

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL:

**Evaluación de la ampliación de un Sistema de Impulsión de Agua
de Mar para cubrir la demanda de agua en una Planta de Ósmosis
Inversa en el Puerto de Marcona.**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Naval

Elaborado por:

Daniel Tomas Tello Ayala

 [0009-0006-4917-4687](https://orcid.org/0009-0006-4917-4687)

Asesor:

Dr. Francisco Ugarte Palacin

 [0000-0002-2129-9342](https://orcid.org/0000-0002-2129-9342)

LIMA - PERÚ

2025

| | |
|------------------------------|---|
| Citar/How to cite | Tello [1] |
| Referencia/Reference | [1] D. Tello Ayala, “ <i>Evaluación de la ampliación de un Sistema de Impulsión de Agua de Mar para cubrir la demanda de agua en una Planta de Ósmosis Inversa en el Puerto de Marcona</i> ” [Trabajo de suficiencia profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025. |
| Estilo/Style: IEEE (2020) | |

| | |
|--------------------------------|--|
| Citar/How to cite | (Tello, 2025) |
| Referencia/Reference | Tello, D. (2025). <i>Evaluación de la ampliación de un Sistema de Impulsión de Agua de Mar para cubrir la demanda de agua en una Planta de Ósmosis Inversa en el Puerto de Marcona</i> . [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI. |
| Estilo/Style: APA (7ma ed.) | |

Dedicatoria

A mi esposa, mis hijas y a toda mi familia que confiaron en mí, quienes me mostraron su apoyo y consejo para seguir siempre adelante, nunca rendirme y darlo todo de mí.

Agradecimientos

Agradezco a Dios, a mi familia y a todas las personas que me brindaron la oportunidad y apoyaron para desarrollarme personal y profesionalmente.

RESUMEN

En el presente Trabajo de Suficiencia se realiza un análisis hidráulico, en estado estable y en estado transitorio a un Sistema de Impulsión de Agua de Mar (SIAM), al incrementar una cuarta bomba de similares características a las 03 instaladas, hoy en día.

El SIAM existente está conformado principalmente por 03 bombas en paralelo, 03 válvulas de control de flujo, 01 válvula de seguridad, 01 variador de frecuencia, 02 piscinas de emergencia y un pipeline de aproximadamente 40.5km.

El SIAM futuro considera 01 bomba adicional, 01 variador adicional, 01 válvula de control de flujo adicional, 01 válvula de seguridad adicional y las tuberías, accesorios e instrumentación necesaria para el correcto funcionamiento del sistema.

La curva teórica del sistema se calculó con la rugosidad de diseño en el pipeline igual a 1mm. El valor real de rugosidad no se conoce.

Los principales resultados del análisis son:

- ✓ Máximo caudal disponible.
- ✓ Verificación de cavitación de las bombas.
- ✓ Nuevo tiempo de vida útil estimado en función al MAOH (Cabeza máxima de operación admisible) y HGL (gradiente hidráulico).

ABSTRACT

In this Sufficiency Work, a hydraulic analysis is carried out, in a steady state and in a transient state, on a Sea Water Impulsion System (SIAM), by adding a fourth pump with similar characteristics to the 03 installed today.

The existing SIAM is mainly made up of 03 pumps in parallel, 03 flow control valves, 01 safety valve, 01 frequency converter, 02 emergency pools and a pipeline of approximately 40.5 km.

The future SIAM considers 01 additional pump, 01 additional variator, 01 additional flow control valve, 01 additional safety valve and the pipes, accessories and instrumentation necessary for the correct operation of the system.

The theoretical curve of the system was calculated with the design roughness in the pipeline equal to 1 mm. The actual roughness value is not known.

The main results of the analysis are:

- ✓ Maximum available flow.
- ✓ Verification of pump cavitation.
- ✓ New estimated useful life based on MAOH (Maximum Allowable Operating Head) and HGL (Hydraulic Gradient).

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|------|
| RESUMEN | v |
| ABSTRACT | vi |
| INTRODUCCIÓN | xiii |
| CAPÍTULO I. GENERALIDADES | 1 |
| 1.1. Antecedentes de la investigación..... | 1 |
| 1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio | 2 |
| 1.3. Formulación del Problema | 6 |
| 1.3.1. Problema Principal..... | 6 |
| 1.3.2. Problemas Específicos | 6 |
| 1.4. Justificación e Importancia..... | 7 |
| 1.5. Objetivos | 8 |
| 1.5.1. Objetivo General..... | 8 |
| 1.5.2. Objetivos Específicos | 8 |
| 1.6. Hipótesis..... | 9 |
| 1.6.1. Hipótesis General | 9 |
| 1.6.2. Hipótesis Específica | 9 |
| 1.7. Variables y Operacionalización de Variables | 9 |
| 1.7.1. Variables | 9 |
| 1.7.2. Operacionalización de Variables..... | 10 |
| 1.8. Metodología de la Investigación..... | 10 |
| 1.8.1. Unidades de Análisis | 10 |
| 1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de la investigación..... | 11 |
| 1.8.3. Diseño de la investigación | 11 |
| 1.8.4. Fuentes de Información | 12 |

| | | |
|--|--|----|
| 1.8.5. | Población y Muestra | 12 |
| 1.8.6. | Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos | 12 |
| 1.8.7. | Análisis y Procesamiento de Datos..... | 13 |
| CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL..... | | 15 |
| 2.1. | Bases Teóricas..... | 15 |
| 2.1.1. | Escasez de agua y desalinización | 15 |
| 2.1.1.1. | Escasez de agua en el Mundo y en el Perú..... | 15 |
| 2.1.1.2. | La desalinización como alternativa de obtención de agua dulce..... | 15 |
| 2.1.2. | Plantas de Ósmosis Inversa (RO)..... | 16 |
| 2.1.2.1. | Componentes y Funcionamiento de una Planta RO | 16 |
| 2.1.2.2. | Factores que afectan el Funcionamiento de una Planta RO | 18 |
| 2.1.3. | Sistema de Impulsión de Agua de Mar (SIAM) | 19 |
| 2.1.3.1. | Componentes y Funcionamiento de un SIAM | 20 |
| 2.1.3.2. | Factores que afectan el Funcionamiento de un SIAM..... | 21 |
| 2.2. | Marco Conceptual | 23 |
| 2.2.1. | Sistema de Impulsión de Agua de Mar (SIAM) | 23 |
| 2.2.2. | Análisis Hidráulico en Estado Estable..... | 23 |
| 2.2.3. | Análisis Hidráulico en Estado Transitorio..... | 24 |
| 2.2.4. | Bomba de Desplazamiento Positivo | 24 |
| 2.2.5. | Ósmosis Inversa..... | 24 |
| 2.2.6. | Fiabilidad del Sistema..... | 25 |
| 2.2.7. | Caudal..... | 25 |
| 2.2.8. | Golpe de Ariete..... | 26 |
| CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN..... | | 27 |
| 3.1. | Análisis Hidráulico en Estado Estable..... | 29 |
| 3.1.1. | Descripción General | 29 |
| 3.1.2. | Límites de Batería | 31 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.1.3. | Bases y Criterios de Diseño..... | 32 |
| 3.1.3.1. | Datos de Entrada..... | 32 |
| 3.1.3.2. | Base de Diseño Hidráulico / Pipeline | 33 |
| 3.1.3.3. | Fundamentos Hidráulicos | 34 |
| 3.1.4. | Configuración del Sistema..... | 36 |
| 3.1.4.1. | Bombas | 36 |
| 3.1.4.2. | Sistema de tuberías (Pipeline)..... | 37 |
| 3.1.4.3. | Variador de Frecuencia | 37 |
| 3.1.4.4. | Válvula de Control | 37 |
| 3.1.4.5. | Válvula de Seguridad..... | 38 |
| 3.1.4.6. | Tanque de Agua de Mar | 38 |
| 3.1.5. | Cálculo Hidráulico en Estado Estable | 38 |
| 3.1.5.1. | Caudal Máximo Disponible | 39 |
| 3.1.5.2. | Perfil Hidráulico | 42 |
| 3.1.5.3. | NPSH Disponible..... | 44 |
| 3.1.5.4. | NPSH Requerido | 46 |
| 3.2. | Análisis Hidráulico en Estado Transitorio..... | 46 |
| 3.2.1. | Bases y Criterios de Diseño..... | 46 |
| 3.2.2. | Modelo del Transitorio Hidráulico..... | 46 |
| 3.2.3. | Características del Fluido | 47 |
| 3.2.4. | Características de la curva de la bomba..... | 47 |
| 3.2.5. | Condición de la tubería..... | 47 |
| 3.2.6. | Momento de Inercia..... | 48 |
| 3.2.7. | Presiones permisibles en tubería de acero al carbono..... | 49 |
| 3.2.8. | Presiones permisibles en tubería HDPE | 50 |
| 3.2.9. | Piping, tubería de impulsión y otros datos | 50 |
| 3.2.10. | Modelación | 52 |

| | |
|--|----|
| 3.2.10.1. Régimen Permanente a flujo máximo..... | 53 |
| 3.2.10.2. Arranque secuencial de bombas | 55 |
| 3.2.10.3. Detención secuencial de bombas..... | 59 |
| 3.2.10.4. Envolventes Máxima y Mínima de Operación Normal | 63 |
| 3.2.10.5. Caída simultánea de bombas | 65 |
| CAPÍTULO IV. RESULTADOS, CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 69 |
| 4.1. Resultados | 69 |
| 4.2. Contrastación de Hipótesis..... | 71 |
| 4.2.1. Hipótesis 1 | 71 |
| 4.2.2. Hipótesis 2 | 71 |
| 4.2.3. Hipótesis 3 | 72 |
| 4.2.4. Hipótesis General..... | 72 |
| 4.3. Discusión de resultados | 73 |
| CONCLUSIONES | 74 |
| RECOMENDACIONES | 76 |
| REFERENCIAS..... | 77 |
| ANEXOS | 80 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|----------|--|----|
| Tabla 1 | Matriz de operacionalización de Variables | 10 |
| Tabla 2 | Características del Agua de Mar | 33 |
| Tabla 3 | Bases de diseño del sistema de tubería - Pipeline | 34 |
| Tabla 4 | Características del Sistema de Tuberías Existente | 37 |
| Tabla 5 | Resumen de valores corregidos del comportamiento hidráulico del sistema | 41 |
| Tabla 6 | Resultados hidráulicos del sistema de tuberías con el caudal de 1008 m ³ /h | 41 |
| Tabla 7 | Cambio de tramos para el año 17 (Caudal = 1055 m ³ /h) | 44 |
| Tabla 8 | Características del Agua de Mar | 47 |
| Tabla 9 | Inercia Motor – Bomba | 48 |
| Tabla 10 | Estaciones Principales | 51 |
| Tabla 11 | Características del Sistema de Tuberías Existente | 51 |
| Tabla 12 | Holgura entre la presión máxima del transitorio y MAOH eventual | 54 |
| Tabla 13 | Resultados hidráulicos del pipeline con el caudal de 1055 m ³ /h | 54 |
| Tabla 14 | Secuencia de arranque de bombas | 55 |
| Tabla 15 | Holgura entre la presión máxima del transitorio y MAOH eventual | 57 |
| Tabla 16 | Presiones máximas registradas en estaciones – Arranque de bombas | 57 |
| Tabla 17 | Secuencia de detención de bombas | 59 |
| Tabla 18 | Holgura entre la presión máxima del transitorio y MAOH eventual | 61 |
| Tabla 19 | Presiones máximas registradas en estaciones – Detención de bombas | 61 |
| Tabla 20 | Holgura entre la presión máxima del transitorio y MAOH eventual | 64 |
| Tabla 21 | Presiones máximas registradas en estaciones – Operación normal | 64 |
| Tabla 22 | Secuencia de caída simultánea de bombas | 65 |
| Tabla 23 | Holgura entre la presión máxima del transitorio y MAOH eventual | 67 |
| Tabla 24 | Presiones máximas registradas en estaciones – Operación normal | 67 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Sistema de Impulsión de Agua de Mar de Minera Centin Antofagasta en Chile | 3 |
| Figura 2 | Catastro de Plantas desalinizadoras y Sistemas de Imp de Agua de Mar (SIAM) en la minería de cobre en Chile | 4 |
| Figura 3 | Diagrama de Perfil longitudinal del SIAM actual | 27 |
| Figura 4 | Diagrama de Proceso del SIAM actual | 36 |
| Figura 5 | Curva de Operación bombas / sistema | 39 |
| Figura 6 | Puntos de Operación de las bombas | 40 |
| Figura 7 | Sistema de tuberías con caudal de 1055 m ³ /h a 20 a rugosidad de diseño 1 mm | 42 |
| Figura 8 | Sistema de tuberías con caudal de 1055 m ³ /h a 17 a rugosidad de diseño 1 mm | 43 |
| Figura 9 | Diagrama de disposición del Tanque de agua de mar | 45 |
| Figura 10 | Perfil del pipeline, LGH, MAOH y MAOH eventual (Año 1 | 53 |
| Figura 11 | Envolventes de presión máxima y mínima para arr secuencial de las 04 bombas (Año 17) | 56 |
| Figura 12 | Presión en función del tiempo - Arranque secuencial de l bombas | 58 |
| Figura 13 | Envolventes de presión máxima y mínima para dete secuencial de las 04 bombas (Año 17) | 60 |
| Figura 14 | Presión en función del tiempo - Detención secuencial de bombas | 62 |
| Figura 15 | Envolventes de presión máxima y mínima en operación n (Año 17) | 63 |
| Figura 16 | Envolventes de presión máxima y mínima para simultánea de 04 bombas (Año 17) | 66 |
| Figura 17 | Presión en función del tiempo – Caída simultánea de las bombas | 68 |

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el acceso a agua potable se ha convertido en uno de los desafíos más significativos a nivel global, especialmente en regiones áridas y semiáridas como el departamento de Ica, en Perú. La creciente demanda de agua dulce debido a la expansión industrial y el crecimiento poblacional, junto con los impactos del cambio climático, han exacerbado la escasez de recursos hídricos disponibles. En este contexto, la desalinización surge como una solución estratégica para mitigar la crisis hídrica, utilizando tecnologías como la ósmosis inversa para transformar el abundante recurso del agua de mar en un suministro vital de agua dulce.

El Puerto de Marcona, ubicado en una zona estratégica para la industria minera y otros sectores industriales, enfrenta una situación crítica de escasez de agua que afecta tanto al desarrollo económico como al bienestar social de la comunidad. Para abordar esta problemática, se ha propuesto la ampliación de un Sistema de Impulsión de Agua de Mar (SIAM) existente, diseñado originalmente para captar y transportar agua de mar a una planta de ósmosis inversa situada a 40,5 km de la costa.

El presente Trabajo, se enfoca en evaluar técnicamente la viabilidad de ampliar este sistema de impulsión con la adición de una cuarta bomba. Este estudio es de vital importancia, no solo para la sostenibilidad del suministro de agua en Marcona, sino también como un referente para futuros proyectos de desalinización en regiones similares. Mediante análisis hidráulicos en estado estable y transitorio, este trabajo busca determinar la capacidad de la propuesta de ampliación para satisfacer la creciente demanda de agua de la planta de ósmosis inversa, garantizando así la eficiencia y confiabilidad del sistema a largo plazo.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes de la investigación

La investigación se realiza en un Sistema de Impulsión de Agua de mar que se encuentra ubicado en el Puerto de Marcona, el cual capta agua del mar para transportarlo a una Planta de Ósmosis Inversa ubicada en una Unidad Minera a 40.5 Km de la costa y a una altitud de 836 msnm.

Ramírez (2020), investigó la incidencia del flujo transitorio en el diseño de una línea de impulsión que extrae agua del Río Pisit – Bramadero para cubrir el déficit histórico de demanda de agua de una Planta de Procesamiento. La Planta de Procesamiento requería un caudal total máximo de 48.9 litros/s, de los cuales 20 litros/s los recibía del Reservorio Bramadero y los restantes 28.9 litros/s serían abastecidos por un sistema de impulsión Pisit – Bramadero. Se aplicó un análisis hidráulico basado en modelos inerciales para evaluar los flujos transitorios en tuberías o líneas de impulsión y del conjunto motor-bomba. Para el modelamiento hidráulico utilizó el software KYPipe. Sus resultados del análisis de flujos transitorios concluyeron que era necesario sobredimensionar la resistencia del material de la tubería de línea de impulsión, a través del aumento de los espesores de las tuberías.

Bielich, Huertas (2022), investigaron los problemas de un sistema de impulsión de fluido en el interior de una Unidad Minera, que presentaba fallas por vibración y eficiencia del sistema de bombeo, por lo que era de urgencia implementar un sistema de impulsión que revirtiera dicha condición. El fabricante de bombas recomendaba cambiar el sistema de impulsión a un modelo de bomba con más potencia, con una altura dinámica y potencia eléctrica superior a la existente, pero los tiempos de entrega eran muy extensos y el escenario

de solución del problema se convertiría en un evento catastrófico desde el punto de vista financiero para la compañía, por lo que se decidió optimizar el sistema de impulsión existente.

Olivera (2023), realizó un análisis del comportamiento hidráulico del fenómeno Golpe de Ariete en un sistema de impulsión de agua del Río Vilcanota hacia la ciudad del Cuzco, dicho sistema había cumplido su ciclo de vida útil, por lo que los equipos del sistema de bombeo no estarían adecuadamente protegidos contra los golpes de ariete, dejando a la ciudad desabastecida del recurso hídrico cuando el sistema trabajase al 100% de su capacidad. El análisis hidráulico permitió conocer la necesidad de instalar dispositivos de protección contra golpes de ariete como válvulas check, válvulas de aire y válvula anticipadora de onda, todo esto para mejorar las condiciones y comportamiento hidráulico del sistema de impulsión de agua del Río Vilcanota hacia la ciudad del Cuzco.

