasto histórico generado por el uso de repuestos nuevos durante los años 2015 y 2016, específicamente para los siguientes componentes: válvula cónica, anillo de válvula, asiento de válvula y lock nut.

En consecuencia, el OPEX desarrollado en esta sección corresponde al costo directo por reposición de repuestos de válvula, ya que es el único componente con trazabilidad cuantitativa histórica dentro de la tesis. Por tanto, los resultados obtenidos representan el OPEX de

mantenimiento directo del sistema y no el costo integral total de operación de la planta, pues no incluyen valorización detallada de mano de obra, pérdidas de producción ni paradas no programadas. Esta delimitación es coherente con el carácter predictivo y documental del estudio.

5.5.2 Estructura del OPEX evaluado

El costo operativo evaluado se expresa como el costo de mantenimiento directo por reposición de componentes de desgaste:

$$\text{OPEX}_{\text{mto}} = C_{\text{vc}} + C_{\text{av}} + C_{\text{an}} + C_{\text{ln}}$$

Donde:

C_{vc} costo de válvula cónica,

C_{av} costo de asiento de válvula,

C_{an} costo de anillo de válvula

C_{ln} al costo de lock nut.

A nivel unitario, el juego de válvula nueva se compone de los siguientes elementos:

Tabla 48

Costo unitario válvula cónica GEHO.

Componente	Precio Unitario (USD)
Válvula cónica	\$2,194.33
Anillo de válvula	\$354.57
Asiento de válvula	\$1,717.86
Lock nut	\$693.67
Juego de valvula nueva	\$4,960.43

5.5.3 OPEX antes de la implementación del filtro dúplex

Escenario base: operación actual sin filtro dúplex

El escenario base representa la condición actual de operación del sistema GEHO sin filtración previa en la succión. En esta condición, las válvulas están expuestas directamente al relave abrasivo, lo que se traduce en desgaste acelerado, alta frecuencia de reemplazo y un elevado costo operativo de mantenimiento. En el documento base se reporta que la vida útil nominal de las válvulas se reduce de 2,000 h a aproximadamente 720 h en condiciones reales, y que el análisis económico del capítulo 5.4 se apoya en un escenario base sin filtro.

A partir del Anexo D, los costos históricos totales por repuestos nuevos fueron de US\$ 4,016,433.89 para 2015 y US\$ 3,452,650.59 para 2016. Por tanto, el costo promedio mensual del escenario base es:

$$\text{OPEX_base,mes} = (4,016,433.89 + 3,452,650.59) / 24 = \text{US\$ } 311,211.85/\text{mes}$$

$$\text{OPEX_base,año} = 311,211.85 \times 12 = \text{US\$ } 3,734,542.20/\text{año}$$

Tabla 49

Desglose del OPEX base por componente.

Componente	Total 2015 (USD)	Total 2016 (USD)	Promedio mensual (USD/mes)
Válvula cónica	2,031,770.25	1,483,188.75	146,456.63
Asiento de válvula	1,398,635.18	1,147,828.62	106,102.66
Anillo de válvula	320,418.86	340,984.92	27,558.49
Lock nut	265,609.60	480,648.30	31,094.08
Total, mensual promedio			311,211.85

Los resultados muestran que el mayor peso del OPEX base se concentra en la válvula cónica y en el asiento de válvula, que en conjunto representan aproximadamente el 81.2% del

costo mensual de repuestos. Esto confirma que el desgaste del conjunto valvular es el principal generador del costo operativo de mantenimiento bajo la condición actual.

5.5.4 OPEX después de la implementación del filtro dúplex

Escenario propuesto: operación con filtro dúplex

El escenario propuesto considera la instalación del filtro dúplex en la línea de succión de las bombas GEHO, con el objetivo de reducir el ingreso de partículas críticas y, con ello, disminuir el desgaste abrasivo sobre las válvulas. La tesis reporta para este escenario una vida útil proyectada de 1,440 h frente a 720 h del escenario base, así como una reducción del 80% en la frecuencia de fallas por abrasión y una mejora de la disponibilidad de 85.2% a 96.4%.

Dado que el Anexo D proporciona el costo histórico real de repuestos del escenario actual, el OPEX del escenario propuesto se obtiene aplicando la reducción del 80% de fallas al costo base de mantenimiento directo. En consecuencia, se considera que el costo residual de repuestos equivale al 20% del OPEX base:

$$\text{OPEX_propuesto,mes} = \text{OPEX_base,mes} \times 0.20 = 311,211.85 \times 0.20 = \text{US\$ } 62,242.37/\text{mes}$$

$$\text{OPEX_propuesto,año} = 62,242.37 \times 12 = \text{US\$ } 746,908.44/\text{año}$$

Tabla 50

Desglose del OPEX propuesto por componente.

Componente	OPEX base (USD/mes)	Factor residual	OPEX propuesto (USD/mes)
Válvula cónica	146,456.63	20%	29,291.33
Asiento de válvula	106,102.66	20%	21,220.53
Anillo de válvula	27,558.49	20%	5,511.70
Lock nut	31,094.08	20%	6,218.82
Total mensual promedio	311,211.85		62,242.37

Este resultado indica que, bajo la hipótesis validada por simulación, la implementación del filtro dúplex permite reducir de manera importante el OPEX de mantenimiento directo asociado al reemplazo de válvulas y componentes de desgaste. La mayor reducción absoluta vuelve a concentrarse en la válvula cónica y en el asiento, debido a que son los elementos con mayor incidencia económica dentro del conjunto.

5.5.5 Comparación del OPEX entre escenarios

Tabla 51

Tabla comparativa entre escenarios.

Componente	Escenario base (sin filtro)	Escenario propuesto (con filtro dúplex)
Vida útil de válvulas	720 h	1440 h
OPEX mensual de mantenimiento directo (USD/mes)	311,211.85	62,242.37
OPEX anual de mantenimiento directo (USD/año)	3,734,542.20	746,908.44
Reducción de fallas por abrasión	—	80%
Disponibilidad del sistema	85.2%	96.4%

La diferencia entre ambos escenarios representa el ahorro operativo mensual atribuible a la reducción del consumo de repuestos:

$$\text{Ahorro_mes} = 311,211.85 - 62,242.37 = \text{US\$ } 248,969.48/\text{mes}$$

$$\text{Ahorro_año} = 248,969.48 \times 12 = \text{US\$ } 2,987,633.76/\text{año}$$

Este resultado muestra que el filtro dúplex no solo mejora la vida útil de las válvulas, sino que además reduce de forma significativa el OPEX de mantenimiento de la operación, al disminuir la frecuencia de reposición de componentes expuestos a desgaste abrasivo.

5.5.6 Interpretación del OPEX para la empresa

Desde la perspectiva del OPEX empresarial, el escenario actual implica un gasto recurrente elevado en repuestos de válvulas, directamente asociado a la ausencia de un sistema

de protección previa en la succión del equipo. La magnitud del costo base, superior a US\$ 311 mil mensuales, evidencia que el desgaste de válvulas constituye un foco económico crítico dentro del sistema GEHO.

Con la implementación del filtro dúplex, el OPEX de mantenimiento directo se reduce a aproximadamente US\$ 62 mil mensuales, lo que equivale a una disminución cercana al 80% en el gasto por reposición de componentes. En términos gerenciales, esto significa que la propuesta genera un impacto directo sobre el OPEX operativo de la empresa, al reducir el consumo de repuestos, estabilizar la frecuencia de intervención y mejorar la disponibilidad del sistema de bombeo.

5.5.7 Alcances y limitaciones del análisis de OPEX

El presente capítulo cuantifica el OPEX directamente demostrable con la información histórica disponible en la tesis, es decir, el costo de mantenimiento por repuestos de válvulas. Por tanto, no se han monetizado en detalle los siguientes componentes:

- Mano de obra de mantenimiento,
- Tiempos improductivos por paradas no programadas,
- Pérdidas de producción,
- Mantenimiento futuro del propio filtro dúplex.

En consecuencia, los valores desarrollados en este capítulo deben interpretarse como una estimación conservadora del OPEX de mantenimiento directo. Si en una etapa posterior se incorporan costos de indisponibilidad y pérdidas de producción, el beneficio económico de la implementación del filtro dúplex podría resultar incluso mayor. Esta delimitación es consistente con el enfoque predictivo de diseño y simulación adoptado por la investigación.

En síntesis, el análisis de OPEX demuestra que el escenario actual sin filtro dúplex genera un costo promedio mensual de US\$ 311,211.85 por reposición de válvulas y componentes asociados, mientras que el escenario propuesto reduce este valor a US\$ 62,242.37

mensuales, generando un ahorro operativo estimado de US\$ 248,969.48 por mes. Bajo esta perspectiva, la implementación del filtro dúplex no solo se justifica por su impacto técnico sobre la vida útil de las válvulas, sino también por su efecto directo en la reducción del OPEX de mantenimiento del sistema GEHO.

5.6. Discusión de resultados frente a antecedentes y teorías

La discusión de resultados permite contrastar los hallazgos obtenidos en la presente investigación con los antecedentes técnicos y los fundamentos teóricos que sustentan el diseño y la simulación del filtro dúplex propuesto para el sistema de bombeo GEHO. Este análisis, desarrollado en función de los objetivos específicos, busca establecer la coherencia entre los resultados derivados de los cálculos de diseño y las simulaciones numéricas, y los aportes de investigaciones previas en el ámbito de la ingeniería aplicada al mantenimiento industrial, identificando convergencias, aportes técnicos y alcances del modelo propuesto desde un enfoque predictivo.