1.2. Identificación y Descripción del Problema de Estudio

Los Sistemas de Impulsión de Agua de Mar (SIAM) son infraestructuras críticas para el abastecimiento de agua dulce en zonas áridas y semiáridas, en la industria minera y otras actividades industriales que requieren grandes cantidades de agua. Estos sistemas transportan agua de mar desde la costa hasta plantas de tratamiento, donde se desaliniza y se convierte en agua dulce para uso industrial o uso de la población.

En Latinoamérica, la escasez de agua dulce es un problema cada vez más acuciante debido al crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización y los efectos del cambio climático. Los SIAM se presentan como una alternativa viable para satisfacer la creciente demanda de agua dulce en la región.

Sin embargo, la implementación y operación de SIAM conlleva diversos retos técnicos, económicos y ambientales que deben ser cuidadosamente considerados. En este contexto,

resulta fundamental identificar y describir los principales problemas asociados a los SIAM en Latinoamérica para poder desarrollar soluciones sostenibles y eficientes.

En Latinoamérica la industria chilena actualmente es el país que cuenta con la mayor calidad de SIAM para sus procesos. Algunas utilizan el agua de mar directo para sus procesos mientras otras unidades mineras utilizan agua desalinizada. Esto demuestra que Chile se encuentra a la vanguardia en Latinoamérica en cuanto al desarrollo de proyectos mineros que utilizan SIAM en sus procesos para el uso de agua de mar. El desarrollo de estos sistemas en nuestra región está impulsado por la escasez de agua dulce, el crecimiento de la industria minera y el cambio climático.

Figura 1

Sistema de Impulsión de Agua de Mar de Minera Centinela en Antofagasta en Chile



Nota: La figura muestra una vista panorámica de uno de los más importantes SIAM en Chile, Fuente: Portal Innova (2024)

Figura 2

Catastro de Plantas desalinizadoras y Sistemas de Impulsión de Agua de Mar (SIAM) en la minería de cobre en Chile

| PROPIETARIO | MINA | REGIÓN | ETAPA DE DESARROLLO | CAPACIDAD DE DESALACIÓN (lts/seg) | CAPACIDAD USO AGUA DE MAR (lts/seg) | Longitud tuberías de transporte de agua (Km) |
|----------------------|--|--------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|
| HALDEMAN | Michilla | Antofagasta | Operando | 75 | 23 | |
| ENAMI | Planta J.A. Moreno (Taltal) | Antofagasta | Operando | - | 15 | |
| LAS CENIZAS | Las Cenizas Taltal | Antofagasta | Operando | 9 | 12 | 7 |
| MANTOS DE LA LUNA | Mantos de Luna | Antofagasta | Operando | 20 | 5 | 8 |
| PAMPA CAMARONES | Pampa Camarones | Arica y Parinacota | Operando | - | 25 | 12 |
| ANTOFAGASTA MINERALS | Distrito Centinela (Esperanza + El Tesoro) | Antofagasta | Operando | 50 | 1500 | 145 |
| CAP Minería | CAP Minería y otros clientes | Atacama | Operando | 600 | | 120 |
| BHP BILLITON | Escondida - Planta Coloso | Antofagasta | Operando | 525 | - | 180 |
| ANTOFAGASTA MINERALS | Antucoya | Antofagasta | Operando | 20 ⁽¹⁾ | 280 | 145 |
| LUNDING MINING | Candelaria | Atacama | Operando | 300 | - | 110 |
| MANTOS COPPER | Mantoverde | Atacama | Operando | 120 | - | 42 |
| KGHM INT. | Sierra Gorda | Antofagasta | Operando | - | 1315 | 142 |
| BHP BILLITON | Escondida EWS | Antofagasta | Operando | 2500 ⁽²⁾ | - | 180 |
| LUNDING MINING | Candelaria 2030 - continuidad operacional | Atacama | Operando | agrega 200 (3) | - | 110 |

Nota: La figura muestra las capacidades de los SIAM en las distintas unidades mineras en Chile, Fuente: Cochilco (2020)

En el Perú, tenemos ocho plantas desalinizadoras, de las cuales solo existen tres operaciones mineras que actualmente usan agua de mar en sus procesos productivos, estas minas son Fosfatos de Bayóvar (Piura), Cerro Lindo (Ica) y Mina Justa (Ica). De acuerdo con (Bayona, 2024) “La replicación de más modelos como estos en el Perú no solo podría mitigar los conflictos por la utilización de agua continental registrados en el sector, sino que también podría ofrecer una solución sostenible y tecnológicamente avanzada para satisfacer las necesidades hídricas de proyectos similares en el país”.

A continuación, se describen los principales problemas que se tienen durante la operación de los Sistemas de Impulsión de agua de mar (SIAM):

- ✓ Alta demanda de energía: El bombeo de grandes volúmenes de agua de mar a largas distancias consume una cantidad significativa de energía, lo que aumenta los costos operativos y las emisiones de gases de efecto invernadero.
- ✓ Desgaste y corrosión: Las bombas y los componentes del sistema de bombeo están expuestos a la salinidad del agua de mar, lo que acelera el desgaste y la corrosión, requiriendo un mantenimiento frecuente y costoso.
- ✓ Cavitación: La baja presión en las tuberías puede generar cavitación, un fenómeno que provoca daños en las bombas y otros componentes del sistema.
- ✓ Problemas de funcionamiento: Las bombas pueden sufrir fallas debido a sobrecargas, variaciones en la calidad del agua de mar o la presencia de sedimentos.
- ✓ Corrosión: La salinidad del agua de mar provoca corrosión en las tuberías de acero al carbono, lo que reduce su vida útil y aumenta el riesgo de fugas.
- ✓ Bioincrustación: El crecimiento de organismos marinos en las tuberías puede reducir el flujo de agua y aumentar la presión en el sistema.
- ✓ Daños mecánicos: Las tuberías pueden sufrir daños por golpes, excavaciones o movimientos del terreno.
- ✓ Fugas: Las fugas en las tuberías pueden provocar pérdidas de agua, daños al medio ambiente y costos adicionales por reparación.

Si debido a estos problemas los sistemas de bombeo de los SIAM no funcionan correctamente, la cantidad de agua de mar que llega a la planta desalinizadora de Ósmosis Inversa (RO) puede disminuir considerablemente. Esto puede provocar una reducción en la producción de agua dulce, lo que afecta la capacidad de la planta para satisfacer la demanda.

Las fugas en las tuberías del SIAM también pueden reducir el flujo de agua de mar, lo que tiene el mismo efecto que un problema de bombeo. Por otro lado, si hay obstrucciones en las tuberías del SIAM, la presión del agua de mar también puede aumentar significativamente. Esto puede provocar daños en las tuberías y en los equipos de la planta RO. Todos estos problemas en el SIAM pueden aumentar significativamente los costos operativos de las plantas RO.

1.3. Formulación del Problema

La presente investigación, permitirá responder a las siguientes interrogantes:

1.3.1. Problema Principal

¿Qué efecto tiene la ampliación de un Sistema de Impulsión de Agua de Mar para una Planta de ósmosis inversa en el Puerto de Marcona?

1.3.2. Problemas Específicos

- a) ¿De qué manera se logra mejorar la capacidad de bombeo de agua en un Sistema de Impulsión de agua de mar existente para cubrir la demanda de agua de la Planta de Ósmosis Inversa?
- b) ¿De qué manera se puede incrementar la presión de bombeo de agua a un Sistema de Impulsión de agua de mar existente para cubrir la demanda de agua de la Planta de Ósmosis Inversa?
- c) ¿De qué manera se puede degradar el sistema de impulsión de Agua de Mar al ampliarlo para cubrir la demanda de agua de la Planta de Ósmosis Inversa?

1.4. Justificación e Importancia

El acceso a agua potable es un derecho fundamental y un elemento vital para el desarrollo humano, social y económico. En los procesos industriales como la minería, el uso de agua dulce se ha convertido en un recurso de gran importancia también a nivel nacional. Sin embargo, la escasez de agua dulce es un problema cada vez más acuciante en todo el mundo, especialmente en regiones áridas y semiáridas como el Perú.

En este contexto, la desalinización de agua de mar se presenta como una alternativa viable para aumentar la disponibilidad de agua dulce. La ósmosis inversa es una de las tecnologías de desalinización más eficientes y ampliamente utilizadas.

El presente trabajo se centra en el análisis para la ampliación de un sistema de impulsión de agua de mar, el cual podrá cubrir la demanda de agua en una planta de ósmosis inversa en el Puerto de Marcona, ubicado en el departamento de Ica. Esta investigación tiene una gran importancia debido a que el distrito de Marcona, al igual que muchas otras regiones del Perú, enfrenta una grave escasez de agua dulce. Esta situación se ve agravada por el crecimiento poblacional, el desarrollo industrial y agrícola, y los efectos del cambio climático. La ampliación del sistema de impulsión de agua de mar permitirá aumentar la producción de agua dulce en la planta de ósmosis inversa, contribuyendo a aliviar la demanda de agua para los procesos en internos de la Unidad Minera.

La desalinización de agua de mar es una tecnología sostenible que permite aprovechar un recurso abundante como es el agua de mar para obtener agua dulce. La investigación sobre la ampliación del sistema de impulsión de agua de mar contribuirá al desarrollo sostenible de la región de Marcona, pues permitirá avanzar en el conocimiento sobre el diseño y optimización de sistemas de impulsión de agua de mar para plantas de ósmosis inversa. Los resultados de la investigación podrán ser aplicados a otros proyectos de desalinización en el

Perú para la obtención de agua potable para la población y minimizando el impacto ambiental de la extracción de agua dulce de fuentes tradicionales.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica de ampliar un Sistema de Impulsión de Agua de Mar para cubrir la demanda de agua de una Planta de ósmosis inversa en el Puerto de Marcona.

1.5.2. Objetivos Específicos

- a) Analizar hidráulicamente la adición de 01 cuarta Bomba a un Sistema de Impulsión de Agua de Mar compuesto por 03 bombas para aumentar la capacidad de bombeo
- b) Determinar el incremento de la presión de bombeo del Sistema de Impulsión de Agua de Mar al adicionar 01 cuarta Bomba de similares características.
- c) Analizar la degradación producida en el Sistema de Impulsión de Agua de Mar al adicionar 01 cuarta Bomba de similares características.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

La ampliación de un sistema de impulsión de agua de mar es viable técnicamente para cubrir la demanda de agua de una Planta de ósmosis inversa en el Puerto de Marcona.

1.6.2. Hipótesis Específica

- a) La adición de 01 cuarta Bomba al Sistema de Impulsión de Agua de Mar aumenta la capacidad de bombeo del sistema.
- b) La adición de 01 cuarta Bomba al Sistema de Impulsión de Agua de Mar incrementa la presión de bombeo del sistema.
- c) La adición de 01 cuarta Bomba al Sistema de Impulsión de Agua de Mar produce degradación en el sistema.

1.7. Variables y Operacionalización de Variables

1.7.1. Variables

Variable Independiente (VI): Capacidad del sistema de impulsión de agua de mar.

Variable Dependiente (VD): Demanda de agua de la Planta de ósmosis inversa.

1.7.2. Operacionalización de Variables

Tabla 1:

Matriz de operacionalización de Variables

| Definición nominal | Definición real | Definición operacional | Dimensión | Indicadores | Técnicas e Instrumentos |
|---|--|---|---|--|---|
| VD: Demanda de agua de la Planta de ósmosis inversa | Volumen de agua que la Planta de ósmosis inversa necesita para operar a su máxima capacidad de producción | Diferencia entre el volumen de agua que la planta está diseñada para procesar por unidad de tiempo en un tiempo determinado y el volumen de agua que la planta realmente produce por unidad de tiempo en un tiempo determinado. | Volumen de agua demandada | Caudal de agua (m ³ /h) | Técnica: Revisión documental Instrumentos: Diseño de Ingeniería |
| VI: Capacidad del sistema de impulsión de agua de mar | Volumen máximo de agua de mar que el sistema de impulsión puede transportar por unidad de tiempo a la Planta de Ósmosis Inversa. | Volumen máximo de agua que el sistema puede bombear por unidad de tiempo a la presión máxima que el sistema puede generar al final de la tubería. | Capacidad de bombeo Presión de bombeo Degradamiento del sistema | Caudal de bombeo máximo (m ³ /h) Altura dinámica de trabajo NPSH (m.c.a) Vida útil del sistema (años) | Técnica: Observación Estructurada Instrumentos: Registros de observación |

Nota: Se muestra la operacionalización de la variable dependiente y la variable independiente. Fuente: Elaboración Propia

1.8. Metodología de la Investigación

1.8.1. Unidades de Análisis

La presente investigación se desarrollará en un Sistema de impulsión de agua de mar (SIAM) conformado por una estación de Bombeo ubicada cerca al muelle y una línea de tubería de acero al carbono que abastecen a una Planta de Ósmosis Inversa ubicada a 40.5 Km en una Unidad Minera, la estación de Bombeo se encuentra ubicada en el puerto de Marcona, provincia de Nazca, ubicado en el departamento de Ica.

1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de la investigación

La presente investigación tiene como objetivo específico analizar hidráulicamente los efectos de la ampliación de la capacidad de un Sistema de impulsión de agua de mar, por lo cual es una investigación aplicada y de enfoque cuantitativo porque se van a manejar cantidades numéricas.

La información recopilada será procesada utilizando Software de Diseño y Cálculos Hidráulicos, los mismos que utilizando los datos históricos y datos estadísticos de la operación del Sistema de Bombeo actual, permitirán evaluar las situaciones para cada configuración del Sistema y así obtener la configuración que mejores resultados nos brinde.

El nivel es descriptivo debido a que se describirá detalladamente las diversas formas de como ampliar y mejorar la capacidad del sistema de impulsión de agua de mar, realizando la medición y observación de las variables. También se identificarán los factores que intervienen en el proceso y sus efectos positivos o negativos.

1.8.3. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es cuantitativo debido a que se medirán las variables independientes y dependientes para relacionarlas cuantitativamente para apoyar a refutar las Hipótesis.

La modalidad es No experimental dado que no se constituye ninguna situación sino al contrario se observan las existentes.

1.8.4. Fuentes de Información

Son fuentes primarias las provenientes en forma directa por el Área de Operaciones Puerto de la Unidad minera. También información obtenida de la etapa de Diseño y Construcción del SIAM.

Son fuentes secundarias las provenientes de casos de estudio realizadas en instalaciones similares de otras Unidades Mineras.

1.8.5. Población y Muestra

Dado que el estudio se enfoca en evaluar la ampliación de un sistema de impulsión de agua de mar específico, la población podría definirse como:

Todos los Sistemas de Impulsión de agua de mar de plantas de ósmosis inversa que actualmente operan en los puertos de Latinoamérica

Para nuestro estudio, la muestra será El Sistema de impulsión de agua de mar de la planta de ósmosis inversa en el puerto de Marcona.

1.8.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Los instrumentos son los medios materiales utilizados como: reportes históricos de mantenimiento e informes, paradas de operación de los equipos, materiales y datos de fabricación, planes de Inspección y Mantenimiento.

Las técnicas son los medios empleados para la recolección de la información, en nuestro caso fue la observación de registros.

1.8.7. Análisis y Procesamiento de Datos

En esta investigación, se llevará a cabo un análisis y procesamiento exhaustivo de los datos para evaluar el impacto de la incorporación de una cuarta bomba en el Sistema de Impulsión de Agua de Mar en el puerto de Marcona. El enfoque metodológico se detalla a continuación:

Recolección de Datos: Para este estudio, se recopilarán dos tipos de datos: operativos e históricos. Los datos operativos incluirán mediciones en tiempo real de variables como el caudal y la presión antes y después de la instalación de la nueva bomba. Los datos históricos proporcionarán información sobre el rendimiento previo del sistema, ofreciendo un punto de comparación.

Análisis de Datos: Para el análisis se utilizarán medidas estadísticas básicas para describir y resumir los datos recogidos para comparar las medidas de rendimiento del sistema antes y después de la adición de la nueva bomba. También se empleará software especializado para simular el comportamiento del sistema con la cuarta bomba, evaluando posibles cambios en la dinámica del flujo y la presión.

Procesamiento de Datos: Este paso incluye la limpieza y preparación de los datos para el análisis. Se verificará la calidad de los datos, eliminando o corrigiendo valores atípicos o faltantes. Los datos de diferentes fuentes se integrarán en un conjunto de datos coherente, que será transformado según sea necesario para facilitar el análisis.

Interpretación de los Resultados: Los resultados se interpretarán para determinar cómo la adición de la cuarta bomba afecta la capacidad y la eficiencia del sistema. Se prestará especial atención a cualquier cambio en la fiabilidad del sistema y a la identificación de posibles ajustes operativos necesarios.

Documentación: Todos los procedimientos y análisis serán documentados meticulosamente. Los resultados se presentarán en Capítulo IV, incluyendo tablas y gráficos que ilustren los hallazgos de manera clara y efectiva.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. Bases Teóricas

2.1.1. Escasez de agua y desalinización

2.1.1.1. Escasez de agua en el Mundo y en el Perú.

El agua dulce es un recurso vital para la vida humana, el desarrollo social y económico, y la preservación de los ecosistemas (Gleick, 1993). Sin embargo, su disponibilidad se encuentra seriamente amenazada por diversos factores como: el crecimiento poblacional, la industrialización, la agricultura y el cambio climático (Muller et al., 2011).

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha alertado sobre la grave situación que enfrenta la humanidad en relación con el agua dulce. Según la ONU, alrededor de 2.300 millones de personas viven en condiciones de estrés hídrico moderado o severo, y se estima que esta cifra podría aumentar a 4.000 millones para el año 2050 (WWAP, 2014).

Perú no es ajeno a esta problemática. La escasez de agua es un problema que afecta a diversas regiones del país, especialmente en las zonas áridas y semiáridas (MDPyR, 2016). Según el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, el 43% de la población peruana vive en zonas con escasez de agua, y se estima que esta cifra podría aumentar a 52% para el año 2030 (MDPyR, 2016).