El diagnóstico técnico del sistema de bombeo GEHO permitió identificar que los principales mecanismos de falla se asocian al desgaste abrasivo de las válvulas y a la acumulación de sedimentos en la línea de succión, lo que, de acuerdo con los registros analizados, se traduce en una alta recurrencia de eventos de falla. Este resultado es consistente con lo señalado por Espíritu y Huaynate (2023), quienes indican que la ausencia de sistemas de filtración adecuados incrementa significativamente la tasa de fallas en sistemas hidráulicos mineros. Asimismo, concuerda con los planteamientos de Ríos y Castañeda (2022), quienes destacan que el análisis FMEA constituye una herramienta eficaz para la identificación de causas raíz del desgaste prematuro en válvulas industriales. En este contexto, el diagnóstico desarrollado en la presente investigación proporcionó la base técnica necesaria para la definición de los parámetros hidráulicos y estructurales utilizados en el diseño del filtro dúplex.

Los resultados del diseño hidráulico y estructural del filtro dúplex muestran una pérdida de carga estimada inferior a 0,25 bar y una presión de trabajo de 16 bar, valores que se encuentran dentro de los rangos recomendados por las normas ASME VIII-1 y API 610. Estos resultados se alinean con los principios de eficiencia hidráulica expuestos por White (2021), así como con los hallazgos de Hernández y Müller (2023), quienes demostraron que pérdidas de carga menores a 0,3 bar permiten mantener condiciones estables de operación en sistemas de bombeo de gran caudal. De igual forma, la selección del material AISI 316L responde a lo señalado por Villanueva y Chávez (2022), quienes evidencian su mayor resistencia frente a ambientes abrasivos. En conjunto, estos aspectos confirman que el diseño propuesto alcanza un equilibrio adecuado entre eficiencia hidráulica y resistencia estructural, validando su viabilidad técnica a nivel de diseño.

Las simulaciones computacionales CFD y FEA realizadas permitieron verificar el comportamiento hidráulico y la integridad estructural del filtro dúplex bajo condiciones de carga simuladas. Los resultados obtenidos, con una tensión máxima simulada de 178 MPa y un factor de seguridad de 2,23, se mantienen dentro de los límites admisibles establecidos por la norma ASME VIII-1. Estos valores son coherentes con los reportados por Landaverde et al. (2022), quienes validaron diseños hidráulicos mediante modelado numérico, reduciendo significativamente los márgenes de error en la etapa de diseño. Asimismo, concuerdan con los principios de resistencia de materiales propuestos por Beer y Johnston (2019), quienes recomiendan factores de seguridad superiores a 2,0 en componentes sometidos a presión. La baja desviación entre los resultados teóricos y simulados confirma la precisión del modelo geométrico y la confiabilidad del diseño.

La evaluación comparativa de escenarios simulados correspondientes al sistema base sin filtración y al sistema con filtro dúplex diseñado evidencia una mejora proyectada significativa en los indicadores de desempeño del sistema GEHO. A partir de los resultados

obtenidos, se estima una reducción sustancial en la frecuencia de fallas por abrasión y un incremento en la vida útil de las válvulas, lo cual coincide con los planteamientos de Castillo y Cano (2024), quienes señalan que la optimización de componentes críticos mediante mejoras de diseño impacta positivamente en la confiabilidad operativa. Asimismo, estos resultados se alinean con los principios del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) propuestos por Nowlan y Heap (2018), que promueven la mitigación de fallas mediante intervenciones en la etapa de diseño. La concordancia con los resultados de Salas y Poma (2023), quienes reportan reducciones significativas de fallas al incorporar sistemas de filtración en procesos mineros, refuerza la validez técnica del diseño propuesto desde un enfoque predictivo.

Desde el punto de vista teórico, los resultados obtenidos confirman los postulados de la mecánica de fluidos aplicados descritos por White (2021), los cuales establecen que la eficiencia hidráulica de un sistema depende del control adecuado de las pérdidas de carga, la turbulencia y las zonas críticas del flujo. En este sentido, el análisis CFD permitió verificar que el flujo interno del filtro dúplex mantiene un comportamiento estable, sin zonas significativas de recirculación, lo que contribuye a minimizar la erosión interna y optimizar el desempeño hidráulico del sistema, de acuerdo con los principios teóricos analizados.

Finalmente, desde la perspectiva de la ingeniería de mantenimiento, los resultados del estudio respaldan los principios de eficiencia operativa global (OEE) y mantenimiento proactivo, los cuales destacan que la prevención de fallas mediante mejoras en el diseño resulta más eficiente y económicamente viable que las intervenciones correctivas posteriores. En este contexto, los resultados proyectados del diseño del filtro dúplex evidencian un impacto favorable en la reducción estimada de costos de mantenimiento y en la mejora de la confiabilidad del sistema, consolidando la propuesta como una solución técnica coherente con los enfoques modernos de gestión de activos industriales.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

PRIMERA. El diagnóstico del sistema GEHO confirmó que el problema principal es el desgaste abrasivo prematuro de las válvulas de succión y descarga, con reducción de la vida útil desde 2,000 h nominales a un promedio de 720 h en operación real, además de una frecuencia promedio de 9 eventos mensuales por válvula, lo que justifica la necesidad de una protección previa en la línea de succión.

SEGUNDA. La caracterización del relave mostró un medio severo para las válvulas: densidad aparente de 2,700 kg/m³, contenido de sólidos de 74.8% en peso, pH 5.4, conductividad de 4.2 mS/cm y un D50 de 75 µm, con predominio mineralógico de cuarzo (45%) y pirita (25%). Esta combinación de abrasión y corrosión explica el deterioro acelerado de asientos y válvulas cónicas con lo cual sustenta la necesidad de filtración previa.

TERCERA. El filtro dúplex fue diseñado con criterios compatibles con el sistema de bombeo GEHO, para un caudal de 655.25 m³/h, presión de trabajo de 16 bar, material AISI 316L y pérdida de carga de diseño menor o igual a 0.25 bar, cumpliendo ASME VIII-1 y API 610; por tanto, el diseño resulta hidráulica y normativamente viable para servicio con relave abrasivo. El equipo resultante cumple con criterios normativos y de seguridad aplicables, incluyendo ASME VIII-1 y API 610, además de parámetros de diseño mecánico adecuados como espesor mínimo de 8 mm y factor de seguridad teórico de 3.0, lo cual demuestra que el sistema propuesto es constructivamente factible y funcionalmente coherente con la operación industrial prevista.

CUARTA. Simulación CFD validó el comportamiento hidráulico del filtro dúplex al demostrar que el sistema mantiene pérdidas de carga dentro de límites operacionales aceptables en distintos niveles de ensuciamiento. En condición limpia se obtuvo una presión diferencial de 12.6 kPa; con 30% de ensuciamiento, 23.9 kPa; y con 60% de ensuciamiento, 39.5 kPa, valor cercano al umbral de conmutación de 40 kPa. Estos resultados confirman que el diseño permite continuidad operativa y define un criterio técnico claro para la conmutación de cámaras antes de exceder el límite de operación, garantizando estabilidad hidráulica del sistema.

QUINTA. El Análisis estructural por elementos finitos confirmó la integridad mecánica del filtro dúplex frente a las condiciones de presión de trabajo del sistema. Los resultados mostraron una deformación máxima de 0.65 mm, una tensión equivalente de Von Mises de 92 MPa y un factor de seguridad de 2.5, valores que se mantienen dentro de los criterios admisibles para el material AISI 316. Por tanto, el filtro diseñado presenta un comportamiento estructural seguro y adecuado para su futura implementación, dentro del marco predictivo definido por la tesis.

SEXTA. El filtro dúplex genera un impacto económico favorable sobre el OPEX de la operación, al reducir el costo mensual de mantenimiento directo de US\$ 311,211.85 a US\$ 62,242.37, con un ahorro proyectado de US\$ 248,969.48 por mes y US\$ 2,987,633.76 por año. Esta mejora se explica por la disminución del desgaste abrasivo en las válvulas, reflejada en una vida útil proyectada de 720 h a 1440 h, una reducción del 80% de fallas por abrasión y una disponibilidad operativa de 96.4% frente al 85.2% del escenario base.

6.2. RECOMENDACIONES

PRIMERA. Evaluar implementación física del filtro dúplex diseñado, considerando su integración progresiva en el sistema de bombeo GEHO, a fin de validar en campo los beneficios técnicos y operativos proyectados en la presente investigación.

SEGUNDA. Realizar un seguimiento periódico de los indicadores de mantenimiento del sistema de bombeo, tales como MTBF y tiempos de inactividad, con el propósito de verificar la mejora en la confiabilidad operativa tras la incorporación del sistema de filtración.

TERCERA. Efectuar análisis granulométricos periódicos del relave bombeado, debido a que las variaciones en el tamaño y concentración de partículas pueden modificar el comportamiento abrasivo del fluido y, por ende, el desempeño del filtro y la vida útil de las válvulas.

CUARTA. En una futura implementación, el diseño del filtro dúplex sea complementado con un programa de mantenimiento preventivo del elemento filtrante, estableciendo frecuencias de inspección, limpieza y reemplazo que aseguren una operación continua y eficiente del sistema.

QUINTA. Incorporar sistemas de monitoreo de presión diferencial antes y después del filtro dúplex, con el fin de detectar oportunamente condiciones de saturación del medio filtrante y prevenir incrementos de pérdida de carga que puedan afectar el funcionamiento de la bomba.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aliuly, A., Amanzholov, T., Seitov, A., Momysh, N., Jaichibekov, N., y Kaltayev, A. (2024). Hydraulic Design and CFD-Based Parametric Study for Optimizing Centrifugal Pump Impeller Performance. *Applied Sciences*, 14(22), 10161. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/22/10161#>
- Choudhry, J., Almqvist, A., y Larsson, R. (2024). Improving Archard's wear model: An energy-based approach. *Tribology Letters*, 72(93). <https://doi.org/10.1007/s11249-024-01888-8>
- International Council on Mining and Metals. (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management*. ICMM. <https://www.icmm.com>
- Institution of Mechanical Engineers. (2021). *Reducing wear in abrasive slurry pumps through advanced filtration systems*. IMechE. <https://www.imeche.org>
- Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. (2022). *Tecnologías de optimización en el transporte de relaves para una minería sostenible*. IIMP. https://iimp.org.pe/?utm_source=.com
- Gómez, P. (2021). *Diseño de propuesta de mejora para aumentar la disponibilidad en la gestión de mantenimiento de la Unidad Minera Cerro de Pasco* [Trabajo de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/13028>
- Gamarra, M. (2021). *Propuesta de mejora en la gestión de mantenimiento de la bomba pistón-diafragma en empresa del rubro minero basado en la metodología RCM Marcona, 2020* [Trabajo de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/10558>
- Hawash, S., Abo, A. y Salem, O. (2023). Erosion impact on slurry pump behavior and productive life: An experimental and Numerical investigation. *Water Science*, 37(1), 389–398. <https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2283336>

- Huamani, C. y Ambrocio, A. (2021). *Mejora de la disponibilidad de la bomba León h-v3 operando en poza de lodos en la Minera Barrick, mediante el Método SREDIM, Trujillo – 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Antonio Ruiz de Montoya]. Repositorio Institucional UARM. <https://hdl.handle.net/20.500.12833/2331>
- Hu, J., Song, H., Sandfeld, S., Liu, X. y Wei, Y. (2022). Breakdown of Archard law due to transition of wear mechanism from plasticity to fracture. *Tribology International*, 173. 107660. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107660>
- Kang, C., Li, M., Teng, S., Liu, H., Chen, Z., y Li, C. (2024). Erosive Wear Caused by Large Solid Particles Carried by a Flowing Liquid: A Comprehensive Review. *Processes*, 12(6), 1150. <https://doi.org/10.3390/pr12061150>
- Li, W., Yang, Y., Wu, P., Ji, L., Liu, M., Qi, H., y Li, S. (2023). Impact characteristics and erosion mechanism of solid particles in centrifugal pumps. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1206309>
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2021). *Anuario Minero del Perú*. MINEM. <https://www.gob.pe/minem>
- Shi, X., Ding, W., Xu, C., Xie, F., y Tian, Z. (2023). Numerical investigation of particle effect on wear characteristic of centrifugal slurry pump based on CFD-DEM coupling. *Engineering Computations*, 40(9/10), 2386-2408. <https://doi.org/10.1108/EC-04-2023-0181>
- Jonathan Rowland (2024, 21 de Marzo). Let's Talk About Slurry Pump Wear. *North American Mining Magazine*. Recuperado de <https://northamericanmining.com/index.php/2024/03/21/lets-talk-about-slurry-pump-wear/> northamericanmining.com
- Pino, M. (2023). *Mejoramiento del sistema de bombeo para la evacuación de aguas subterráneas en Sociedad Minera El Brocal - Unidad Colquijirca* [Trabajo de pregrado,

Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental.
<https://hdl.handle.net/20.500.12394/13732>

Rivero, A. (2020). *Implementación de plan de mantenimiento en bombas centrífugas verticales para aumentar su vida útil, en proyecto de gran minería, Arequipa 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental.
<https://hdl.handle.net/20.500.12394/8538>

Su, Q., y Zheng, D. (2024). Experimental Analysis and Wear Prediction Model Based on Friction Heat for Dry Sliding Contact. *Coatings*, 14(6), 742.
<https://doi.org/10.3390/coatings14060742>

Su, X., Tang, Z., Li, Y., Zhu, Z., Mianowicz, K., y Balaz, P. (2020). Research of particle motion in a two-stage slurry pump for preventing coarse particle blocking. *Energies*, 13(24), 6711. <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/24/6711>.

Shen, Z., Kong, F., Liu, Y., Zeng, J., Yang, W., y Wu, J. (2025). *Erosion Analysis of Static Components in Slurry Pumps Based on Reverse Modeling*. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 21(3), 589-603. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2024.058727>

Tao, H., Shen, P., Li, Q., Jiang, Y., Yang, W., y Wei, J. (2022). Research on head loss of pre-pump micro-pressure filter under clean water conditions. *Water Supply*, 22(3), 3271-3282. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.402>

Tao, H., Shen, P., Li, Q., Jiang, Y., Yang, W., y Wei, J. (2022). Establishment of prediction models of trapped sediment mass and total filtration efficiency of pre-pump micro-pressure filter. *Irrigation Science*, 40(2), 203-216. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00770-6>

Wang, Y., Li, W., He, T., Liu, H., Han, C., y Zhu, Z. (2022). Experimental study on the influence of particle diameter and concentration on centrifugal pump wear. *Frontiers in Energy Research*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.893385/full>.

- Wang, Z., Peng, G., Chang, H., Hong, S., & Ji, G. (2024). Investigation and Improvement of Centrifugal Slurry Pump Wear Characteristics via CFD-DEM Coupling. *Water*, 16(21), 3050. <https://doi.org/10.3390/w16213050>
- Yadav, Y., Patnaik, A., Singh, A., Sehgal, R., y Siddhartha. (2024). Tribological Models for Erosive Wear in Slurry Flow: A Review. *Johnson Matthey Technology Review*, 69(3), 394-406. <https://doi.org/10.1595/205651325X17187104190561>
- Vlot, E., & Riihimäki, M. (2018). Yara pipeline transportation of thickened tailings. El paper reporta los suction strainers, los transmisores de ΔP y la estación con GEHO TPZM 2000.
- Weir Mission Report – Yara Siilinjärvi. Reporta que las GEHO pump valves alcanzaron más de 4,000 h de vida útil.
- Weir Minerals Netherlands to CBA Alumínio, São Paulo, Brazil. Propuesta técnica donde se describe el installed suction strainer previo a las GEHO TPZM 2000.

APÉNDICES

APÉNDICE A. Fundamentación y aplicación de fórmulas hidráulicas

A.1 Ecuación de continuidad

$$Q = V \cdot A$$

Donde Q es el caudal de diseño (m³/s), V es la velocidad promedio del fluido (m/s) y A es el área transversal de paso (m²). Esta ecuación se utiliza para verificar que el diámetro nominal de la línea de succión sea coherente con el caudal operativo del sistema de bombeo GEHO y para justificar el diámetro adoptado en el diseño.

A.2 Área de la sección circular

$$A = \pi D^2 / 4$$

Donde A es el área de la sección transversal (m²) y D es el diámetro interno equivalente (m). Esta expresión se emplea para despejar el diámetro hidráulico de la línea y validar que el diámetro adoptado corresponde a una velocidad de transporte aceptable para la pulpa de relave.

A.3 Velocidad a través de la malla filtrante

$$V_m = Q / A_{noa}$$

Donde V_m es la velocidad a través de la malla (m/s), Q es el caudal de diseño (m³/s) y A_{noa} es el área neta abierta del medio filtrante (m²). En la tesis se emplea para limitar la velocidad superficial sobre el medio filtrante y controlar la pérdida de carga del sistema.

A.4 Área neta abierta requerida

$$A_{noa} = Q / V_m$$

Esta ecuación permite definir el área mínima efectiva de filtración requerida para asegurar continuidad operativa sin exceder la velocidad límite a través de la malla. Su aplicación fue clave para justificar el área de las canastillas del filtro dúplex.

A.5 Área bruta de filtración

$$A_b = A_{noa} / \varphi$$

Donde A_b es el área bruta de filtración (m^2) y φ es la fracción o porosidad efectiva del medio filtrante. Se emplea para convertir el área neta abierta requerida en superficie real de malla, considerando el porcentaje de vacíos disponible.

A.6 Superficie lateral activa de la canastilla

$$A_L = \pi D_c H_c$$

Donde A_L es el área lateral efectiva (m^2), D_c es el diámetro de la canastilla (m) y H_c es la altura efectiva de la canastilla (m). Esta ecuación se usa para dimensionar geoméricamente la canastilla filtrante cilíndrica y verificar que proporcione el área efectiva requerida.

A.7 Criterio de pérdida de carga admisible

$$\Delta P \leq \Delta P_{adm}$$

Donde ΔP es la pérdida de carga real del filtro y ΔP_{adm} es la pérdida de carga admisible. Este criterio se utiliza para asegurar que el filtro dúplex no comprometa la operación de la bomba GEHO y se relaciona con el umbral de conmutación definido en la tesis.

APÉNDICE B. Fundamentación y aplicación de fórmulas estructurales

B.1 Espesor mínimo de pared para recipiente cilíndrico sometido a presión interna

$$t = PR / (SE - 0.6P)$$

Donde t es el espesor mínimo requerido, P es la presión de diseño, R es el radio interno del recipiente, S es el esfuerzo admisible del material y E es la eficiencia de junta. Esta expresión sirve para verificar que el espesor calculado de la carcasa cumpla con la presión de diseño establecida para el filtro dúplex.

B.2 Esfuerzo circunferencial o tensión de aro

$$\sigma_h = PD / 2t$$

Donde σ_h es la tensión circunferencial, P es la presión interna, D es el diámetro interno y t es el espesor de pared. Se emplea como criterio conceptual para entender cómo la presión interna genera esfuerzos en la carcasa del filtro y por qué es necesario seleccionar un material con suficiente resistencia mecánica.

B.3 Factor de seguridad

$$FS = \sigma_{adm} / \sigma_{trab}$$

Donde FS es el factor de seguridad, σ_{adm} es el esfuerzo admisible del material y σ_{trab} es el esfuerzo de trabajo o tensión calculada. En la tesis este criterio se usa para comprobar que las tensiones inducidas se mantengan dentro del rango permisible del material seleccionado.

B.4 Verificación por tensión equivalente de Von Mises

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_{adm}$$

Esta condición se utiliza en el análisis por elementos finitos para confirmar que el cuerpo del filtro, las conexiones y las zonas críticas de transición no excedan la tensión admisible del material durante la operación.