2.1.1.2. La desalinización como alternativa de obtención de agua dulce

La desalinización, proceso que consiste en la eliminación de la sal del agua de mar para obtener agua dulce, surge como una alternativa viable para

aumentar la disponibilidad de este recurso vital en regiones que enfrentan escasez hídrica (Gómez, 2013).

Existen diversas tecnologías de desalinización, entre las que destaca la ósmosis inversa como una de las más eficientes y ampliamente utilizadas (Wilf, 2016). La ósmosis inversa se basa en el principio de la presión osmótica para separar el agua de la sal disuelta en el agua de mar (Wilf, 2016).

2.1.2. Plantas de Ósmosis Inversa (RO)

La ósmosis inversa es una tecnología de desalinización que utiliza membranas semipermeables para eliminar selectivamente sales y otros contaminantes del agua, produciendo agua potable de alta calidad a partir de fuentes salinas como el agua de mar. Este proceso es esencial en áreas donde el agua dulce es escasa y se ha establecido como un método eficaz y sostenible para enfrentar la creciente demanda de agua limpia (Mastropietro et al., 2021).

Un aspecto crítico de la ósmosis inversa es su eficiencia energética. Las configuraciones de múltiples etapas y los procesos de circuito cerrado han demostrado ser capaces de reducir significativamente el consumo de energía en comparación con sistemas tradicionales de una sola etapa, lo que resulta crucial para mejorar la sostenibilidad de las plantas de desalinización en todo el mundo (Gosling y Arnell, 2016).

2.1.2.1. Componentes y Funcionamiento de una Planta RO

Las plantas de ósmosis inversa desempeñan un papel importante en la desalinización del agua, especialmente en regiones con escasez de agua

dulce. Estos sistemas se componen principalmente de varias partes que trabajan en conjunto para eliminar las sales y otros contaminantes del agua.

Componentes principales:

- a) **Pretratamiento:** Esta etapa prepara el agua cruda eliminando partículas y sustancias que podrían dañar o ensuciar las membranas de ósmosis inversa. Estos incluyen filtros de arena y sistemas de dosificación de productos químicos para controlar la formación de incrustaciones y bioincrustaciones.
- b) **Módulos de Membranas de Ósmosis Inversa:** Son el corazón de la planta, donde ocurre la separación del agua y los solutos. Las membranas semipermeables solo permiten el paso del agua, reteniendo la mayoría de las sales y contaminantes.
- c) **Sistemas de Presión:** Incluyen bombas que elevan la presión del agua a niveles necesarios para superar la presión osmótica natural del agua salada, permitiendo que el agua se desplace a través de las membranas.
- d) **Post-tratamiento y Monitoreo:** Después de la filtración, el agua puede necesitar ajustes en su calidad, como pH y desinfección, antes de considerarse potable. Además, se monitorea constantemente para asegurar su calidad y el correcto funcionamiento del sistema.
- e) **Manejo de Concentrado:** El agua residual concentrada en sales (conocida como concentrado o salmuera) debe ser manejada adecuadamente para minimizar el impacto ambiental.

El proceso de ósmosis inversa utiliza una bomba de alta presión para forzar el agua a través de las membranas, rechazando sales y otros contaminantes, que son drenados como concentrados. El agua desalinizada,

conocida como permeado, se recoge para su uso. Esta tecnología no solo es efectiva sino también adaptable a fuentes de energía renovables para reducir su huella de carbono.

Estas instalaciones son fundamentales en la gestión sostenible del agua, enfrentando desafíos como la escasez de agua dulce agravada por el crecimiento poblacional y el cambio climático.

2.1.2.2. Factores que afectan el Funcionamiento de una Planta RO

El funcionamiento de una planta de ósmosis inversa puede verse afectado por múltiples factores que influyen en su eficiencia y efectividad. A continuación, se describen algunos de estos factores basados en estudios recientes:

- a) **Calidad del agua de alimentación:** Las impurezas presentes en el agua de alimentación, como sedimentos, sales y contaminantes biológicos, pueden obstruir o dañar las membranas. Es importante un pretratamiento adecuado para minimizar estos riesgos (Valdés et al, 2021).
- b) **Temperatura:** La temperatura del agua influye directamente en la viscosidad del agua y, por ende, en la presión requerida para el proceso. A temperaturas más altas, se necesita menos presión para lograr la misma producción de permeado, lo que puede afectar la calidad del mismo al aumentar la tasa de difusión de los sólidos disueltos (Yokogawa, 2021).
- c) **Presión operativa:** La presión es crucial para forzar el agua a través de las membranas. Los cambios en la presión pueden afectar la eficiencia del proceso y la calidad del agua producida. Un manejo inadecuado de la

presión puede llevar a un mayor consumo de energía y desgaste acelerado de las membranas (Yokogawa, 2021).

- d) **Conductividad y pH:** Son parámetros importantes para monitorear la calidad del agua. Variaciones en estos indicadores pueden señalar la presencia de contaminantes o cambios en la composición del agua que podrían afectar el proceso de ósmosis inversa (Yokogawa, 2021).
- e) **Rechazo de contaminantes y recuperación de agua:** La eficiencia en la remoción de contaminantes y la tasa de recuperación de agua limpia son indicadores clave de rendimiento. Un bajo rechazo de contaminantes o una baja recuperación pueden indicar problemas en las membranas o en la configuración del sistema (Valdés et al, 2021).

Estos factores deben ser cuidadosamente controlados y optimizados para garantizar la operación eficiente de una planta de ósmosis inversa y prolongar la vida útil de sus componentes.

2.1.3. Sistema de Impulsión de Agua de Mar (SIAM)

Los sistemas de impulsión de agua de mar, fundamentales en instalaciones como las plantas de desalinización, están diseñados para optimizar tanto la captación como el tratamiento del agua antes de su uso o procesamiento adicional. Estos sistemas deben manejar exitosamente varios desafíos técnicos y ambientales para minimizar su impacto en el ecosistema marino y garantizar la eficiencia operativa.

Uno de los principales factores a considerar en el diseño de estos sistemas es la protección de la vida marina. La implementación de tapas de velocidad en las estructuras de entrada ayuda a mitigar el impacto sobre la vida acuática, reduciendo la velocidad del agua en la entrada y disminuyendo así el impacto de organismos

marinos. Estas tapas ajustan el flujo de agua de vertical a horizontal, lo cual es menos probable que atrape a los peces y otros organismos (Lee Hooi Chie & Ahmad Khairi Abd Wahab, 2020).

Además, el rendimiento hidráulico de los sistemas de admisión de agua de mar se optimiza mediante el uso de modelado CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), que permite diseñar con precisión los patrones de flujo, la severidad de los vórtices y otros aspectos técnicos relevantes para Minimice problemas como la formación de vórtices y la cavitación en las bombas. Este tipo de modelado ayuda a prevenir y resolver problemas hidráulicos que podrían surgir de condiciones de operación variadas, asegurando que el diseño sea eficiente en diferentes escenarios operativos (Omid Aminoroayaie Yamini et al., 2022).

Finalmente, es esencial evaluar y seleccionar el sitio adecuado para la toma de agua de mar, considerando características físicas del sitio y datos meteorológicos y oceanográficos. Esto incluye entender cómo la variabilidad en la profundidad del agua y las condiciones del lecho marino afectan la construcción y operación del sistema de toma. Los cambios en la profundidad del agua debido a mareas y otros factores pueden influir significativamente en la eficacia con la que se capta el agua y se minimizan los impactos ambientales.

2.1.3.1. Componentes y Funcionamiento de un SIAM

Los componentes principales de un sistema de impulsión de agua de mar para instalaciones de desalinización incluyen varios elementos críticos que aseguran su funcionamiento efectivo:

- a) **Estructuras de toma de agua:** Estas estructuras pueden ser superficiales, captando agua directamente de la superficie del mar, o subsuperficiales, ubicadas bajo el lecho marino o en la playa, lo cual ayuda a prefiltrar el agua captada. La elección entre estos tipos depende de factores como la calidad del agua deseada, el impacto ambiental y las condiciones geográficas del sitio de instalación (American Water Works Association, 2019).
- b) **Sistemas de bombas y tuberías:** Las bombas son esenciales para transportar el agua desde la fuente hasta la planta de tratamiento o desalinización. Las tuberías deben estar diseñadas para manejar la salinidad y otras condiciones corrosivas del agua de mar. La configuración de estas bombas y tuberías debe considerar aspectos como la minimización de vórtices y la uniformidad del flujo para evitar daños y desgaste (Yamini et al, 2022).
- c) **Sistemas de filtrado y pretratamiento:** Antes de que el agua de mar entre en los procesos de desalinización, a menudo necesita pasar por varias etapas de filtrado para eliminar sedimentos, algas y otros contaminantes. Esto es crucial para proteger las membranas de ósmosis inversa y otros componentes sensibles de la planta (OceanBestPractices Repository, 2019).

Estos componentes son fundamentales para garantizar que el sistema de impulsión de agua de mar opere de manera eficiente y efectiva, minimizando los impactos ambientales y asegurando la sostenibilidad del suministro de agua.

2.1.3.2. Factores que afectan el Funcionamiento de un SIAM

El funcionamiento de los sistemas de impulsión de agua de mar puede verse afectado por varios factores críticos, que son fundamentales para

garantizar su eficiencia y sostenibilidad. Aquí se presentan algunos de estos factores basados en estudios recientes:

- a) **Condiciones medioambientales y geográficas:** Las características geográficas y las condiciones medioambientales del lugar, como la salinidad, la temperatura del agua y la calidad del agua marina son importantes. Estos factores influyen directamente en la selección del sitio y en el diseño del sistema de toma de agua, debido a su impacto en los costos de pretratamiento y operación. Las áreas con alta sedimentación o actividad biológica pueden requerir sistemas de filtrado más complejos para proteger las membranas de ósmosis inversa y otros componentes sensibles.
- b) **Diseño hidráulico y CFD:** El uso de modelado por Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es crucial para optimizar el diseño hidráulico de los sistemas de toma de agua. Este modelado ayuda a identificar y resolver problemas potenciales como vórtices y pre-torbellinos, que pueden afectar la eficiencia de las bombas y la vida útil del equipo. La correcta disposición y diseño de las entradas y salidas del sistema, así como la adecuada separación en las bombas, son esenciales para mantener un flujo uniforme y minimizar los problemas operativos (Yamini et al, 2022).
- c) **Impacto ambiental y regulaciones:** La regulación del impacto ambiental también es un factor importante. Las directrices y regulaciones diseñadas para minimizar el impacto sobre la vida marina, como la implementación de tapas de velocidad que alteran el flujo de entrada de vertical a horizontal, son esenciales para reducir la captura accidental de vida marina y cumplir con las normativas ambientales (Chie et al, 2020).

Estos factores deben considerarse cuidadosamente durante la planificación, diseño y operación de los sistemas de impulsión de agua de mar

para asegurar no solo la eficacia operativa, sino también la sostenibilidad ambiental.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Sistema de Impulsión de Agua de Mar (SIAM)

Un sistema de impulsión de agua de mar está diseñado para extraer agua del océano y transportarla hacia instalaciones de tratamiento o desalinización. Estos sistemas incluyen componentes como bombas, tuberías y válvulas, que están adaptados para manejar las propiedades corrosivas del agua de mar y sus impurezas. Según Stewart et al. (2021), la eficiencia y sostenibilidad de estos sistemas son críticas para garantizar un suministro constante y confiable de agua, especialmente en áreas donde los recursos hídricos son escasos

2.2.2. Análisis Hidráulico en Estado Estable

Este tipo de análisis se enfoca en evaluar las condiciones hidráulicas de un sistema cuando alcanza un equilibrio dinámico, es decir, cuando las variables de flujo y presión permanecen constantes a lo largo del tiempo. En el contexto de sistemas de impulsión de agua de mar, el análisis en estado estable es crucial para determinar la capacidad del sistema para manejar el flujo deseado sin sobre estresar los componentes. Según Stewart et al. (2021), entender el comportamiento del sistema bajo estas condiciones permite optimizar el diseño y operación de las bombas y tuberías, asegurando que el sistema sea capaz de entregar el rendimiento necesario de manera eficiente y confiable.

2.2.3. Análisis Hidráulico en Estado Transitorio

Este análisis trata de los cambios temporales en el flujo y la presión dentro del sistema, los cuales pueden ocurrir debido a operaciones como el arranque o parada de bombas, o la apertura o cierre de válvulas. Los eventos transitorios pueden inducir golpes de ariete, que son picos de presión potencialmente destructivos. Según investigaciones en hidráulica, es esencial modelar estos eventos para diseñar sistemas que minimicen los riesgos asociados con las variaciones rápidas de presión y asegurar la integridad estructural de la infraestructura (Stewart et al., 2021).

2.2.4. Bomba de Desplazamiento Positivo

Estas bombas son esenciales en aplicaciones que requieren un flujo constante a pesar de las variaciones en la presión del sistema. Operan desplazando un volumen fijo de fluido en cada ciclo, lo cual las hace ideales para sistemas de ósmosis inversa donde se requieren presiones altas y precisas para el proceso de desalinización. La investigación de Valdés et al. (2021) destaca la importancia de seleccionar bombas que puedan manejar las características corrosivas del agua de mar, además de proporcionar un rendimiento constante y confiable bajo diversas condiciones operativas.

2.2.5. Ósmosis Inversa

La ósmosis inversa es un proceso tecnológico fundamental para la desalinización del agua, que permite separar los solutos del solvente a través de una membrana semipermeable. La presión aplicada en el proceso es superior a la presión osmótica natural, lo que permite revertir el flujo natural del agua, forzándola a moverse

desde una solución más concentrada hacia una menos concentrada, dejando atrás los solutos como la sal. Este mecanismo es esencial en áreas con escasez de agua, donde la tecnología de membranas ha evolucionado para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la desalinización (Heiranian et al., 2023).

2.2.6. *Fiabilidad del Sistema*

La confiabilidad de un sistema de impulsión de agua de mar se refiere a su capacidad para funcionar correctamente bajo las condiciones previstas, durante un período específico. En el contexto de sistemas de ósmosis inversa, la confiabilidad es crucial debido a las exigentes condiciones operativas y el ambiente corrosivo del agua de mar. Un sistema confiable que minimiza los tiempos de inactividad y los costos de mantenimiento, aspectos esenciales para la sostenibilidad operativa y económica de las instalaciones de desalinización. La incorporación de una bomba adicional en configuración de stand-by o paralelo puede aumentar significativamente la confiabilidad del sistema, proporcionando redundancia y capacidad adicional en caso de falla de alguna de las bombas existentes (Heiranian et al., 2023).

2.2.7. *Caudal*

El caudal, o flujo volumétrico, en un sistema de impulsión de agua de mar, es una medida de la cantidad de agua transportada por unidad de tiempo. Es un factor determinante en el diseño y la operación de sistemas de desalinización, donde se requiere un caudal específico para alcanzar los objetivos de producción de agua. El análisis del caudal en estado estable y transitorio ayuda a entender y optimizar el rendimiento del sistema, asegurando que las capacidades de las bombas y tuberías sean adecuadas para manejar las cargas hidráulicas sin sobrepasar los límites de seguridad y operativa (Stewart et al., 2021).

2.2.8. Golpe de Ariete

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico que ocurre cuando hay un cambio brusco en la velocidad del fluido dentro de una tubería, particularmente causado por el cierre rápido de válvulas o el arranque/parada de bombas. Este fenómeno puede provocar aumentos repentinos de presión que potencialmente dañan la infraestructura del sistema. La adecuada comprensión y mitigación del golpe de ariete son críticos para el diseño de sistemas de impulsión de agua de mar robustos y seguros, especialmente en aplicaciones de alta presión como la ósmosis inversa, donde los efectos pueden ser particularmente severos debido a las altas presiones operativas. (Valdés et al., 2021).

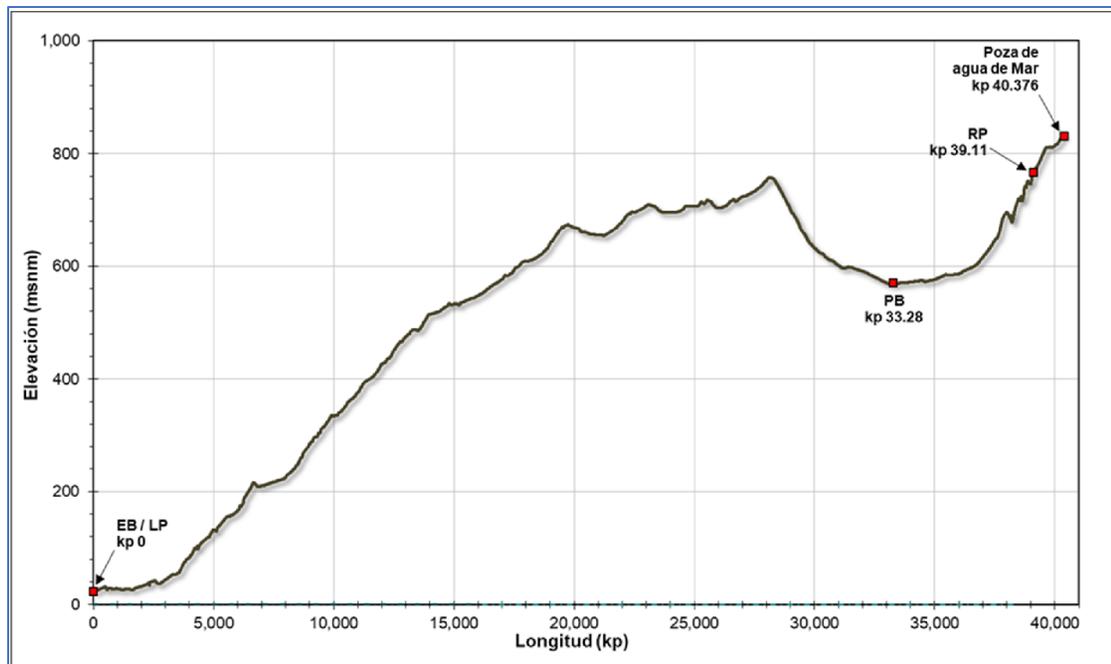
CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El SIAM existente está conformado principalmente por 03 bombas en paralelo, 03 válvulas de control de flujo existentes, 01 válvula de seguridad, 01 variador de frecuencia existente, 02 pozas de emergencia y sistema de tubería (pipeline) de aproximadamente 40.5km.