APÉNDICE C. Fundamentación y aplicación de fórmulas económicas

C.1 Costo promedio mensual del escenario base

$$C_{\text{base,mes}} = (C_{2015} + C_{2016}) / 24$$

Donde C_{2015} y C_{2016} representan los costos históricos de los años 2015 y 2016, respectivamente. Esta expresión se utiliza para obtener el costo directo promedio mensual de mantenimiento correctivo por reposición de válvulas y componentes asociados en la condición actual sin filtro dúplex.

C.2 Costo proyectado del escenario con filtro

$$C_{\text{prop}} = C_{\text{base}} \cdot f_r$$

Donde C_{prop} es el costo proyectado con filtro, C_{base} es el costo base y f_r es el factor residual del costo después de aplicar la mejora. Esta ecuación permite estimar el OPEX del escenario propuesto a partir de la reducción esperada de fallas y de consumo de repuestos.

C.3 Ahorro económico

$$A = C_{\text{base}} - C_{\text{prop}}$$

El ahorro económico se determina como la diferencia entre el escenario base y el escenario propuesto. En la tesis, esta relación cuantifica el beneficio económico directo atribuible a la reducción del desgaste de válvulas y al menor consumo de repuestos.

C.4 Periodo de recuperación simple (Payback)

$$PR = I / A$$

Donde PR es el periodo de recuperación, I es la inversión inicial y A es el ahorro económico periódico. Se emplea para estimar el tiempo necesario para recuperar la inversión del filtro dúplex a partir de los ahorros generados por la reducción del OPEX de mantenimiento.

C.5 Valor Actual Neto (VAN)

$$VAN = \sum [F_t / (1 + i)^t] - I$$

Donde F_t es el flujo de caja en el periodo t , i es la tasa de descuento, n es el número de periodos e I es la inversión inicial. Esta fórmula se utiliza para determinar si los beneficios económicos futuros del proyecto, descontados a valor presente, superan la inversión inicial requerida.

C.6 Tasa Interna de Retorno (TIR)

$$0 = \sum [F_t / (1 + TIR)^t] - I$$

La TIR corresponde a la tasa que hace cero el VAN del proyecto. Se usa para evaluar la rentabilidad financiera del proyecto y compararla con una tasa mínima atractiva de retorno, bajo un criterio conservador y consistente con el flujo económico adoptado.

ANEXOS

Anexo 1

Registro fallas de válvula cónica en la bomba 255-PP-048

HISTORIA DE FALLAS BOMBAS GEHO									
Unidad Minera ubicada en Morococha									
EQUIPO: 255PP048 BOMBA GEHO TPZM 2000									
Fecha inicio historial: 01/07/2016				Fecha termino historial: 31/01/2017					
Fecha Falla	TAG Bomba	Cámara	Descripción falla	Estado	Horómetro Instalación	Horómetro Cambio	Duración Hrs.	MTTR Hrs.	MTBF Hrs.
3/07/2016	48	5	Conical valve	Nuevo	16329	16130	199	3	202
7/07/2016	48	6	Conical valve	Nuevo	16373	16278	95	3	98
8/07/2016	48	3	Conical valve	Nuevo	16379	16299	80	2	82
14/07/2016	48	2	Conical valve	Nuevo	16718	16130	588	3	591
16/07/2016	48	1	Conical valve	Nuevo	16749	16278	471	2	473
27/07/2016	48	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	16987	16373	614	2	616
27/07/2016	48	4	Conical valve	Repar. Supercito 7018	16987	16271	716	4	720
31/07/2016	48	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	17064	16379	685	2	687
10/08/2016	48	6	Conical valve	Nuevo	17270	16987	283	2	285
11/08/2016	48	3	Conical valve	Nuevo	17286	17064	222	3	225
11/08/2016	48	5	Conical valve	Nuevo	17286	16329	957	3	960
13/08/2016	48	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	17325	16749	576	4	580
14/08/2016	48	4	Conical valve	Repar. Supercito 7018	17354	16987	367	3	370
19/08/2016	48	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	17457	17270	187	3	190
6/09/2016	48	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	17714	17457	257	3	260
9/09/2016	48	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	17761	17325	436	3	439
9/09/2016	48	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	17761	17286	475	2	477
12/09/2016	48	1	Conical valve	Nuevo	17834	17661	173	4	177
13/09/2016	48	3	Conical valve	Nuevo	17848	17661	187	2	189

Fecha inicio historial: 01/07/2016				Fecha termino historial: 31/01/2017					
Fecha Falla	TAG Bomba	Cámara	Descripción falla	Estado	Horómetro Instalación	Horómetro Cambio	Duración Hrs.	MTTR Hrs.	MTBF Hrs.
13/09/2016	48	6	Conical valve	Nuevo	17851	17714	137	4	141
13/09/2016	48	5	Conical valve	Nuevo	17851	17286	565	3	568
14/09/2016	48	2	Conical valve	Nuevo	17881	16718	1163	4	1167
19/09/2016	48	4	Conical valve	Repar. Supercito 7018	17990	17354	636	2	638
9/12/2016	48	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19140	17848	1292	4	1296
17/12/2016	48	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19318	17851	1467	3	1470
26/12/2016	48	4	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19515	17990	1525	2	1527
26/12/2016	48	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19515	19318	197	3	200
28/12/2016	48	5	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19504	17851	1653	3	1656
30/12/2016	48	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19602	17834	1768	4	1772
5/01/2017	48	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19713	19515	198	3	201
10/01/2017	48	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19808	19140	668	3	671
14/01/2017	48	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19857	19602	255	3	258
16/01/2017	48	2	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19884	17881	2003	4	2007
17/01/2017	48	4	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19893	19515	378	3	381
21/01/2017	48	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	20002	19713	289	3	292
23/01/2017	48	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	20012	19808	204	3	207
30/01/2017	48	2	Conical valve	Repar. Supercito 7018	20149	19884	265	2	267
31/01/2017	48	5	Conical valve	Repar. Supercito 7018	20153	19504	649	3	652
Suma							22880	112	22992

MTTF (hrs)	602
MTTR (hrs)	3
MTBF (hrs)	605

Anexo 2

Registro fallas de válvula cónica en la bomba 255-PP-049.

HISTORIA DE FALLAS BOMBAS GEHO									
Unidad Minera ubicada en Morococha									
EQUIPO: 255PP049 BOMBA GEHO TPZM 2000									
Fecha inicio historial: 01/07/2016				Fecha termino historial: 31/01/2017					
Fecha falla	TAG Bomba	Cámara	Descripción falla	Estado	Horómetro Instalación	Horómetro Cambio	Duración Hrs.	MTTR Hrs.	MTBF Hrs.
4/07/2016	49	2	Conical valve	Nuevo	15775	15676	99	5	104
4/07/2016	49	3	Conical valve	Nuevo	15782	15684	98	4	102
7/07/2016	49	1	Conical valve	Nuevo	15796	15676	120	2	122
8/07/2016	49	4	Conical valve	Nuevo	15820	15676	144	2	146
8/07/2016	49	6	Conical valve	Nuevo	15835	15457	378	7	385
11/07/2016	49	5	Conical valve	Repar. Supercito 7018	15899	15457	442	2	444
31/07/2016	49	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	16326	15782	544	6	550
2/08/2016	49	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	16328	15796	532	3	535
2/08/2016	49	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	16328	15835	493	5	498
3/08/2016	49	5	Conical valve	Repar. Supercito 7018	16338	15899	439	3	442
9/08/2016	49	3	Conical valve	Nuevo	16451	16326	125	2	127
10/08/2016	49	3	Conical valve	Nuevo	16462	16451	11	4	15
10/08/2016	49	4	Conical valve	Nuevo	16462	15820	642	2	644
10/08/2016	49	6	Conical valve	Nuevo	16462	16328	134	4	138
11/08/2016	49	1	Conical valve	Nuevo	16470	16328	142	3	145
12/08/2016	49	5	Conical valve	Nuevo	16494	16338	156	7	163
24/08/2016	49	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	16692	16462	230	7	237
2/09/2016	49	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	16770	16462	308	6	314
8/09/2016	49	4	Conical valve	Repar. Supercito 7018	16842	16462	380	4	384

Fecha inicio historial: 01/07/2016				Fecha termino historial: 31/01/2017					
Fecha falla	TAG Bomba	Cámara	Descripción falla	Estado	Horómetro Instalación	Horómetro Cambio	Duración Hrs.	MTTR Hrs.	MTBF Hrs.
11/09/2016	49	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	16868	16470	398	6	404
12/09/2016	49	1	Conical valve	Nuevo	16880	16868	12	2	14
12/09/2016	49	3	Conical valve	Nuevo	16880	16692	188	5	193
13/09/2016	49	2	Conical valve	Nuevo	16919	15775	1144	3	1147
16/09/2016	49	6	Conical valve	Nuevo	16967	16770	197	4	201
19/09/2016	49	5	Conical valve	Repar. Inox 29/9	17005	16494	511	7	518
1/10/2016	49	4	Conical valve	Repar. Inox 29/9	17275	16842	433	6	439
15/11/2016	49	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	17795	16880	915	6	921
17/11/2016	49	2	Conical valve	Repar. Supercito 7018	17829	16919	910	2	912
28/11/2016	49	2	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18073	17829	244	3	247
29/11/2016	49	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18099	16880	1219	3	1222
29/11/2016	49	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18099	16967	1132	4	1136
8/12/2016	49	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18260	18099	161	6	167
8/12/2016	49	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18260	18099	161	3	164
9/12/2016	49	2	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18273	18073	200	7	207
10/12/2016	49	4	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18300	17275	1025	6	1031
15/12/2016	49	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18376	17795	581	4	585
17/12/2016	49	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18431	18260	171	7	178
21/12/2016	49	2	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18481	18273	208	7	215
24/12/2016	49	4	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18563	18300	263	2	265
26/12/2016	49	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18586	18260	326	6	332
1/01/2017	49	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18675	18376	299	4	303
1/01/2017	49	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18675	18431	244	6	250
3/01/2017	49	2	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18670	18481	189	7	196
5/01/2017	49	5	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18733	17005	1728	5	1733
6/01/2017	49	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18767	18586	181	5	186

Fecha inicio historial: 01/07/2016				Fecha termino historial: 31/01/2017					
Fecha falla	TAG Bomba	Cámara	Descripción falla	Estado	Horómetro Instalación	Horómetro Cambio	Duración Hrs.	MTTR Hrs.	MTBF Hrs.
17/01/2017	49	4	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18942	18563	379	6	385
17/01/2017	49	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18945	18675	270	3	273
19/01/2017	49	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	18976	18675	301	3	304
21/01/2017	49	2	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19018	18670	348	5	353
21/01/2017	49	5	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19018	18733	285	6	291
22/01/2017	49	6	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19033	18767	266	3	269
27/01/2017	49	3	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19112	18976	136	4	140
28/01/2017	49	2	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19128	19018	110	5	115
29/01/2017	49	1	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19133	18945	188	4	192
31/01/2017	49	4	Conical valve	Repar. Supercito 7018	19198	18942	256	2	258
Suma							20996	245	21241

MTTF (hrs)	382
MTTR (hrs)	4
MTBF (hrs)	386

Anexo 3

Distribución de las 10 bombas GEHO con numero de TAG.



Anexo 4

Gasto generado por las válvulas cónicas en los años 2015 y 2016 al utilizar repuestos nuevos

Válvulas cónicas				
Mes	Año		Costo	
	2015	2016	2015	2016
Enero	24	32	\$52,663.92	\$70,218.56
Febrero	64	108	\$140,437.12	\$236,987.64
Marzo	67	18	\$147,020.11	\$39,497.94
Abril	115	108	\$252,347.95	\$236,987.64
Mayo	168	69	\$368,647.44	\$151,408.77
Junio	78	195	\$171,157.74	\$427,894.35
Julio	42	49	\$92,161.86	\$107,522.17
Agosto	66	48	\$144,825.78	\$105,327.84
Setiembre	6	48	\$13,165.98	\$105,327.84
Octubre	126	0	\$276,485.58	\$0.00
Noviembre	91	0	\$199,684.03	\$0.00
Diciembre	78	0	\$171,157.74	\$0.00
			\$2,031,770.25	\$1,483,188.75

Asiento de válvulas				
Año			Costo	
Mes	2015	2016	2015	2016
Enero	23	50	\$39,510.78	\$85,893.00
Febrero	72	102	\$123,685.92	\$175,221.72
Marzo	57	0	\$97,918.02	\$0.00
Abril	11	96	\$18,896.46	\$164,914.56
Mayo	190	69	\$326,393.40	\$118,532.34
Junio	55	209	\$94,482.30	\$359,032.74
Julio	42	45	\$72,150.12	\$77,303.70
Agosto	66	48	\$113,378.76	\$82,457.28
Setiembre	6	48	\$10,307.16	\$82,457.28
Octubre	126	0	\$216,450.36	\$0.00
Noviembre	87	0	\$149,453.82	\$0.00
Diciembre	78	0	\$133,993.08	\$0.00
			\$1,398,635.18	\$1,147,828.62

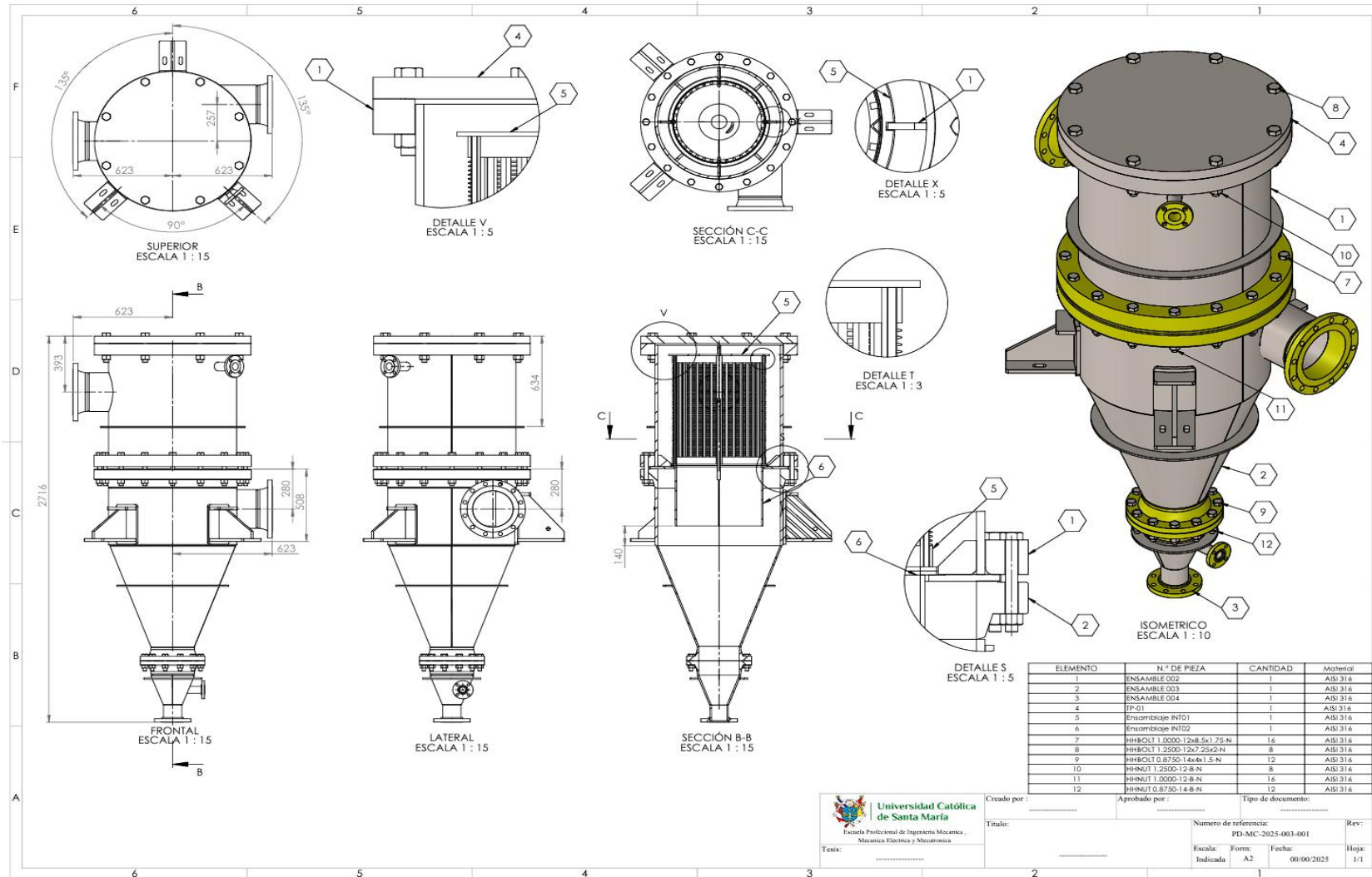
Anillo de válvula				
Año			Costo	
Mes	2015	2016	2015	2016
Enero	24	70	\$8,509.68	\$24,819.90
Febrero	54	84	\$19,146.78	\$29,783.88
Marzo	65	24	\$23,047.05	\$8,509.68
Abril	100	120	\$35,457.00	\$42,548.40
Mayo	116	81	\$41,130.12	\$28,720.17
Junio	134	215	\$47,512.38	\$76,232.55
Julio	36	74	\$12,764.52	\$26,238.18
Agosto	57	97	\$20,210.49	\$34,393.29
Setiembre	18	71	\$6,382.26	\$25,174.47
Octubre	114	40	\$40,420.98	\$14,182.80
Noviembre	102	20	\$36,166.14	\$7,091.40
Diciembre	78	60	\$27,656.46	\$21,274.20
			\$320,418.86	\$340,984.92

Lock nut				
Año			Costo	
Mes	2015	2016	2015	2016
Enero	0	40	\$0.00	\$27,746.80
Febrero	20	69	\$13,873.40	\$47,863.23
Marzo	18	0	\$12,486.06	\$0.00
Abril	69	36	\$47,863.23	\$24,972.12
Mayo	63	57	\$43,701.21	\$39,539.19
Junio	54	175	\$37,458.18	\$121,392.25
Julio	24	67	\$16,648.08	\$46,475.89
Agosto	12	88	\$8,324.04	\$61,042.96
Setiembre	0	48	\$0.00	\$33,296.16
Octubre	54	10	\$37,458.18	\$6,936.70
Noviembre	12	20	\$8,324.04	\$13,873.40
Diciembre	54	80	\$37,458.18	\$55,493.60
			\$265,609.60	\$480,648.30

REPUESTOS NUEVOS	
Costo total Año 2015	Costo total Año 2016
\$4,016,433.89	\$3,452,650.59