La ruta asociada al sistema de impulsión existente inicia en la estación EB ubicada en el puerto a una altitud de 26 msnm y con dirección a la poza de agua de mar ubicada en la mina a una altura de 832 msnm, haciendo un recorrido total aproximado de 40.5 km. En la Figura 3 se muestra el perfil longitudinal del SIAM desde la EB hasta la descarga en la poza de agua de proceso.

Figura 3

Diagrama de Perfil longitudinal del SIAM actual



Nota: Se muestra el perfil actual desde la estación EB hasta la Poza de agua de Mar.
Fuente: SSK Proyectos (2021)

Analizaremos el comportamiento hidráulico en estado estable del Sistema de Impulsión de Agua de Mar (SIAM), al incrementar 01 bomba de similares características a las instaladas actualmente, luego determinaremos el caudal máximo disponible al operar las cuatro bombas en simultáneo.

Esta ampliación es requerida debido a la necesidad de tener una bomba en stand-by para asegurar una mejor fiabilidad del sistema. Por otro lado, debido al incremento de la demanda de agua de mar, en la planta de procesos, se requiere evaluar cuánto caudal adicional se puede lograr con esta cuarta bomba a instalar, siendo la necesidad del cliente alcanzar un flujo de 1066 m³/h.

Algunas definiciones y abreviaciones son:

- EB: Estación de Bombas.
- HDPE: High Density Polyethylene (Polietileno de Alta Densidad)
- HGL: Hydraulic Grade Line (Línea de Gradiente Hidráulico)
- HP: Horse power.
- Golpe de ariete / Transitorio: Fenómeno hidráulico de aceleración y desaceleración brusco del flujo que provoca ondas de presión en líneas de impulsión debido a: cierres rápidos de válvulas, partidas o paradas de equipos de bombeo, etc., pudiendo sobrepasar las presiones admisibles de las instalaciones (tuberías, equipos) y provocar daños.
- LP: Lanzador PIG.
- MAOH: Maximum Allowable Operating Head (Presión de operación máxima admisible, en mca).
- MAOP: Maximum Allowable Operating Pressure (Presión de operación máxima admisible, en psi)

- mca: Metros Columna de Agua
- mm: Milímetros
- msnm: Metros Sobre Nivel del Mar
- mpy: Mils per year (milésima de pulgada por año)
- OD: Outside Diameter (Diámetro externo)
- PB: Punto bajo
- psi: Pounds per square inch.
- RP: Receptor PIG
- PIG: Pipeline Inspector Gauge (Indicador de inspección de tubería)
- PPI: Plastic Pipe Institute (Instituto de la tubería plástica)
- SDR: Standard Dimension Ratio (factor de dimensión aplicado a tuberías de HDPE)
- SIAM: Sistema de Impulsión de Agua de Mar
- SMYS: Specified Minimum Yield Stress (esfuerzo de rendimiento mínimo especificado)
- TDH: Total Dynamic Head. Altura dinámica total requerida por un sistema de bombeo para impulsar un flujo determinado.
- VFD: Variable Frequency Drive (Variador de Frecuencia)
- t: Wall thickness (espesor de pared, aplicado a tuberías).

3.1. Análisis Hidráulico en Estado Estable

3.1.1. Descripción General

El sistema ha sido diseñado para operar en 02 etapas, la etapa 1 se da desde el inicio de la operación hasta el último día del año 3 y la segunda etapa se da después de concluido el año 3 hasta el último día del año 20. Las etapas 1 y 2 consideran distinto

diámetro de impulsor. Este cambio de diámetros es para lograr la mejor eficiencia en cada una de las etapas, las cuales están sujetas a caudales de diseño distintas.

Etapla 1: 0 a 3 años (Caudal de diseño = 941 m³/h)

- Impulsores de diámetro 267mm (Actualmente instalados).
- 01 bomba: Cuando el SIAM opera con 01 bomba el variador de frecuencia ejerce control sobre la misma para regular un caudal máximo de 375 m³/h.
- 02 bombas: Cuando el SIAM opera con 02 bombas el variador de frecuencia se encarga de hacer arrancar las bombas de modo secuencial (arranque en cascada). Luego, las válvulas de control se encargan de regular el flujo a 375 m³/h a la salida de cada bomba.
- 03 bombas: Cuando el SIAM opera con 03 bombas el variador de frecuencia se encarga de hacer arrancar las bombas de modo secuencial (arranque en cascada). Luego, las válvulas se control son seteadas al flujo de 314 m³/h a la salida de cada bomba.

Etapla 2: 3 a 20 años (Caudal de diseño = 900 m³/h)

- Impulsores de diámetro menor a 267mm (Futuro).
- 01 bomba: Cuando el SIAM opera con 01 bomba el variador de frecuencia ejerce control sobre la misma para regular un caudal máximo de 375 m³/h.
- 02 bombas: Cuando el SIAM opera con 02 bombas el variador de frecuencia se encarga de hacer arrancar las bombas de modo secuencial (arranque en cascada). Luego, las válvulas de control se encargan de regular el flujo a 375 m³/h a la salida de cada bomba.
- 03 bombas: Cuando el SIAM opera con 03 bombas el variador de frecuencia se encarga de hacer arrancar las bombas de modo secuencial (arranque en

cascada). Luego, las válvulas de control son seteadas al flujo de 300 m³/h a la salida de cada bomba.

Nota: Se debe tomar en consideración que estos valores fueron extraídos del reporte hidráulico del Cliente, en el cual se calculó con una curva distinta de bomba. Se consideró mantener estos valores solo como punto de partida para el análisis, pero los valores ajustados a la curva real de la bomba serán los reportados en el presente análisis.

Debido al nuevo requerimiento, que considera instalar una cuarta bomba en paralelo, en el presente documento se hace un análisis del comportamiento hidráulico del sistema. El SIAM futuro considera 01 bomba adicional, 01 variador adicional, 01 válvula de control de flujo adicional, 01 válvula de seguridad adicional y las tuberías, accesorios y la instrumentación necesaria para el correcto funcionamiento del sistema.

En esta etapa solo se ha visto conveniente realizar un análisis en estado estable, con la finalidad de evaluar si el sistema cumplirá con las expectativas del cliente. Este análisis nos dará un buen panorama del comportamiento del sistema; sin embargo, no reemplaza al análisis en estado transitorio y al análisis de flexibilidad que se deberá realizar a futuro para garantizar la correcta operación del nuevo arreglo de bombas.

Este análisis no se subdividirá en etapas porque se considerará las curvas de los impulsores actualmente instalados (270mm) en las bombas. Además, debido al aumento de demanda de caudal no es aceptable realizar un cambio a impulsores de menor diámetro.

3.1.2. Límites de Batería

El sistema tiene los siguientes límites de batería:

Desde: Brida de descarga del tanque intermedio alimentado por la captación de agua de mar.

Hasta: Descarga en el reservorio (piscina o tanque) de agua de mar en planta concentradora.

Las evaluaciones incluyen las instalaciones intermedias a lo largo del sistema de tuberías comprendidas por:

- Estaciones de Bombas (EB).
- Tubería de impulsión.
- Puntos bajos (PB).
- Lanzador / Receptor PIG.

3.1.3. Bases y Criterios de Diseño

Las bases y criterios de diseño se mantendrán conforme al “Reporte Hidráulico Estado Estable SIAM” del Cliente, a continuación, se muestra la información más relevante.

3.1.3.1. Datos de Entrada

Flujos requeridos: El sistema fue diseñado para cumplir los requerimientos de flujo que se muestran a continuación:

- **Año 0 - 3**

Balance/Nominal: 874 m³/h

Diseño/Máximo: 941 m³/h

- **Año 3 - 20**

Balance/Nominal: 801 m³/h

Diseño/Máximo: 900 m³/h

Actualmente, se tiene la necesidad de incrementar una bomba de similares características con la finalidad de mejorar la fiabilidad del sistema y a su vez validar si es que es posible transportar un caudal mayor al actual. Por tal razón, el nuevo flujo a transportar no será un dato de entrada, por el contrario, será un valor por calcular en el presente trabajo de investigación.

- **Vida Útil: 20 años***

Este valor incluye el tiempo desde que el sistema entró en funcionamiento con 03 bombas.

- **Características del Agua:** Se detallan en Tabla N°2

Tabla N°2

Características del Agua de Mar

| Propiedad | Valor |
|--------------------------|--------------|
| Temperatura (°C) | 12-18 |
| SG (ton/m ³) | 1.025 |
| Viscosidad Dinámica (cP) | 1.18 |

Nota: Se muestran las propiedades del agua de mar correspondiente a una temperatura de 15°. Fuente Imarpe (2023)

3.1.3.2. Base de Diseño Hidráulico / Pipeline

En la Tabla N°3 se muestra la información de las bases de diseño hidráulico/pipeline usado para el desarrollo del análisis:

Tabla N°3

Bases de diseño del sistema de tubería - Pipeline

| Propiedad | Descripción | |
|------------------------|---|--|
| Material de la tubería | Acero al Carbono API 5L X70 | HDPE PE4710 |
| Recubrimiento interno | Acero desnudo con sobre espesor | N/A |
| Recubrimiento externo | Tricapa de Polietileno | N/A |
| Rugosidad | Tubería nueva (0.05mm): Únicamente al inicio de la operación. Condición de diseño (1.0mm): Máxima rugosidad operativa admisible. Cuando el sistema está por sobre esta condición, se requerirá de un PIG de limpieza | |
| Tasas de corrosión | 12.0 mpy (desde kp 0+000 al 10+000) 7.0 mpy (desde kp 10+000 hasta el final del tramo de acero al carbono) | |
| Holguras de HGL | Para la condición de estado estable, el diseño considera una holgura mínima de 30 mca entre el HGL y MAOH para operación normal y para condiciones eventuales se considera una holgura mínima permisible de 10 mca entre el HGL y el MAOH transiente. | |
| | $MAOP = \frac{2 \cdot t \cdot S_y}{OD} \cdot F_d$ | |
| | $MAOP = \frac{2 \cdot S}{SDR - 1}$ | |
| Presiones admisibles | Donde: Sy: Esfuerzo de fluencia (70 000 psi) para la tubería API 5L X70. Fd: Factor de diseño según ASME B31.4. En operación normal, Df = 0.80. Para operación eventual 10% adicional | Donde: S: Esfuerzo de diseño, para resina PE4710, S = 1000 psi. |

Nota: Se muestran bases del diseño hidráulico para el pipeline, estos valores corresponden a un sistema de tuberías que incluyen inhibidores corrosivos. Fuente: SSK Proyectos (2021)

3.1.3.3. Fundamentos Hidráulicos

Se presentan las condiciones teóricas y recomendaciones de buenas prácticas aceptadas en la industria:

- Pérdidas de carga: Las pérdidas de carga debido a la fricción se calculan a partir de las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White.
- Factores de seguridad:
 - ✓ FS a la longitud de la tubería: 2%
 - ✓ FS a las pérdidas de carga por fricción: 3%
- Sobrepresión: La sobrepresión se calculará a través de un análisis transitorio.
- Potencia consumida: la potencia consumida de bombeo se calcula como:

$$P = \frac{\gamma * Q * TDH}{\eta_t}$$

Donde:

γ : Peso específico del fluido, (N/m³)

Q: Caudal, (m³/s)

TDH: Altura dinámica total, (mca)

η_t : Eficiencia global del sistema de bombeo

- La eficiencia global del sistema de bombeo se define como:

$$\eta_t = \eta_b * \eta_e$$

Donde:

η_b : Eficiencia de la bomba (según curva del vendor)

η_e : Eficiencia al eje de la bomba (se adopta un valor de 0.96, debido a la transmisión directa)

- Para la selección del motor (potencia instalada, P_{inst}) se considera un 19% sobre la potencia consumida (P); $P_{inst} = 1.1 * P$

- La carga en la succión de las bombas queda definida principalmente por el NPSH requerido por las bombas para su funcionamiento. El cual debe cumplir el siguiente criterio:

$$NPSH_a \geq 1.1 * NPSH_r$$

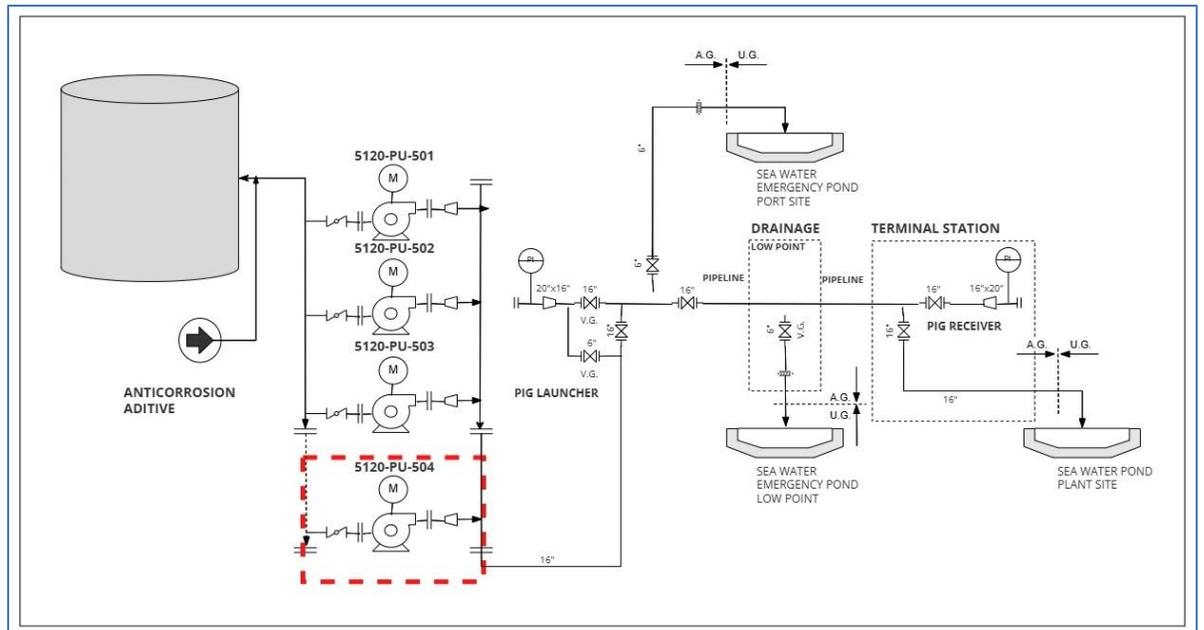
3.1.4. Configuración del Sistema

3.1.4.1. Bombas

El sistema de impulsión actual consta de 03 bombas API 610, que trabajan en paralelo, las cuales tienen los TAGs 5120-PU-501, 5120-PU-502 y 5120-PU-503. Por requerimiento de la Planta de Osmosis Inversa se tiene planeado instalar una cuarta bomba de similares características, la cual operará en paralelo a las 03 existentes.

Figura 4

Diagrama de Proceso del SIAM actual



Nota: Configuración del sistema a evaluar. En color rojo la bomba a incrementar.
Fuente: SSK Proyectos (2021)

3.1.4.2. Sistema de tuberías (Pipeline)

El sistema de tuberías se mantendrá conforme a las instalaciones existentes. A continuación, se muestra las características del sistema de tuberías (pipeline).

Tabla N°4

Características del Sistema de Tuberías Existente

| Parámetro | Valor | | |
|--------------------|---|--|----------------------------|
| Material | Acero al carbón API 5L Gr. X70 | Acero al carbón API 5L Gr.X70 | HDPE PE4710 |
| Diámetro nominal | 16" | 18" | 20" |
| Diámetro externo | 16.000" | 18.000" | 20.000" |
| Espesores de pared | 0.500" (kp: 0+000–5+000) 0.469" (kp: 5+000–10+000) | 0.344" (kp: 10+000–16+000) 0.281" (kp: 16+000–19+500) 0.250" (kp: 19+500–39+110) | SDR 11 (kp: 39+110–40+376) |

Nota: Se muestran las dimensiones y materiales de las tuberías que componen el sistema,
Fuente: SSK Proyectos (2021)

3.1.4.3. Variador de Frecuencia

Actualmente, el sistema dispone de un variador de frecuencia que está conectado a las tres bombas y se encarga de controlar el arranque y parada secuencial de las mismas; así como también, del control de velocidad cuando está una sola bomba operando. Para la cuarta bomba se tiene previsto un variador de frecuencia nuevo por instalar.

3.1.4.4. Válvula de Control

La ficha técnica indica que las válvulas de control están preparadas para controlar flujos del rango de 300 m³/h a 380 m³/h.

Estos valores son resultado de una óptima selección de estas de acuerdo con los caudales a manejar con 02 y 03 bombas.

Emerson, el proveedor de las válvulas, realizó las simulaciones correspondientes y determinó que las válvulas existentes podrán seguir operando a las nuevas condiciones hidráulicas. Además, la nueva válvula será de similares características a las 03 existentes.

3.1.4.5. Válvula de Seguridad

El nuevo manifold de descarga contará con una válvula de seguridad seteada a 2100 psi. Este valor se determinó en conjunto con el proveedor de la bomba (Trillium) con la finalidad de proteger la misma.

Asimismo, se vio conveniente que la válvula de seguridad, del manifold de descarga existente, se recalibre a 2100 psi o en su defecto se adquiera otra válvula de seguridad seteada a este valor.