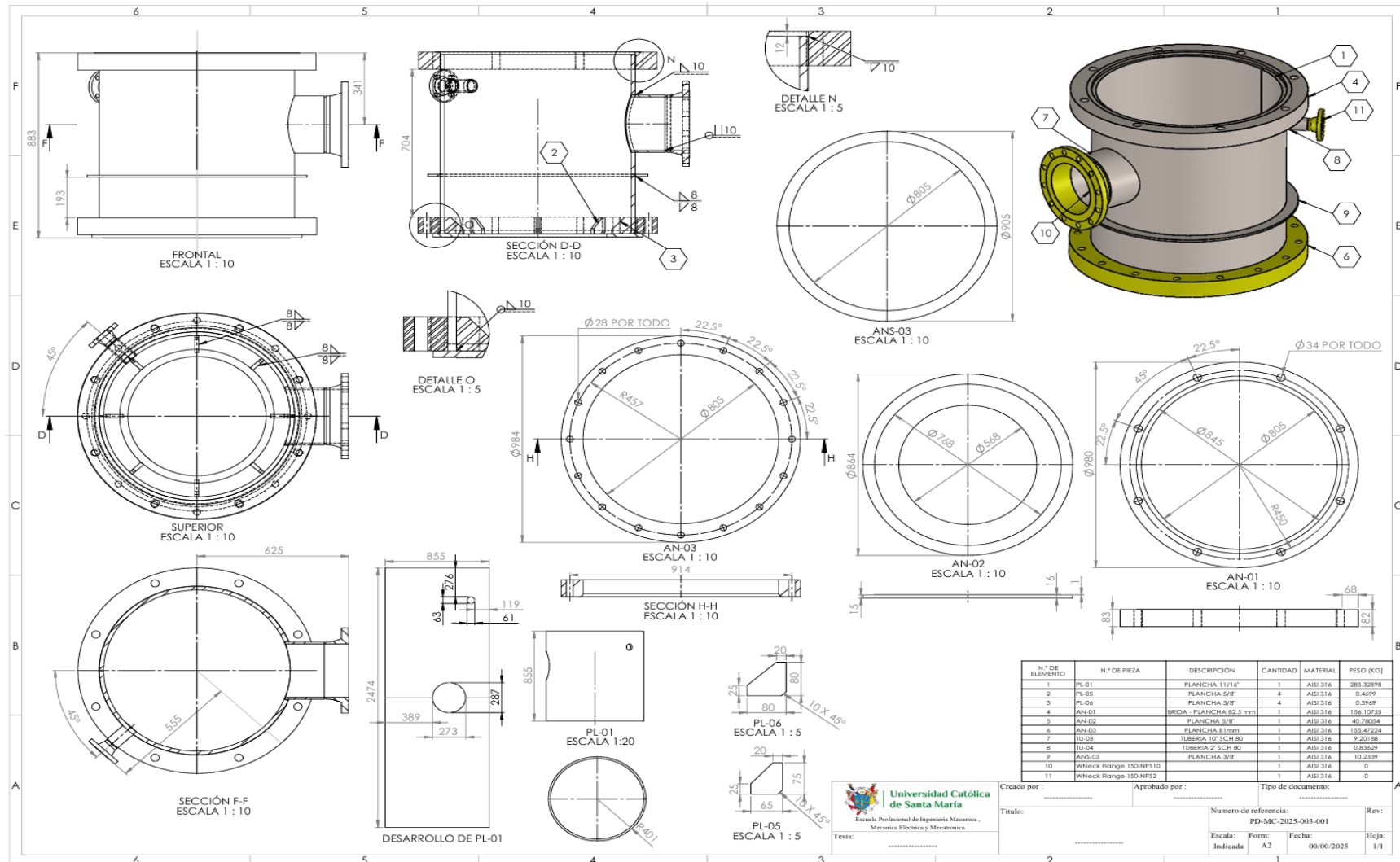
Anexo 5

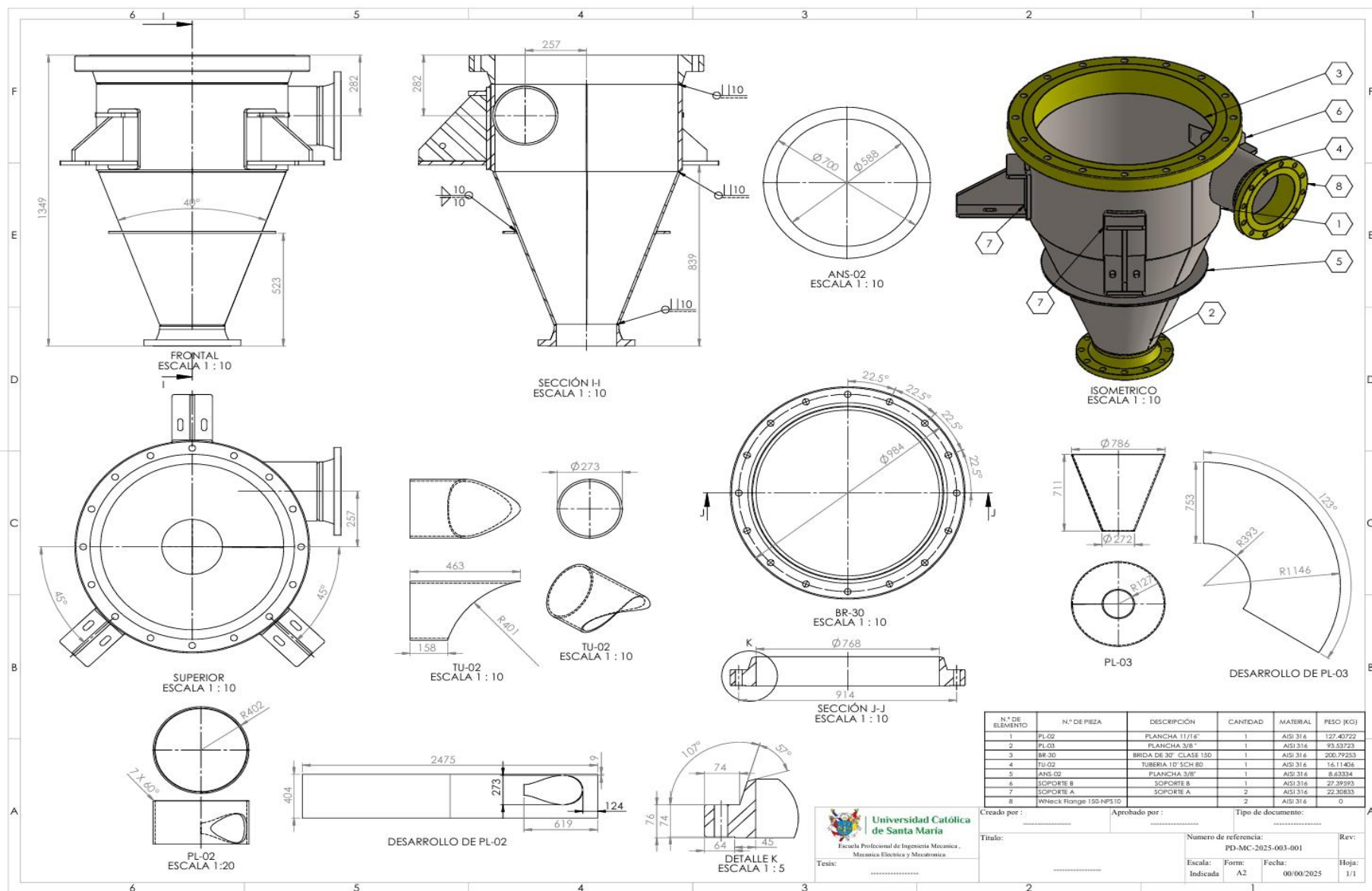
Plano general del sistema de bombeo GEHO.

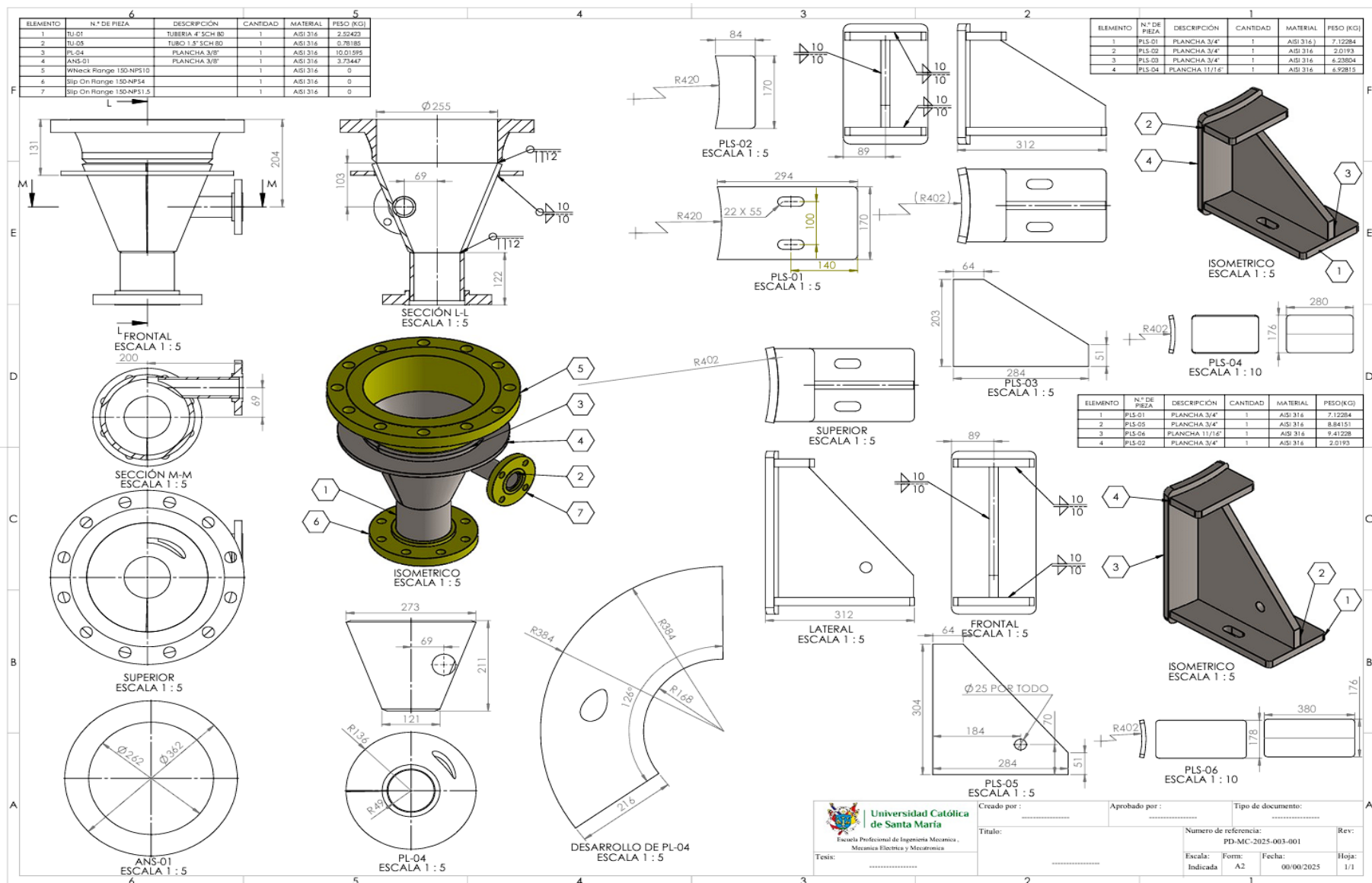


Anexo 6

Planos del cuerpo del filtro dúplex GEHO.