3.1.4.6. Tanque de Agua de Mar

Se mantiene conforme a las instalaciones existentes; sin embargo, se sugiere corroborar su capacidad para el funcionamiento del sistema con 04 bombas en simultáneo. En el análisis para 03 bombas de la instalación existente, se indica que el Tanque debe estar preparado para un tiempo de retención no menor a 15 minutos.

3.1.5. Cálculo Hidráulico en Estado Estable

El análisis hidráulico con 03 bombas se realizó en dos etapas (Etapa 1: 0-3 años y Etapa 2: 3 a 20 años), debido a que se tenía previsto una disminución de caudal después de concluido el tercer año, considerando así diámetros distintos de los

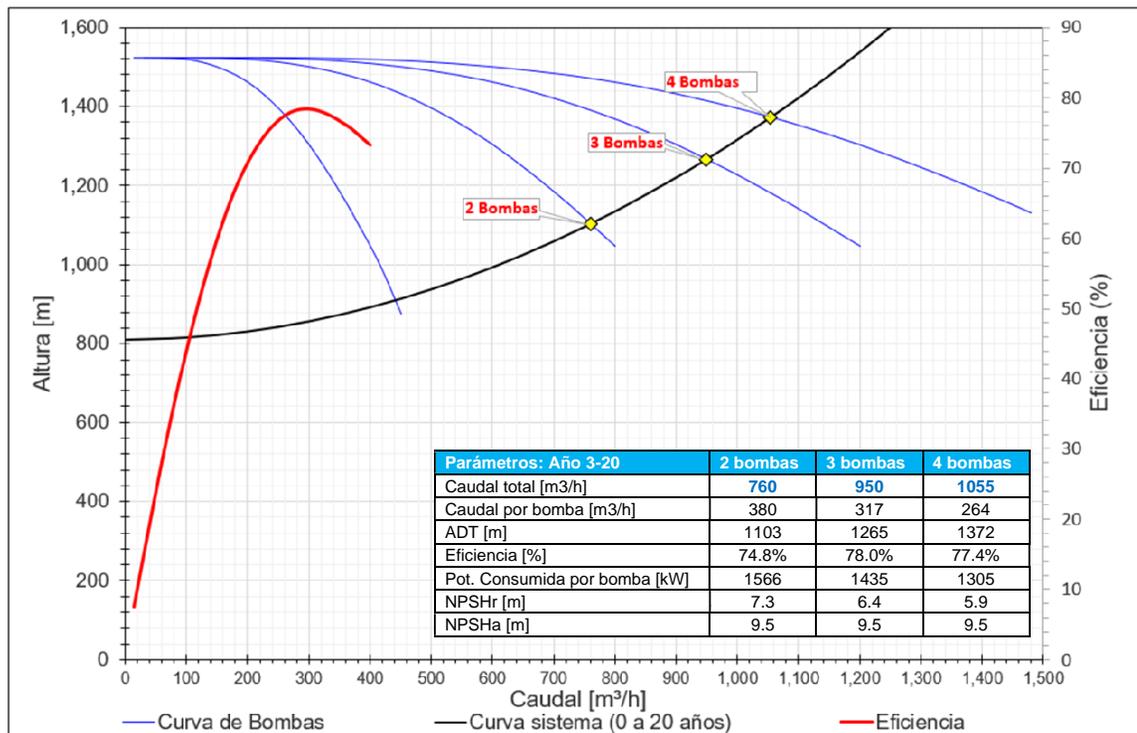
impulsores para cada etapa; sin embargo, actualmente, se requiere aumentar el caudal. Por esta razón, el análisis hidráulico para 04 bombas se realizará como si fuera una sola etapa, considerando las curvas de rendimiento para el diámetro de impulsor de las bombas que actualmente están operando (270 mm).

3.1.5.1. Caudal Máximo Disponible

Para encontrar el caudal máximo disponible del sistema, al incrementar la cuarta bomba, se intersecará la curva del sistema con la curva de las cuatro bombas trabajando en paralelo. La intersección de estas curvas es el punto de operación del sistema, su proyección en el eje X es el caudal de operación y su proyección en el eje Y es la altura dinámica de trabajo.

Figura 5

Curva de Operación bombas / sistema

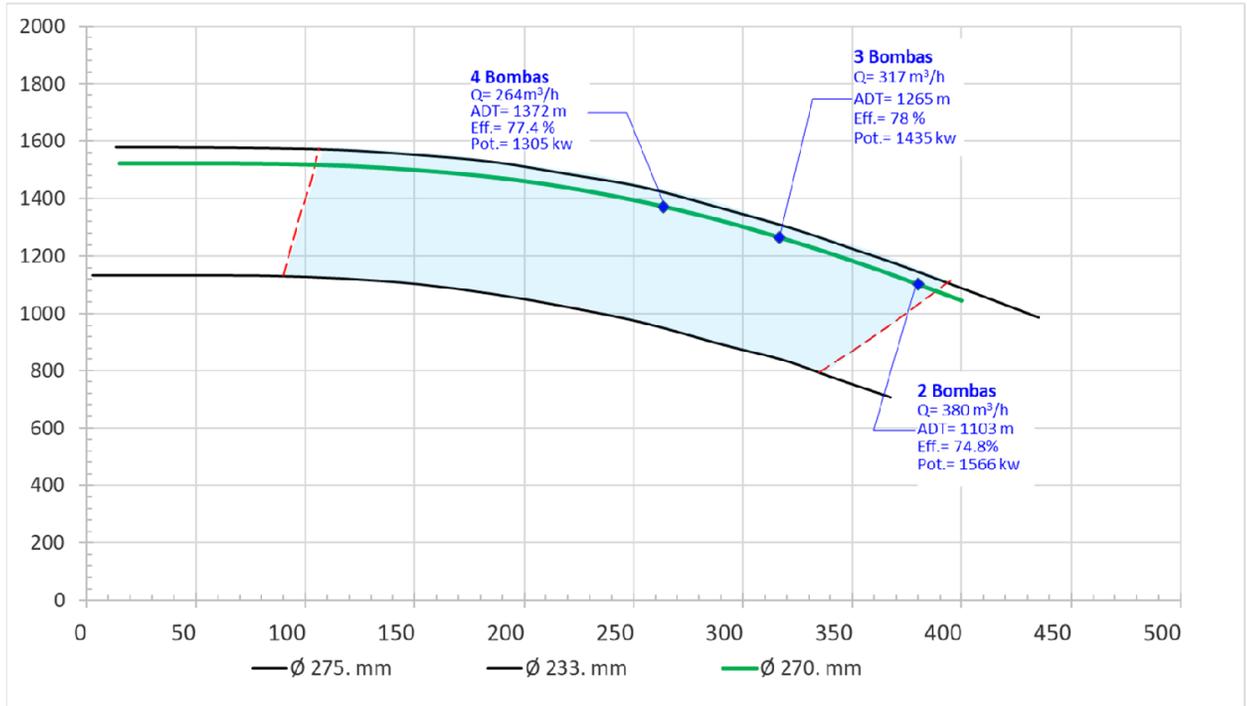


Nota: Se muestran las curvas de operación de las bombas y del sistema hasta los 20 años. Fuente: SSK Proyectos (2021)

En la figura 6 se muestra los puntos de operación, en la curva de la bomba, considerando la operación de 0-20 años.

Figura 6

Puntos de Operación de las bombas



Nota: Se muestran puntos de operación de las bombas para un sistema de 2 bombas, de 3 bombas y de 4 bombas. Fuente: SSK Proyectos (2021)

En la tabla 5 se muestra los valores para la operación con 02 bombas, para 03 y 04 bombas los valores se mantienen.

Como se puede observar, no es necesario realizar una corrección mediante las válvulas de control; sin embargo, estos valores son teóricos y están sujetos a la rugosidad de diseño asumida de 1mm.

Tabla N°5

Resumen de valores corregidos del comportamiento hidráulico del sistema

| Parámetros: Año 0-20 | 2 bombas | 3 bombas | 4 bombas |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| Caudal total [m ³ /h] | 760 | 950 | 1055 |
| Caudal por bomba [m ³ /h] | 380 | 317 | 264 |
| ADT [m] | 1103 | 1265 | 1372 |
| Eficiencia [%] | 74.8% | 78% | 77.4% |
| Pot. Consumida por bomba [kW] | 1566 | 1435 | 1305 |
| NPSHr [m] | 7.3 | 6.4 | 5.9 |
| NPSHa [m] | 10.7 | 10.7 | 10.7 |

Nota: Se muestran los valores corregidos considerando una rugosidad de diseño de 1mm,
Fuente: SSK Proyectos (2021)

La Tabla 6 muestra los resultados hidráulicos del sistema operando con las 04 bombas, en paralelo, de manera simultánea. La rugosidad del pipeline es de 1mm.

Tabla N°6

Resultados hidráulicos del sistema de tuberías con el caudal de 1008 m³/h

| Parámetro | Condiciones de operación | | | | | | |
|---|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|----|
| | Tubería de acero al carbono | | | | | Tubería de HDPE | |
| Diámetro nominal (pulg) | 16 | | | | | 18 | 20 |
| Diámetro real (pulg) | 16 | | | | | 18 | 20 |
| Esesor máximo (pulg) | 0.500 | 0.469 | 0.344 | 0.281 | 0.250 | 1.818 | |
| Año 0 – 20 | | | | | | | |
| Flujo máximo (m ³ /h) | 1008 | | | | | | |
| Velocidad (m/s) | 2.57 | 2.55 | 1.93 | 1.90 | 1.89 | 2.16 | |
| Pérdida longitudinal, rug. = 1.0mm (m/km) | 23.56 | 23.06 | 11.09 | 10.67 | 10.48 | 14.91 | |

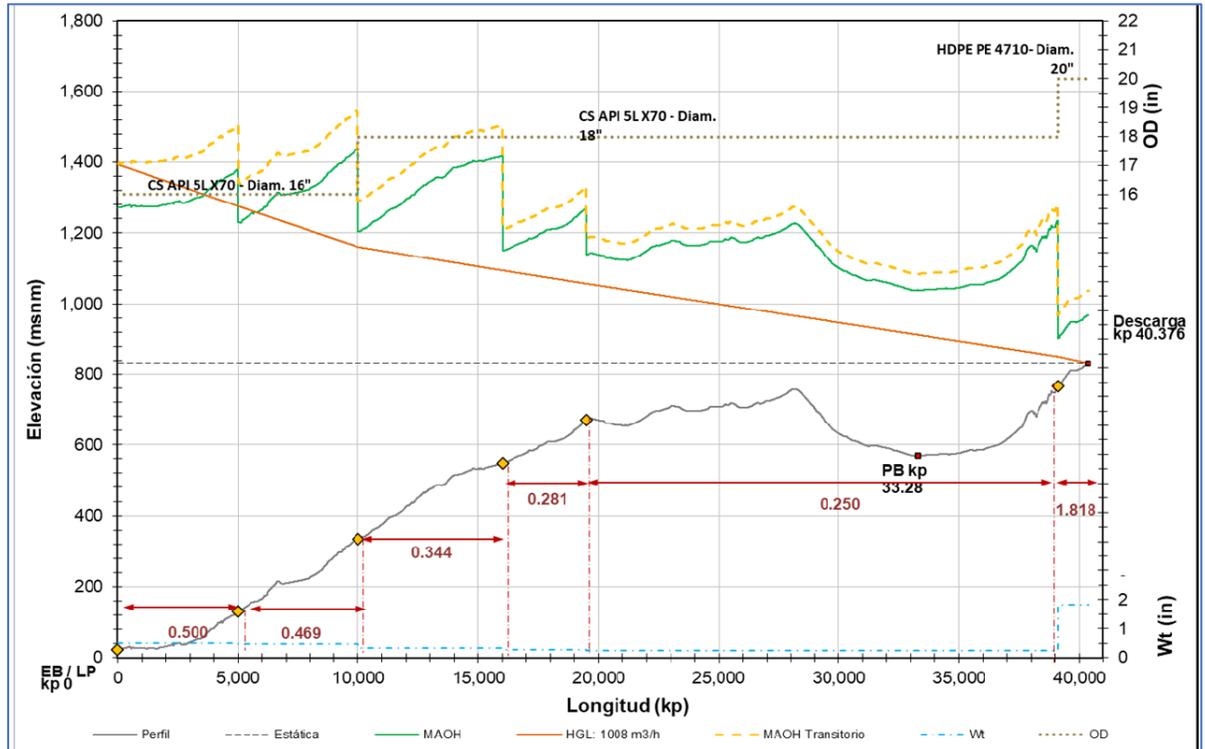
Nota: Se muestran los resultados considerando una rugosidad de diseño de 1mm, Fuente: SSK Proyectos (2021)

3.1.5.2. Perfil Hidráulico

El perfil hidráulico permitirá analizar el comportamiento del pipeline al incrementar la cuarta bomba. Se debe verificar que la presión de operación máxima admisible (MAOH) esté como mínimo 30 m.c.a por encima de la gradiente hidráulica a lo largo del pipeline; de no cumplirse esta condición, por medio de iteraciones se encontrará el nuevo tiempo de vida útil en las zonas más críticas del pipeline. En la figura 7, se muestra una proyección de esta curva en el año 20. No se muestra su proyección en el año 0 porque el sistema ya se encuentra en funcionamiento.

Figura 7

Sistema de tuberías con caudal de 1055 m³/h a 20 años y rugosidad de diseño 1 mm



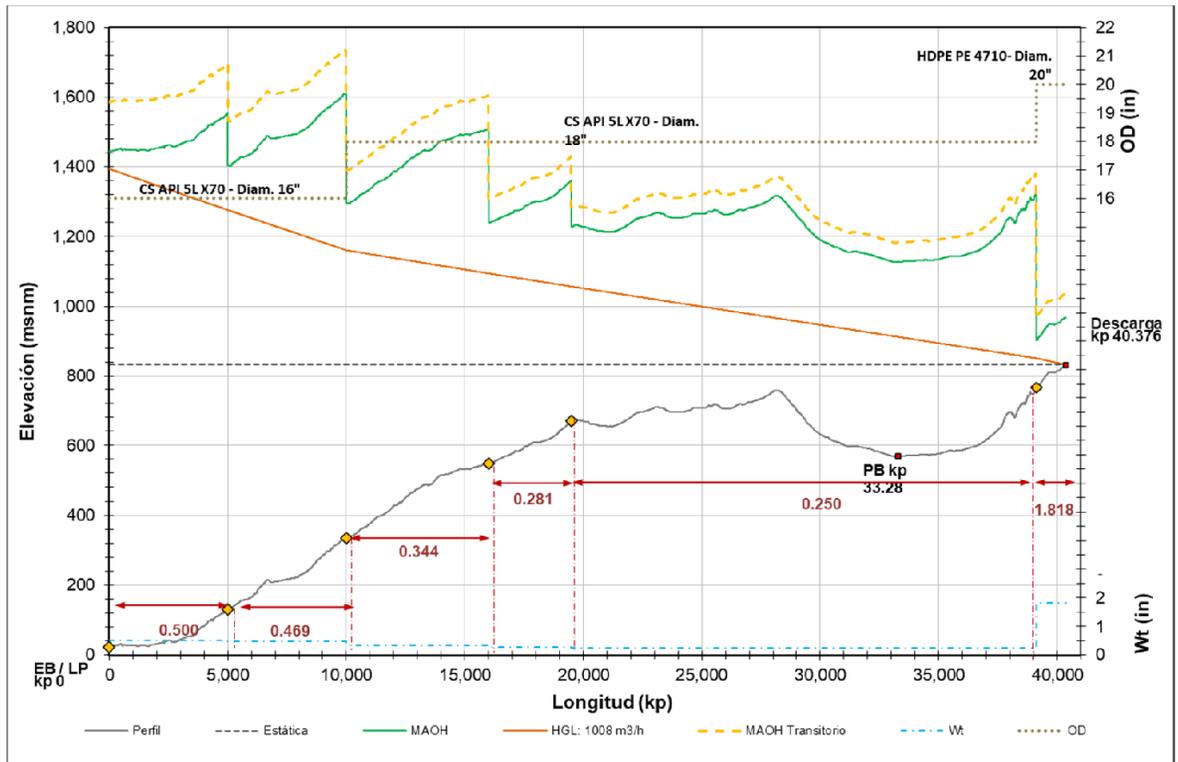
Nota: Se muestra el perfil hidráulico a 20 años y con una rugosidad de 1mm. Fuente: SSK Proyectos (2021)

Como se observa en la figura 7 el pipeline falla antes de los 20 años (tiempo de vida útil que se proyectó al inicio); por lo tanto, si se quiere operar a este nuevo caudal ($1055 \text{ m}^3/\text{h}$), se debe considerar una disminución de la vida útil del pipeline.

En la figura 8 se muestra que el nuevo tiempo de vida útil para el pipeline existente es de aproximadamente 17 años operando al caudal de $1055 \text{ m}^3/\text{h}$.

Figura 8

Sistema de tuberías con caudal de $1055 \text{ m}^3/\text{h}$ a 17 años y rugosidad de diseño 1 mm



Nota: Se muestra el perfil hidráulico a 17 años y con una rugosidad de 1mm. Fuente: SSK Proyectos (2021)

A continuación, se muestra la tabla N°7 con el resumen de los tramos de tuberías que deben ser cambiados en el año 17.