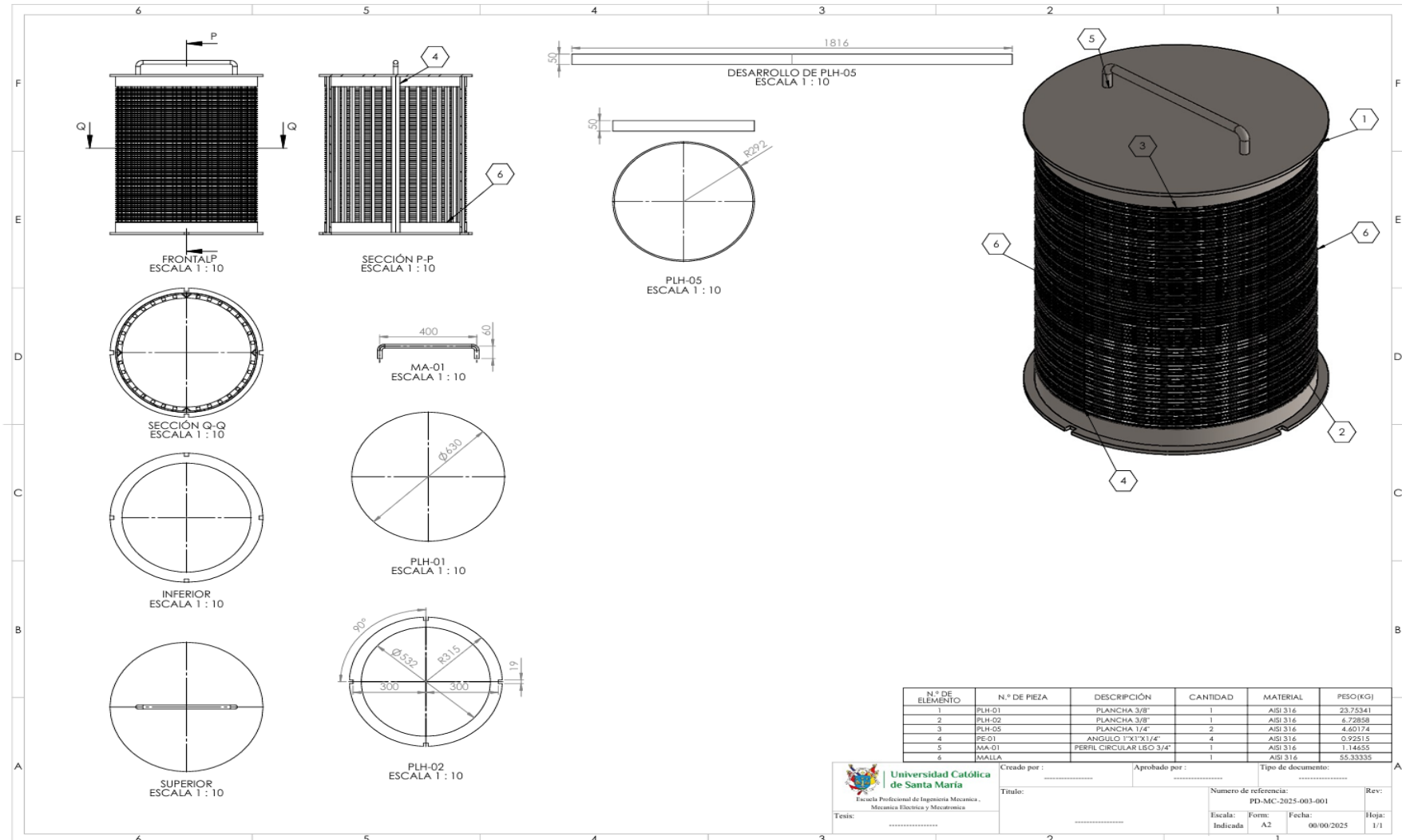


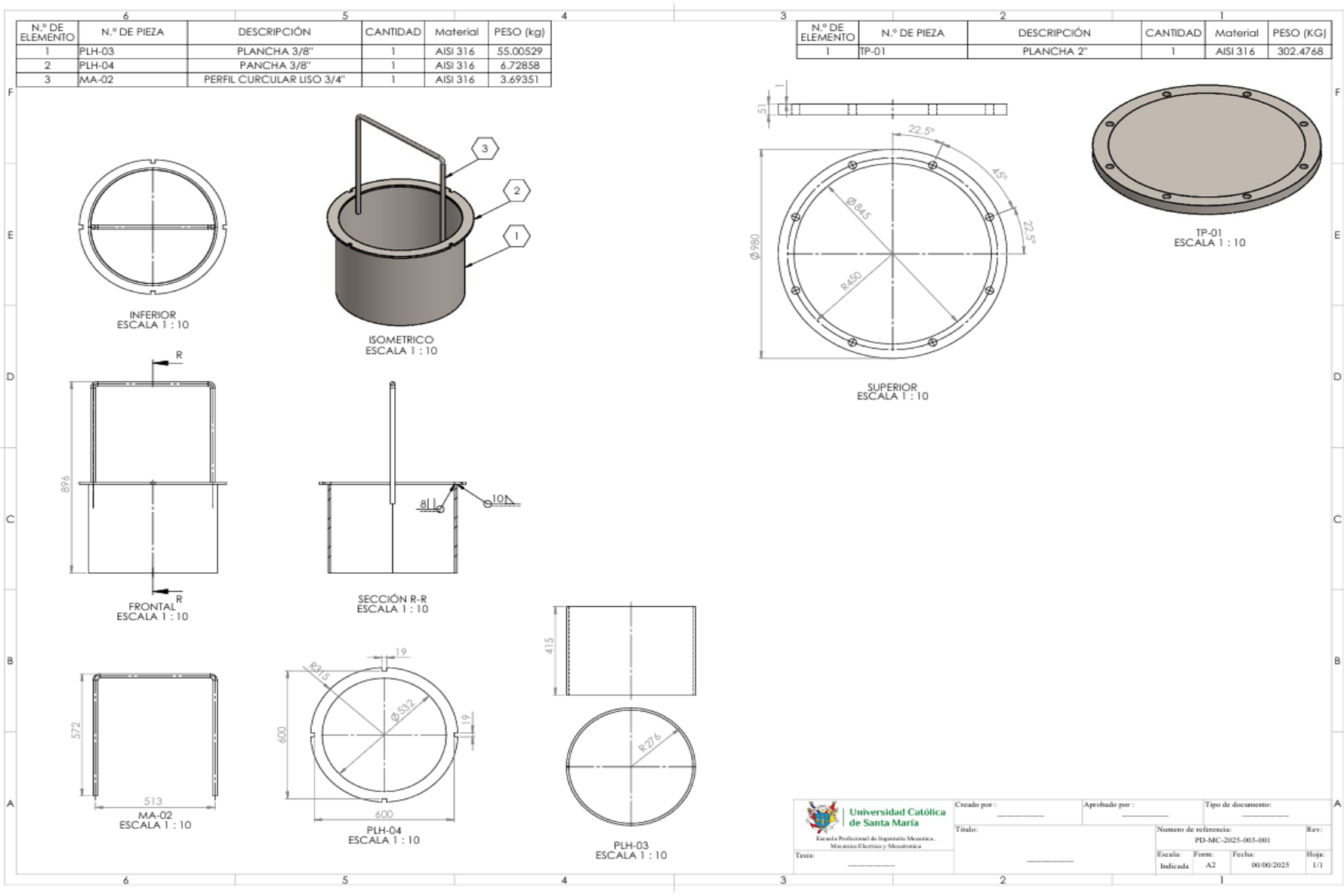




Anexo 7

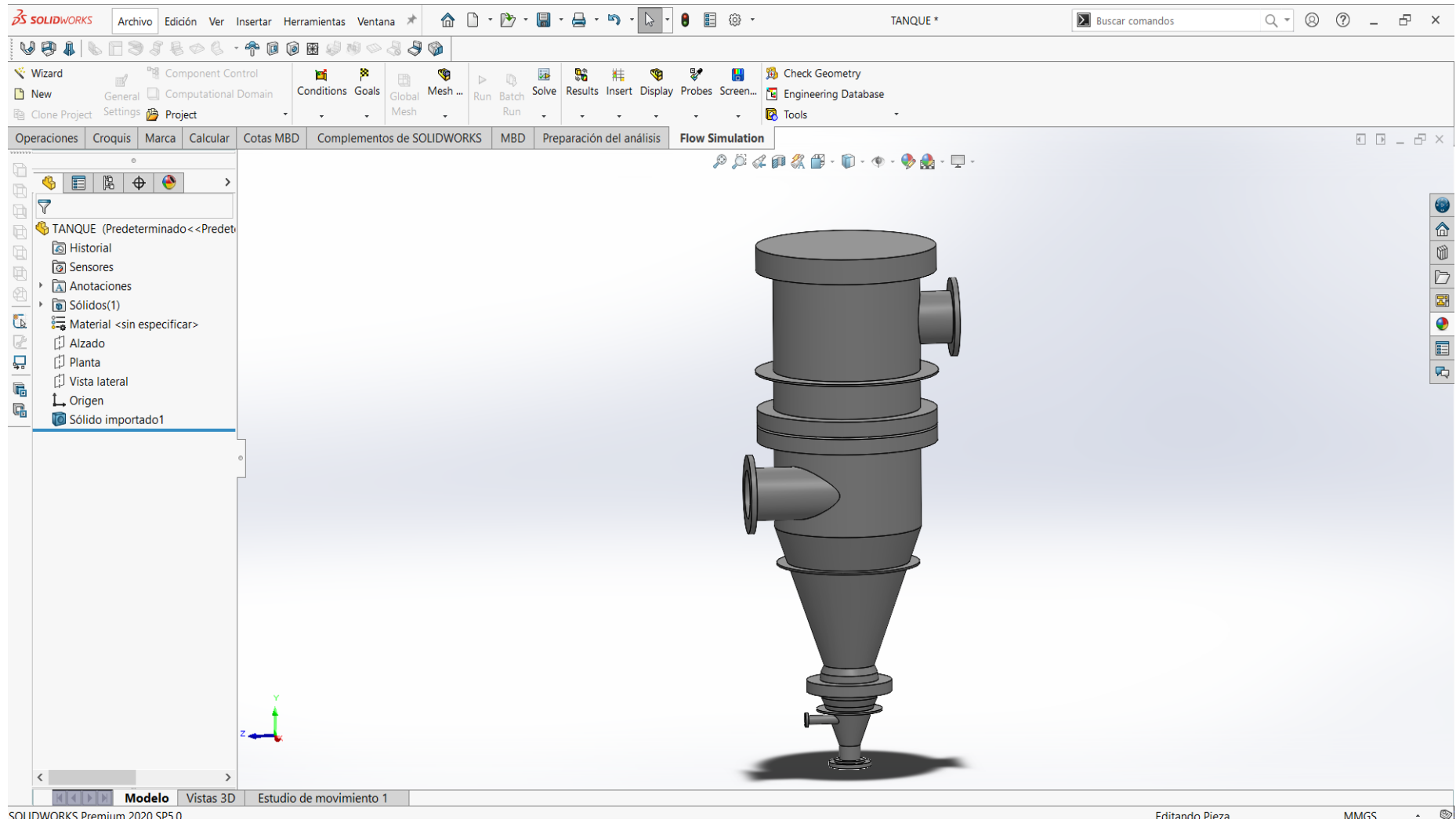
Planos de canastilla filtrante duplex.





Anexo 8

Diseño del filtrante dúplex en el software SolidWorks.



Anexo 9

Matriz de consistencia.

a. Matriz consistencia general

Elemento	Formulación
Problema general	¿Cómo el diseño y simulación de un filtro dúplex puede optimizar la vida útil de las válvulas de succión y descarga de las bombas GEHO en la Unidad Minera Morococha?
Objetivo general	Diseñar y simular un sistema de filtrado dúplex que permita optimizar la vida útil de las válvulas de succión y descarga de las bombas GEHO en la Unidad Minera Morococha.
Hipótesis general	El diseño y la simulación de un filtro dúplex en las bombas GEHO de la Unidad Minera Morococha permitirá optimizar la vida útil de las válvulas de succión y descarga, al reducir la presencia de partículas sólidas en el fluido bombeado.
Variable independiente	Diseño y simulación del filtro dúplex.
Variable dependiente	Vida útil de las válvulas de succión y descarga.
Variable interviniente	Condiciones del fluido bombeado.
Dimensiones principales	Diseño técnico e hidráulico; eficiencia de filtrado; comportamiento hidráulico del sistema; desgaste superficial; condición operativa simulada; concentración de sólidos; tamaño medio de partícula; composición química.
Indicadores generales	Presión diferencial simulada, caudal simulado, grado de retención de partículas, índice de desgaste estimado, vida útil proyectada, % de sólidos, D50, pH y presencia de minerales abrasivos.
Técnicas e instrumentos	Análisis documental, análisis de información operativa histórica, análisis físico-químico del fluido, simulación computacional CFD y FEA; uso de software CFD/FEA, fichas técnicas, planos, reportes de laboratorio y hojas de cálculo.

b. Matriz consistencia general

Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables / dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos
¿Cuáles son las principales fallas y tiempos de inactividad asociados al desgaste de las válvulas de succión y descarga en las bombas GEHO?	Diagnosticar el estado actual del sistema de bombeo GEHO en la Unidad Minera Morococha, identificando los principales mecanismos de desgaste que afectan a las válvulas de succión y descarga.	Si se diagnostica el estado actual del sistema de bombeo GEHO, entonces será posible identificar los principales mecanismos de desgaste que afectan a las válvulas de succión y descarga.	Variable dependiente: vida útil de válvulas. Dimensiones: desgaste superficial y condición operativa.	Frecuencia de fallas, tiempo de inactividad, MTBF, tipo de válvula afectada, mecanismo de desgaste identificado.	Análisis documental, análisis histórico de mantenimiento, fichas técnicas GEHO, registros de fallas y hojas de cálculo.
¿Qué características físicas, químicas y granulométricas del fluido bombeado influyen de manera significativa en el desgaste abrasivo de las válvulas?	Analizar las características físicas, químicas y granulométricas del fluido bombeado que influyen en el desgaste abrasivo de las válvulas.	Si se analizan las características físicas, químicas y granulométricas del fluido bombeado, entonces se podrán determinar los factores que influyen de manera significativa en el desgaste abrasivo de las válvulas.	Variable interviniente: condiciones del fluido bombeado. Dimensiones: concentración de sólidos, tamaño medio de partícula y composición química.	% de sólidos en suspensión, D50, pH, presencia de minerales abrasivos y densidad del fluido.	Análisis físico-químico, reportes de laboratorio, análisis granulométrico e información técnica del proceso.
¿Qué criterios hidráulicos, estructurales y normativos deben considerarse para el diseño de un	Diseñar un filtro dúplex considerando criterios hidráulicos, estructurales y normativos aplicables al sistema de bombeo GEHO.	Si se diseña un filtro dúplex considerando criterios hidráulicos, estructurales y normativos, entonces se podrá proponer un	Variable independiente: diseño y simulación del filtro dúplex. Dimensiones:	Presión de diseño, caudal de diseño, pérdida de carga admisible, área de filtración,	Cálculo hidráulico, dimensionamiento mecánico, selección de materiales, fichas

Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables / dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos
filtro dúplex compatible con el sistema de bombeo GEHO?		sistema de filtración técnicamente compatible con las condiciones de operación de las bombas GEHO.	diseño técnico e hidráulico.	espesor de carcasa, material seleccionado y cumplimiento normativo.	técnicas, planos y normas ASME/API/ASTM/ISO.
¿Cómo se comporta hidráulicamente el filtro dúplex diseñado, en términos de pérdida de carga, distribución de presión y caudal, de acuerdo con los resultados de la simulación CFD?	Simular el comportamiento hidráulico del filtro dúplex mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), evaluando la pérdida de carga, la distribución de presión y el caudal operativo.	Si se simula el comportamiento hidráulico del filtro dúplex mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), entonces se evidenciará que la pérdida de carga, la distribución de presión y el caudal operativo se mantienen dentro de límites admisibles para el sistema de bombeo.	Variable independiente. Dimensión: comportamiento hidráulico del sistema.	ΔP simulada, distribución de presión, velocidad del flujo, líneas de corriente y caudal operativo.	Simulación CFD, software ANSYS Fluent o SolidWorks Flow Simulation y hojas de cálculo comparativas.
¿Cuál es el comportamiento estructural del filtro dúplex frente a las condiciones de presión de operación, según los resultados del	Simular el comportamiento estructural del filtro dúplex mediante análisis por elementos finitos (FEA), verificando los niveles de tensión, deformación y factores de seguridad.	Si se simula el comportamiento estructural del filtro dúplex mediante análisis por elementos finitos (FEA), entonces se verificará que los niveles de tensión, deformación y factores de seguridad cumplen con los criterios	Variable independiente. Dimensión: diseño estructural y comportamiento mecánico.	Tensión de Von Mises, deformación máxima, factor de seguridad y cumplimiento estructural.	Simulación FEA, software ANSYS Mechanical o SolidWorks Simulation y normas de diseño mecánico.

Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables / dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos
análisis por elementos finitos?		establecidos por la normativa aplicable.			
¿En qué medida la incorporación del filtro dúplex contribuye a la reducción del desgaste de las válvulas, incrementando su vida útil?	Evaluar el impacto del filtro dúplex en la optimización de la vida útil de las válvulas de succión y descarga.	Si se evalúan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones hidráulicas y estructurales, entonces se demostrará, de manera predictiva, la optimización de la vida útil de las válvulas de succión y descarga mediante la reducción del desgaste abrasivo.	Variable dependiente: vida útil de válvulas. Dimensiones: desgaste superficial y condición operativa simulada.	Índice de desgaste estimado, vida útil proyectada, reducción de fallas, mejora de disponibilidad y disminución de mantenimiento correctivo.	Análisis comparativo de escenarios, modelos de desgaste, resultados CFD/FEA, registros históricos y hojas de cálculo.

c. Tipo, nivel, enfoque y validación metodológica

Elemento metodológico	Formulación
Tipo de investigación	Aplicada.
Nivel de investigación	Explicativo.
Enfoque	Cuantitativo.
Diseño metodológico	No experimental, predictivo, basado en simulación computacional.
Población	Sistema de bombeo GEHO de la Unidad Minera Morococha.
Muestra	Caso de estudio seleccionado intencionalmente dentro del sistema GEHO.
Validación	Comparación de resultados teóricos y simulados, análisis de desempeño técnico y contraste con hipótesis y objetivos.
Alcance real del estudio	Diseño y simulación; no incluye fabricación, instalación ni pruebas en campo.