Tabla N°7

Cambio de tramos para el año 17 (Caudal = 1055 m³/h)

| Tramo | Material | Espesor de Pared |
|-------------------|--------------------------------|------------------|
| kp: 0+000 – 4+190 | Acero al carbón API 5L Gr. X70 | 0.500" |
| kp: 5+000 – 6+380 | Acero al carbón API 5L Gr. X70 | 0.469" |

Nota: Se muestran los tramos de tuberías a ser cambiados. Fuente: SSK Proyectos (2021)

3.1.5.3. NPSH Disponible

Este valor depende de las características de las instalaciones. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$NPSH_{disponible} = (P_{atm} - P_{vap}) + \Delta H - h_L - h_K$$

Donde:

P_{atm} = Presión atmosférica, en mca. Al nivel del mar

P_{vap} = Presión de vapor de agua, en mca. (T = 15°C)

ΔH = Diferencia de cota entre el nivel mínimo de agua en el tanque y el eje de la bomba.

h_L = Pérdidas longitudinales en la succión de la bomba

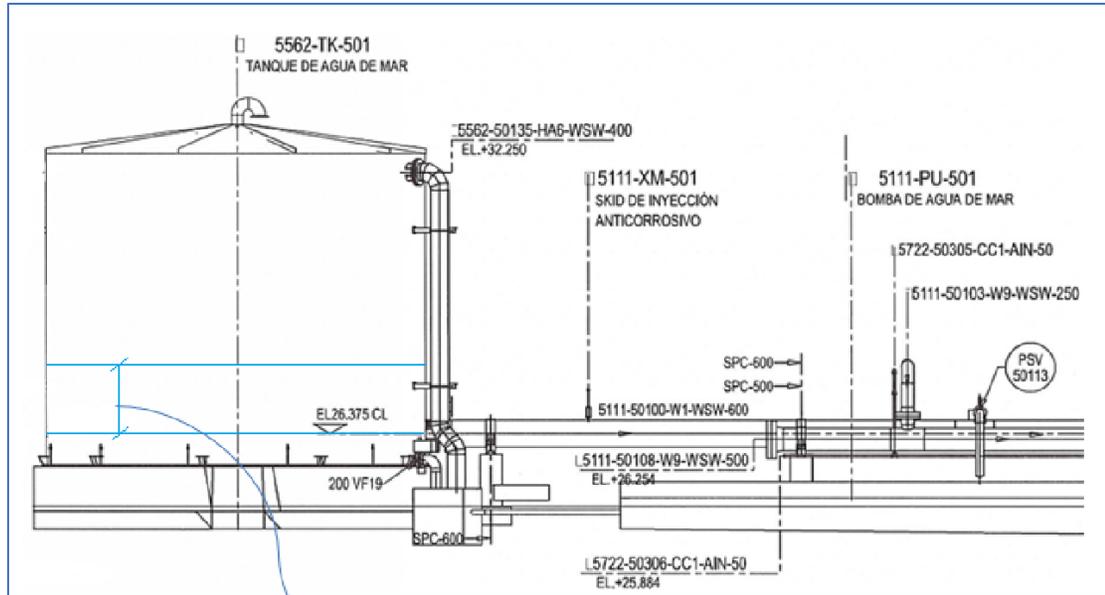
h_K = Pérdidas en accesorios en la succión de la bomba

Consideraciones: Para efectos de cálculo se considera un 30% adicional de pérdidas por accesorios y un nivel de espejo mínimo de agua de 1 m con

respecto al eje de la boquilla de descarga del tanque. Se debe tomar en cuenta que no se ha considerado pérdidas por filtros porque a no se cuenta con dicha información.

Figura 9

Diagrama de disposición del Tanque de agua de mar



Nota: Se muestra la ubicación del nivel de espejo de mínimo de agua de 1m. Fuente: SSK Proyectos (2021)

$$NPSH_{disponible} = 10.33 - 0.174 + 1 - 0.3775 - 0.1133$$

$$NPSH_{disponible} = 10.67 \text{ m. c. a}$$

Además, se debe verificar que el $NPSH_{disponible}$ sea como mínimo un 10% mayor al $NPSH_{requerido}$.

3.1.5.4. NPSH Requerido

Este valor depende netamente de las características de la bomba. Trillium, el proveedor de la bomba indicó que el NPSH requerido para las 04 bombas en paralelo es de:

$$NPSH_{requerido/caudal=1055m^3/h} = 5.9 \text{ m. c. a}$$

Verificación de la condición de cavitación:

$$NPSH_{disponible} \geq 1.1 NPSH_{requerido}$$

$$10.67 \text{ m. c. a} \geq 1.1 * 5.9 \text{ m. c. a}$$

Se verifica que el sistema operando con las 04 bombas en paralelo no presenta cavitación.

3.2. Análisis Hidráulico en Estado Transitorio

3.2.1. Bases y Criterios de Diseño

Las bases y criterios de diseño se mantendrán conforme al “Reporte Hidráulico Análisis Trásiente SIAM” del Cliente, a continuación, se muestra la información más relevante.

3.2.2. Modelo del Transitorio Hidráulico

El programa de análisis en estado transitorio permite simular diferentes escenarios de operación. Estos escenarios involucran las condiciones más relevantes de la operación, de los cuales se obtiene como resultado las presiones transitorias máximas y mínimas.

El modelo en estado transitorio se basa en el método de las características, desarrollado por Wylie y Streeter y ha sido validado usando datos de terreno de varias

tuberías comerciales de larga distancia y otros análisis masivos realizados con metodología independiente.

3.2.3. Características del Fluido

El fluido de servicio es agua de mar. En la tabla N°8 se detallan sus principales características a las condiciones de sitio

Tabla N°8
Características del Agua de Mar

| Propiedad | Valor |
|--------------------------------|------------------------|
| Temperatura (°C) | 15 |
| Densidad (ton/m ³) | 1.025 |
| Viscosidad Dinámica (cP) | 1.18 |
| Módulo de Bulk (psi) | 3.19 x 10 ⁵ |
| Presión de Vapor (psig) | 0.25 |

Nota: Se muestran las propiedades del agua de mar correspondiente a una temperatura de 15°. Fuente Imarpe (2023)

3.2.4. Características de la curva de la bomba

Se han considerado las curvas de rendimiento certificadas de las bombas existentes, las cuales fueron proporcionadas por el proveedor (Trillium).

3.2.5. Condición de la tubería

Se ha considerado la rugosidad de 1mm de acuerdo con lo indicado en el análisis hidráulico en estado estable.

3.2.6. Momento de Inercia

El momento de inercia de las bombas se estima usando las expresiones sugeridas por E. Wylie and V. Streeter, Fluid Transients in Systems, mientras que el momento de inercia del motor eléctrico corresponde al valor certificado por el fabricante.

$$I_{bomba} = 1.5 \cdot 10^7 \left(\frac{P}{N^3} \right)^{0.9556}$$

$$I_{motor} = 118 \left(\frac{P}{N} \right)^{1.48}$$

$$I = I_{bomba} + I_{motor}$$

Donde:

I: Inercia total [kg-m²]

I_{bomba}: Inercia de la bomba [kg-m²]

I_{motor}: Inercia del motor [kg-m²]

P: Potencia del motor [kW]

N: Velocidad de rotación de la bomba [rpm]

La tabla 9, presenta la inercia del conjunto motor-bomba considerada en la modelación de la estación de bombas.

Tabla N°9

Inercia Motor – Bomba

| Condición | Inercia Motor (kg-m ²)* | Inercia Bomba (kg-m ²) | Inercia de Modelación (kg-m ²)** |
|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| Diseño (rug. = 1.0mm) | 20.9 | 0.92 | 21.36** |

Nota: Se muestran la Inercia de Modelación como 50% de la inercia de la bomba y la totalidad de la inercia del motor. Fuente: SSK Proyectos (2021)

3.2.7. Presiones permisibles en tubería de acero al carbono

La sección 403.3.4 del Código “Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries” (ASME B31.4) permite que las presiones transitorias de la tubería de acero al carbón excedan en no más de un 10% la presión máxima admisible normal. Por lo tanto, la presión máxima admisible en estado estable (MAOP) y la presión máxima admisible eventual (MAOP eventual) se calculan con la siguiente expresión:

$$MAOP = \frac{0.8 \cdot t \cdot S \cdot 2}{OD}$$

$$MAOP_{eventual} = \frac{0.8 \cdot t \cdot S \cdot 2}{OD} = 1.1 * MAOP$$

Donde:

MAOP = Presión máxima admisible en estado estable (psi).

MAOP_{eventual} = Presión máxima admisible eventual (psi).

S = SMYS del acero de la tubería (para API 5L Gr X70 = 70,000 psi).

OD = Diámetro externo (in).

t = espesor final del acero (in).

t = t₀ – TC x Vida útil

t₀ = espesor inicial de tubería (pulgadas)

TC = tasa de corrosión (12 mpy ≤ 10 km / 7 mpy > 10 km).

3.2.8. Presiones permisibles en tubería HDPE

De la sección A304.1.2 del Código “Process Piping” (ASME B31.3), se puede inferir la presión máxima admisible en estado estable (MAOP) para una tubería no metálica (en este caso HDPE), mediante la siguiente expresión:

$$MAOP = \frac{2S}{SDR - 1}$$

Donde:

S = Esfuerzo de diseño (para resina PE4710 S= 1,000 psi).

SDR = OD/t.

De acuerdo con lo indicado por el PPI, la presión admisible para cargas eventuales en una tubería plástica queda expresada por las siguientes ecuaciones.

Para cargas eventuales recurrentes:

$$MAOP_{eventual} = 1.5 * MAOP$$

Para cargas eventuales ocasionales:

$$MAOP_{eventual} = 2 * MAOP$$

3.2.9. Piping, tubería de impulsión y otros datos

La ubicación de las principales estaciones a lo largo del pipeline y las características de las tuberías existentes (pipeline), se detallan en las tablas 10 y 11, respectivamente:

Tabla N°10
Estaciones Principales

| Estación | km | Elevación (msnm) |
|----------------------------------|-----------|-------------------------|
| EB / LP | 0+000 | 26 |
| PB | 33+280 | 569.7 |
| RP | 39+110 | 766.7 |
| Descarga (a Poza de agua de mar) | 40+376 | 831.6 |

Nota: Se muestran las ubicaciones de las estaciones principales. Fuente: SSK Proyectos (2021)

Tabla N°11
Características del Sistema de Tuberías Existente

| Parámetro | Valor | | |
|--------------------|---|--|----------------------------|
| Material | Acero al carbón API 5L Gr. X70 | Acero al carbón API 5L Gr.X70 | HDPE PE4710 |
| Diámetro nominal | 16" | 18" | 20" |
| Diámetro externo | 16.000" | 18.000" | 20.000" |
| Espesores de pared | 0.500" (kp: 0+000–5+000) 0.469" (kp: 5+000–10+000) | 0.344" (kp: 10+000–16+000) 0.281" (kp: 16+000–19+500) 0.250" (kp: 19+500–39+110) | SDR 11 (kp: 39+110–40+376) |

Nota: Se muestran las dimensiones y materiales de las tuberías que componen el sistema, Fuente: SSK Proyectos (2021)

En lo sucesivo se realiza el análisis hidráulico en estado transitorio de acuerdo con las características de las tuberías y altitudes descritas en la tabla 10 y tabla 11. Se verificará que la presión admisible de la tubería en el inicio del tramo de cada estación sea capaz de soportar los efectos del golpe de ariete. En caso de no cumplirse se deberán realizar los ajustes necesarios al diseño y/o considerar elementos de protección para este efecto.

3.2.10. Modelación

En el análisis en estado transitorio se incorporan los distintos eventos operacionales que pueden generar sobrepresiones en la tubería. En este documento se analizarán escenarios de operación normal y eventual. Las secuencias que se detallan en este capítulo tienen la finalidad de estructurar la modelación en forma conservadora y estas no representan secuencias operacionales, las cuales serán definidas en el manual de operación y podrían ser ajustadas durante la puesta en marcha.

Los escenarios de operación normal considerados son:

- Régimen permanente a flujo máximo.
- Arranque secuencial de bombas.
- Detención secuencial de bombas.

Los escenarios de operación eventual considerados son (Ver Nota 1):

- Caída simultánea de bombas.

Nota1: El presente análisis transitorio no considera un escenario de cierre de válvula principalmente porque las únicas válvulas que pueden ser cerradas de forma accidental están ubicadas en los receptores de PIG, las cuales deberán ser operadas únicamente durante la recepción del PIG, maniobra que debe ser realizada por personal calificado, no obstante, estas válvulas contarán con bloqueo físico y enclavamiento mediante PCS durante la operación normal, evitando así su cierre accidental.

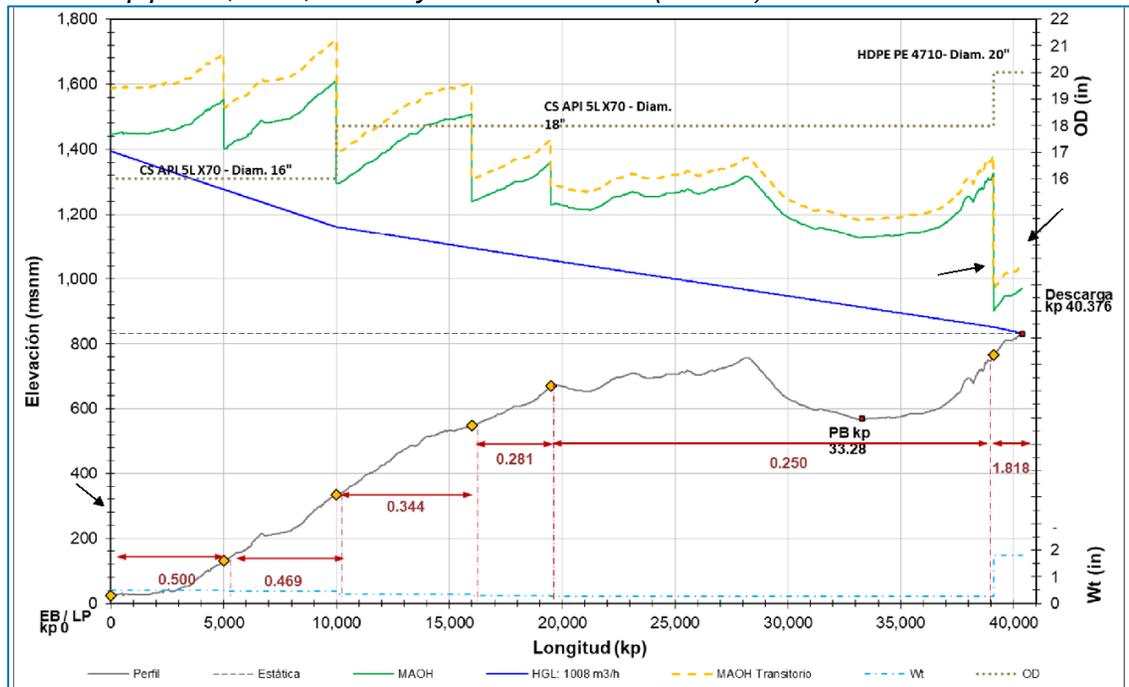
3.2.10.1. Régimen Permanente a flujo máximo

De acuerdo con lo calculado, en el análisis en estado estable, el máximo caudal a transportar operando las cuatro bombas en simultáneo es de 1055 m³/h. El análisis en estado estable utiliza las características del fluido y tubería para determinar el gradiente hidráulico, el cual es el punto de partida del análisis en estado transitorio. A partir de este gradiente se modela la perturbación producida por un evento temporal dentro de la operación normal del SIAM.

La figura 10 muestra el gradiente hidráulico en régimen permanente para el flujo máximo de 1055 m³/h. Además, se observa que dicha curva está por debajo de la capacidad máxima admisible de la tubería (MAOH). Por lo tanto, se verifica que en régimen permanente la tubería es la apropiada.

Figura 10

Perfil del pipeline, LGH, MAOH y MAOH eventual (Año 17).



Nota: Se muestra el gradiente hidráulico en régimen permanente para el flujo máximo de 1055 m³/h. Fuente: SSK Proyectos (2021)

La tabla 12 muestra las holguras entre las presiones operativas y las presiones eventuales máximas admisibles por las tuberías en las principales estaciones del pipeline.

Tabla N°12

Holgura entre la presión máxima del transitorio y MAOH eventual

| Estación | EB | PB | RP | Descarga |
|----------------|--------|---------|---------|----------|
| (m) | 0 | 33,280 | 39,110 | 40,376 |
| Holgura (mca) | 215.4 | 841.91 | 887.69 | 1036.39 |
| Holgura (Psig) | 313.96 | 1227.13 | 1293.86 | 1510.58 |

Nota: Se muestran las holguras entre las presiones operativas y las presiones eventuales máximas admisibles, Fuente: SSK Proyectos (2021)

Tabla N°13

Resultados hidráulicos del pipeline con el caudal de 1055 m³/h

| Parámetro | Condiciones de operación | | | | | |
|---|-----------------------------|-------|-------|-------|-----------------|-------|
| | Tubería de acero al carbono | | | | Tubería de HDPE | |
| Diámetro nominal (pulg) | 16 | | 18 | | 20 | |
| Diámetro real (pulg) | 16 | | 18 | | 20 | |
| Espesor máximo (pulg) | 0.500 | 0.469 | 0.344 | 0.281 | 0.250 | 1.818 |
| Año 0 – 17.5 | | | | | | |
| Flujo máximo (m ³ /h) | 1055 | | | | | |
| Velocidad (m/s) | 2.46 | 2.44 | 1.84 | 1.82 | 1.80 | 2.06 |
| Pérdida longitudinal, rug. = 1.0mm (m/km) | 21.52 | 21.06 | 10.13 | 9.75 | 9.57 | 13.62 |

Nota: Se muestran los resultados considerando una rugosidad de diseño de 1mm, Fuente: SSK Proyectos (2021)

3.2.10.2. Arranque secuencial de bombas

Esta condición simula la partida secuencial de bombas hasta alcanzar el número máximo de bombas en operación, definida en cuatro bombas.

En este caso se considera una rampa de partida de cuatro (4) segundos hasta alcanzar la velocidad nominal del motor (3582 rpm).

En la tabla 14 se presenta la secuencia de arranque de bombas.

Tabla N°14

Secuencia de arranque de bombas

| Tiempo (s) | Acción | Observación |
|------------|------------------------------------|--|
| 0 | - | Sistema detenido |
| 0 | Se inicia partida Bomba N°1 | "Ramp up" 4 seg ¹ |
| 4 | Bomba N°1 al 100% | Se inicia desconexión del VFD de la Bomba N° 1 para ser conectada en la Bomba N° 2 (10 seg ²). |
| 14 | Se inicia partida Bomba N°2 | "Ramp up" 4 seg ¹ |
| 18 | Bombas N°1 y N°2 al 100% | Se inicia desconexión del VFD de la Bomba N° 2 para ser conectada en la Bomba N° 3 (10 seg ²). |
| 28 | Se inicia partida Bomba N°3 | "Ramp up" 4 seg ¹ |
| 32 | Bombas N°1, N°2 y N°3 al 100% | Se inicia desconexión del VFD de la Bomba N° 3 para ser conectada en la Bomba N° 4 (10 seg ²). |
| 42 | Se inicia partida Bomba N°4 | "Ramp up" 4 seg ¹ |
| 46 | Bombas N°1, N°2, N°3 y N°4 al 100% | - |

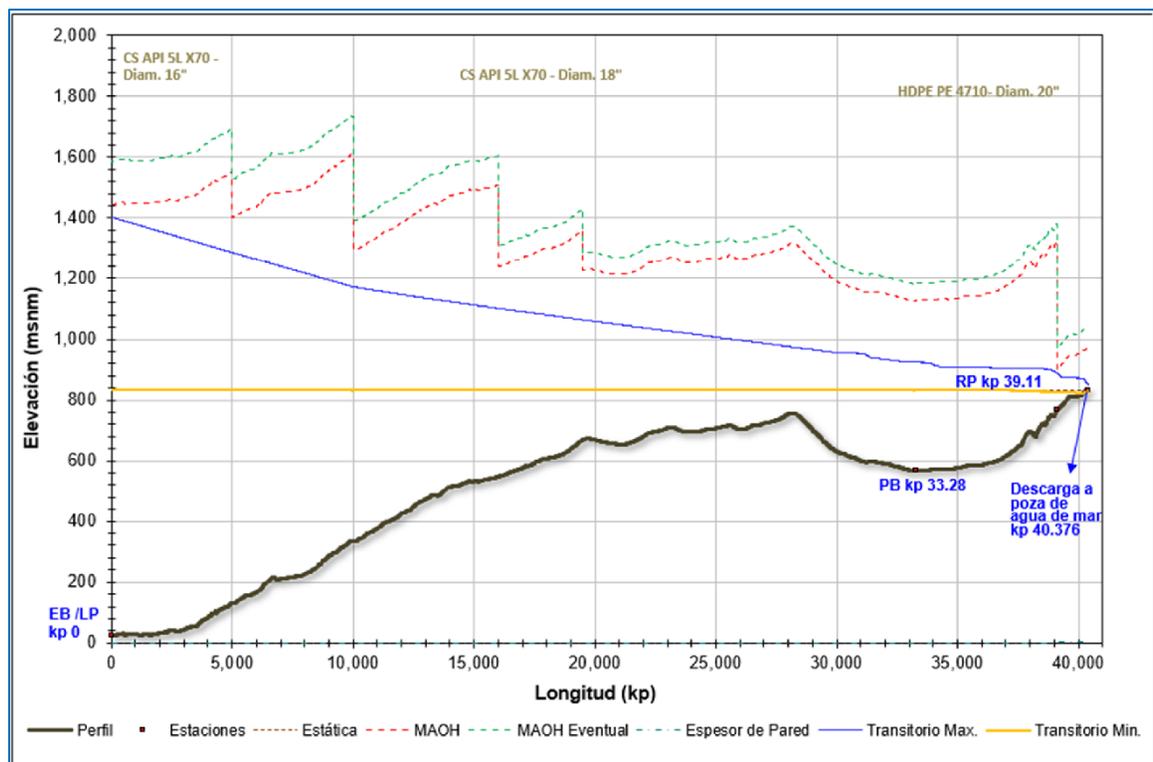
Nota: ¹ Tiempo considerado para la partida de bombas desde 0 rpm a 3582 rpm, ² Tiempo considerado para cambiar la conexión del VFD de una a otra bomba. Fuente: SSK Proyectos (2021)

Para obtener las presiones máximas transitorias se modeló el sistema con el flujo de diseño y en la secuencia de arranque mencionada anteriormente.

La figura 11 muestra las envolventes de presión máxima y mínima registradas durante el arranque secuencial de las 04 bombas.

Figura 11

Envolventes de presión máxima y mínima para arranque secuencial de las 04 bombas (Año 17)



Nota: Se muestran las sobrepresiones generadas en la tubería en comparación con la presión máxima permisible eventual. Fuente: SSK Proyectos (2021)

Como se puede observar en la figura 11, las sobrepresiones generadas en la tubería (debido al transitorio) son menores a la presión

máxima permisible eventual (MAOH eventual), con una holgura superior a los 20 mca en todo el recorrido.

En la tabla 15, se muestran los resultados de las holguras mínimas en el inicio de cada tramo y el espesor del pipeline respectivo.

Tabla N°15

Holgura entre la presión máxima del transitorio y MAOH eventual

| OD / Material | 16" / Acero | 16" / Acero | 18" / Acero | 18" / Acero | 18" / Acero | 20" / HDPE |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Espesor | 0.5 | 0.469 | 0.344 | 0.281 | 0.25 | SDR 11 |
| (m) | 40 | 5,100 | 10,000 | 16,000 | 19,500 | 39,110 |
| Holgura (mca) | 183.37 | 245.85 | 218.86 | 207.02 | 221.51 | 83.98 |
| Holgura (Psig) | 267.28 | 358.34 | 319.00 | 301.74 | 322.87 | 122.40 |

Fuente: SSK Proyectos (2021)

La tabla 16, presenta las presiones máximas registrada en las estaciones EB (estación de bombeo), PB (Punto bajo), RP (Receptor de Pig), y descarga.

Tabla N°16

Presiones máximas registradas en estaciones – Arranque de bombas

| Estación | EB | PB | RP | Descarga |
|-----------------|-----------|---------------|---------------|-----------------|
| (m) | 0 | 33,280 | 39,110 | 40,376 |
| Presión (mca) | 1390.70 | 359.06 | 121.72 | 40.36 |
| Presión (Psig) | 2027.01 | 523.35 | 177.41 | 58.82 |

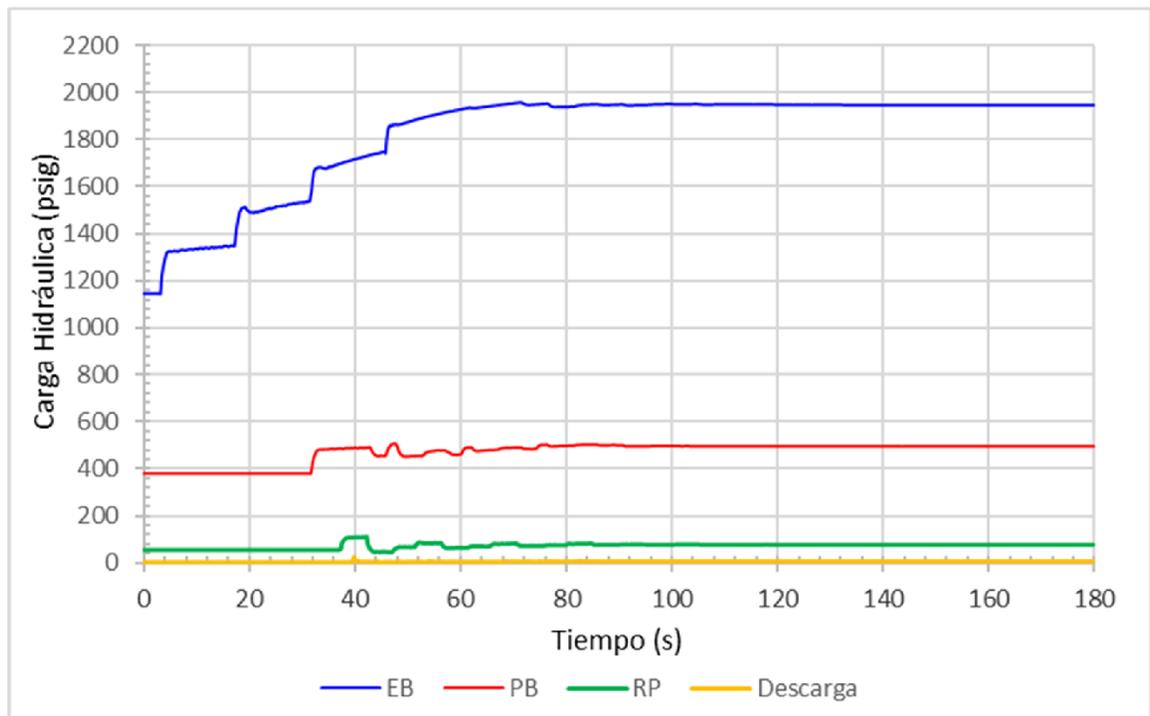
Nota: Se muestran las presiones registradas en EB, PB, RP y Descarga,

Fuente: SSK Proyectos (2021)

La figura 12 muestra el historial de sobrepresiones máximas generadas en el escenario de arranque secuencial de las cuatro estaciones (EB, PB, RP y descarga). La máxima presión se presenta en la descarga de la EB siendo esta $P_{\text{Máx.}} = 2027.01$ psig, la cual se encuentra por debajo de la presión admisible para materiales de la clase 900 de acuerdo con el código ASME (Presión máx.= 2182.4 psi, clase 900).

Figura 12

Presión en función del tiempo - Arranque secuencial de las 04 bombas



Nota: Se muestra el historial de sobrepresiones máximas generadas en el escenario de arranque secuencial de las cuatro estaciones. Fuente: SSK Proyectos (2021)

3.2.10.3. Detención secuencial de bombas

Esta condición simula una detención secuencial de bombas, utilizando VFD de manera alternada, con el fin de disminuir el flujo de operación y por lo tanto las sobrepresiones durante esta operación.

En la tabla 17 se presenta la secuencia de detención de bombas.

Tabla N°17

Secuencia de detención de bombas

| Tiempo (s) | Acción | Observación |
|------------|--|--|
| 0 | Las 4 bombas operan normalmente al 100% | - |
| 0 | Se inicia detención de Bomba N°1 | Ciclo de 30 seg ¹ |
| 30 | Bomba N°1 detenida (0% de operación). La bomba N°2 y N°3 siguen operando al 100% | Se inicia la desconexión del VFD a la bomba N°1 para conectarla a la N°2 (10 seg ²). |
| 40 | Se inicia detención de la bomba N°2 | Ciclo de 30 seg ¹ |
| 70 | Bomba N°1 y N°2 detenidas (0% de operación). La bomba N°3 sigue operando al 100% | Se inicia la desconexión del VFD a la bomba N°2 para conectarla a la N°3 (10 seg ²). |
| 80 | Se inicia detención de la bomba N°3 | Ciclo de 30 seg ¹ |
| 110 | Bombas N°1, N°2 y N°3 detenidas. Bomba N°4 operando al 100% | Se inicia desconexión del VFD de la Bomba N° 3 para ser conectada en la Bomba N° 4 (10 seg ²). |
| 120 | Se inicia detención de la bomba N°4 | Ciclo de 30 seg ¹ |
| 150 | Las 4 bombas están detenidas | Sistema detenido |

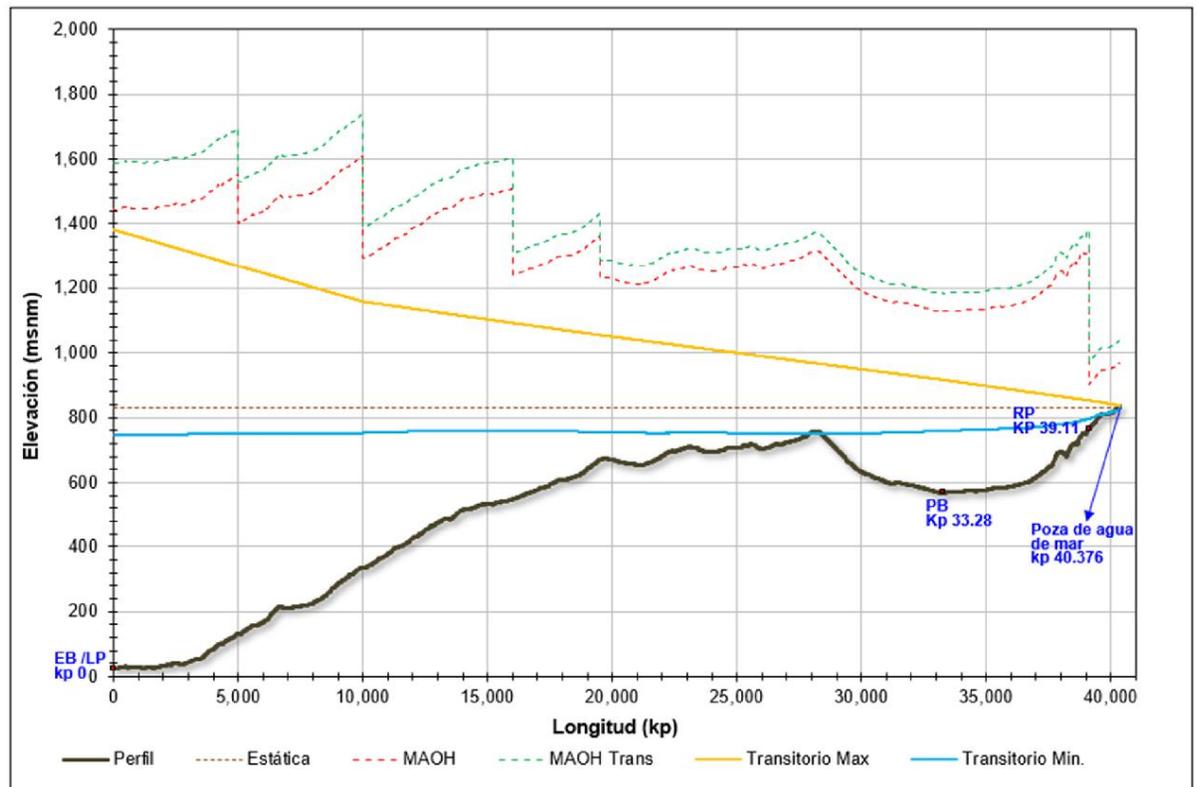
Nota: ¹ Tiempo considerado para detención normal, ² Tiempo considerado para cambiar la conexión del VFD de una a otra bomba. Fuente: SSK Proyectos (2021)

Para obtener las presiones máximas transitorias se modeló el sistema con el flujo de diseño y en la secuencia de detención mencionada anteriormente.

La figura 13 muestra las envolventes de presión máxima y mínima registradas durante la detención secuencial de las 04 bombas.

Figura 13

Envolventes de presión máxima y mínima para detención secuencial de las 04 bombas (Año 17)



Nota: Se muestran las sobrepresiones generadas en la tubería en comparación con la presión máxima permisible eventual. Fuente: SSK Proyectos (2021)

Como se puede observar en la figura 13, las sobrepresiones generadas en la tubería (debido al transitorio) son menores a la presión máxima permisible eventual (MAOH eventual), con una holgura superior a los 20 mca en todo el recorrido.

En la tabla 18, se muestran los resultados de las holguras mínimas en el inicio de cada tramo y el espesor del pipeline respectivo.

Tabla N°18

Holgura entre la presión máxima del transitorio y MAOH eventual

| OD / Material | 16" / Acero | 16" / Acero | 18" / Acero | 18" / Acero | 18" / Acero | 20" / HDPE |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Espesor | 0.5 | 0.469 | 0.344 | 0.281 | 0.25 | SDR 11 |
| (m) | 40 | 5,100 | 10,000 | 16,000 | 19,500 | 39,110 |
| Holgura (mca) | 204.31 | 262.75 | 232.66 | 216.11 | 230.00 | 119.47 |
| Holgura (Psig) | 297.79 | 382.98 | 339.11 | 314.99 | 335.24 | 174.13 |

Fuente: SSK Proyectos (2021)

La tabla 19, presenta las presiones máximas registrada en las estaciones EB (estación de bombeo), PB (Punto bajo), RP (Receptor de Pig), y descarga.

Tabla N°19

Presiones máximas registradas en estaciones – Detención de bombas

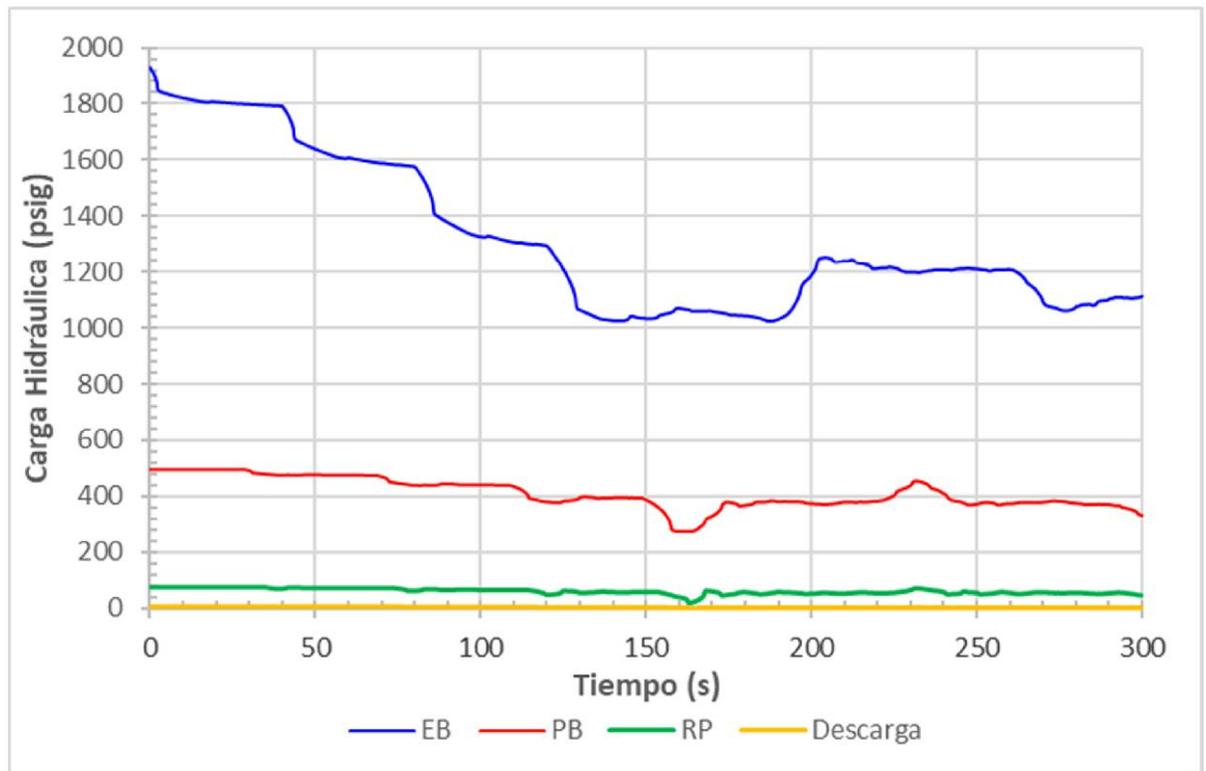
| Estación | EB | PB | RP | Descarga |
|-----------------|-----------|---------------|---------------|-----------------|
| (m) | 0 | 33,280 | 39,110 | 40,376 |
| Presión (mca) | 1371.90 | 349.37 | 86.97 | 3.06 |
| Presión (Psig) | 1999.61 | 509.22 | 126.76 | 4.46 |

Nota: Se muestran las presiones registradas en EB, PB, RP y Descarga,
Fuente: SSK Proyectos (2021)

La figura 14, muestra el historial de sobrepresiones máximas generadas en el escenario de detención secuencial en las cuatro estaciones (EB, PB, RP y descarga). La máxima presión se presenta en la descarga de la EB siendo esta P.Máx. = 1999.61 psig, la cual se encuentra por debajo de la presión admisible para materiales de la clase 900 de acuerdo con el código ASME (Presión máx.= 2182.4 psi, clase 900).

Figura 14

Presión en función del tiempo - Detención secuencial de las 04 bombas



Nota: Se muestra el historial de sobrepresiones máximas generadas en el escenario de detención secuencial en las cuatro estaciones. Fuente: SSK Proyectos (2021)

En la tabla 20, se muestran los resultados de las holguras mínimas en el inicio de cada tramo y el espesor del pipeline respectivo.

Tabla N°20

Holgura entre la presión máxima del transitorio y MAOH eventual

| OD / Material | 16" / Acero | 16" / Acero | 18" / Acero | 18" / Acero | 18" / Acero | 20" / HDPE |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Espesor | 0.5 | 0.469 | 0.344 | 0.281 | 0.25 | SDR 11 |
| (m) | 40 | 5,100 | 10,000 | 16,000 | 19,500 | 39,110 |
| Holgura (mca) | 183.37 | 245.85 | 218.86 | 207.02 | 221.51 | 83.98 |
| Holgura (Psig) | 267.28 | 358.34 | 319.00 | 301.74 | 322.87 | 122.40 |

Fuente: SSK Proyectos (2021)

De la figura 15, se concluye que bajo los tres (3) eventos modelados (régimen permanente, partida de bombas y detención de bombas) la tubería no ve comprometida su integridad.

La tabla 21 muestra las holguras entre las presiones operativas y las presiones eventuales máximas admisibles por las tuberías en las principales estaciones del pipeline.

Tabla N°21

Presiones máximas registradas en estaciones – Operación normal

| Estación | EB | PB | RP | Descarga |
|-----------------|-----------|---------------|---------------|-----------------|
| (m) | 0 | 33,280 | 39,110 | 40,376 |
| Presión (mca) | 164.08 | 242.62 | 476.76 | 187.22 |
| Presión (Psig) | 239.15 | 353.63 | 694.91 | 272.89 |

Nota: Se muestran las presiones registradas en EB, PB, RP y Descarga, Fuente: SSK Proyectos (2021)

3.2.10.5. Caída simultánea de bombas

Esta condición simula una detención repentina de todas las bombas, condición que puede ocurrir por efecto de un corte de energía, caída de presión en la succión o descarga o frente a una detención brusca de las bombas. La descarga de cada bomba cuenta con una válvula check tipo nozzle de cierre rápido, que evitará el flujo inverso a través de la bomba y la rotación del motor en sentido inverso, condiciones que podrían causar daños a las instalaciones.

La tabla 22 presenta la secuencia de caída de bombas considerada para efectos de la presente modelación.

Tabla N°22

Secuencia de caída simultánea de bombas

| Tiempo (s) | Acción | Observación |
|-------------------|--|----------------------------|
| | Todas las bombas operan normalmente | - |
| 0 | Se inicia caída de la estación de bombas | Caída simultánea de bombas |

Fuente: SSK Proyectos (2021)

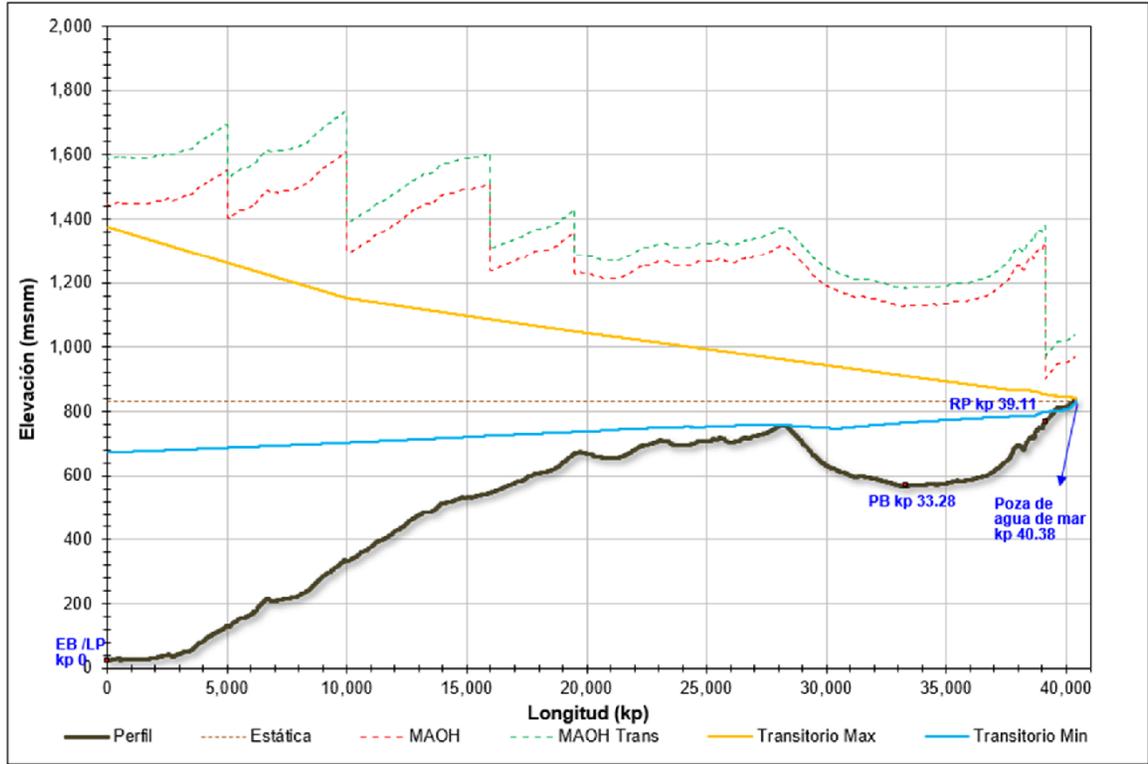
Para obtener las presiones máximas transitorias se modeló el sistema con el flujo de diseño y en la secuencia de caída de bombas mencionada anteriormente.

La figura 16 muestra las envolventes de presión máxima y mínima registradas durante la caída simultánea de las 04 bombas.

Figura 16

Envoltorios de presión máxima y mínima para caída simultánea de 04 bombas (Año

17)



Nota: Se muestran las sobrepresiones generadas en la tubería en comparación con la presión máxima permisible eventual. Fuente: SSK Proyectos (2021)

Como se puede observar de la figura 16, las sobrepresiones generadas en la tubería (debido al transitorio) son menores a la presión máxima permisible eventual (MAOP eventual), con una holgura superior a los 20 mca.

En la tabla 23, se muestran los resultados de las holguras mínimas en el inicio de cada tramo y el espesor del pipeline.

Tabla N°23

Holgura entre la presión máxima del transitorio y MAOH eventual

| OD / Material | 16" / Acero | 16" / Acero | 18" / Acero | 18" / Acero | 18" / Acero | 20" / HDPE |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Espesor | 0.5 | 0.469 | 0.344 | 0.281 | 0.25 | SDR 11 |
| (m) | 40 | 5,100 | 10,000 | 16,000 | 19,500 | 39,110 |
| Holgura (mca) | 211.06 | 269.28 | 238.91 | 222.21 | 236.02 | 118.94 |
| Holgura (Psig) | 307.63 | 392.49 | 348.22 | 323.89 | 344.01 | 173.36 |

Fuente: SSK Proyectos (2021)

La tabla 24, presenta las presiones máximas registrada en las estaciones EB (estación de bombeo), PB (Punto bajo), RP (Receptor de Pig), y descarga.

Tabla N°24

Presiones máximas registradas en estaciones – Operación normal

| Estación | EB | PB | RP | Descarga |
|----------------|----------|---------------|---------------|---------------|
| (m) | 0 | 33,280 | 39,110 | 40,376 |
| Presión (mca) | 1371.90 | 343.78 | 86.99 | 11.09 |
| Presión (Psig) | 1999.61 | 501.07 | 126.79 | 16.17 |

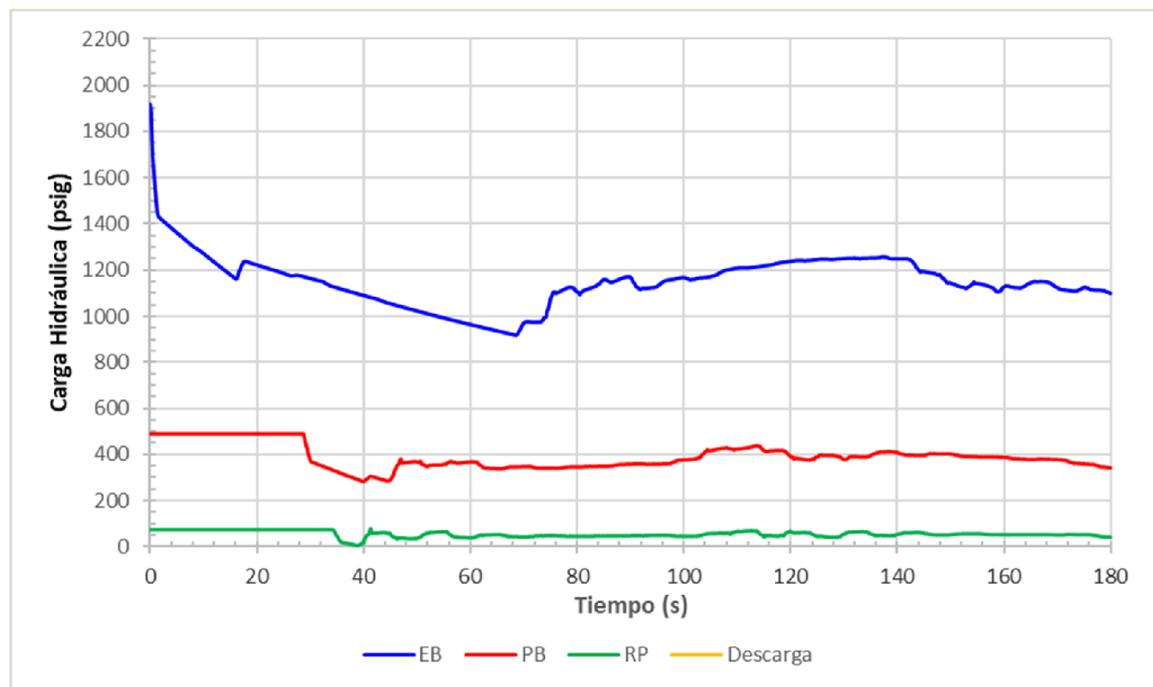
Nota: Se muestran las presiones registradas en EB, PB, RP y Descarga,
Fuente: SSK Proyectos (2021)

La figura 17, muestra el historial de sobrepresiones máximas generadas en el escenario de caída simultánea en las cuatro estaciones (EB,

PB, RP y descarga). La máxima presión se presenta en la descarga de la EB siendo esta P.Máx. = 1999.61 psig, la cual se encuentra por debajo de la presión admisible para materiales de la clase 900 de acuerdo con el código ASME (Presión máx.= 2182.4 psi, clase 900).

Figura 17

Presión en función del tiempo – Caída simultánea de las 04 bombas



Nota: Se muestra el historial de sobrepresiones máximas generadas en el escenario de caída simultánea en las cuatro estaciones. Fuente: SSK Proyectos (2021)

CAPÍTULO IV. RESULTADOS, CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados

Del Análisis en Estado Transitorio se tienen los siguientes resultados:

- a) La operación normal tiene como máxima sobrepresión el valor de 2027.01 psia, el cual es inferior a la máxima presión admisible del material (Clase 900 = 2182.4 psi).
- b) La operación eventual tiene como máxima sobrepresión el valor de 1999.61 psia, el cual es inferior a la máxima presión admisible del material (Clase 900 = 2182.4 psi).
- c) No se considera necesario adicionar elementos de protección contra golpe de ariete.
- d) El SIAM podrá operar con un caudal de 1055 m³/h hasta el año 17. A partir de este año el cliente debe decidir si reemplazará ciertos tramos del pipeline o disminuirá el caudal de operación del SIAM

Del Análisis en Estado Estable se tienen los siguientes resultados:

- a) El caudal máximo disponible, para las 04 bombas operando simultáneamente en paralelo, es 1055 m³/h.
- b) El caudal que manejará cada bomba, para las 04 bombas operando simultáneamente en paralelo, es 264 m³/h.

- c) Incluso operando las 04 bombas en simultáneo no se logra cubrir la nueva demanda de agua de mar ($1066 \text{ m}^3/\text{h}$), se tendría una deficiencia de $11 \text{ m}^3/\text{h}$ que representa un 1% del caudal requerido.
- d) El incremento de caudal al operar con 04 bombas con respecto a 03 bombas es $105 \text{ m}^3/\text{h}$. Este valor representa un incremento de 11.05% del caudal para 03 bombas.
- e) Es probable que el sistema pueda operar a un mayor caudal para 03 y 04 bombas trabajando en simultáneo debido a que los cálculos se realizaron considerando la rugosidad teórica de 1mm en el pipeline; sin embargo, en los primeros años se espera una menor rugosidad que permitiría transportar un mayor caudal.
- f) La altura dinámica de trabajo, para las 04 bombas operando simultáneamente en paralelo, es 1372 m.c.a.
- g) La eficiencia, para las 04 bombas operando simultáneamente en paralelo, es 77.4%.
- h) La potencia consumida, por cada bomba, para las 04 bombas operando simultáneamente en paralelo, es 1305 kW.
- i) El incremento de potencia consumida al operar con 04 bombas con respecto a 03 bombas es 915 kw. Este valor representa un incremento de 21.3 % de la potencia consumida para 03 bombas.
- j) Si se requiere seguir operando las 04 bombas en simultáneo, al caudal de $1055 \text{ m}^3/\text{h}$, después del año 17, entonces se debe reemplazar los tramos del pipeline indicados en la Tabla N°7. Si no se considera viable hacer un reemplazo de tuberías en el año 17, entonces en dicha fecha se debe reducir el caudal a un valor máximo de $900 \text{ m}^3/\text{h}$ (caudal proyectado por el Cliente

luego de concluido el tercer año de operación) para así garantizar el correcto funcionamiento hasta el año 20.

- k) El NPSH disponible del sistema es 10.67 m.c.a. Se ha considerado un nivel mínimo de espejo de agua de 1m con respecto al eje de la boquilla de descarga del tanque intermedio y no se ha considerado pérdidas por filtros.
- l) El NPSH requerido es 5.9 m.c.a. Este valor fue dado por el proveedor de la bomba (Trillium).
- m) El NPSH disponible es mucho mayor que el 110% del NPSH requerido; por lo tanto, el sistema no prevé cavitación cuando operen las 04 bombas simultáneamente en paralelo.

4.2. Contrastación de Hipótesis

4.2.1. Hipótesis 1

La adición de 01 cuarta Bomba al Sistema de Impulsión de Agua de Mar aumenta la capacidad de bombeo del sistema.

La capacidad de bombeo máxima del SIAM es de **950 m³/h**, podemos evidenciar que luego de adicionar una cuarta bomba, la capacidad de bombeo del SIAM, con las cuatro bombas trabajando en forma simultánea, se incrementa **1055 m³/h** equivalente a un aumento del **11.05%**

4.2.2. Hipótesis 2

La adición de 01 cuarta Bomba al Sistema de Impulsión de Agua de Mar incrementa la presión de bombeo del sistema.

La presión de bombeo del SIAM o altura dinámica total (TDH) operando con 3 bombas es de **1265 mca**, podemos evidenciar que luego de adicionar una cuarta bomba, la presión de bombeo del SIAM, aumenta a **1372 mca** equivalente a un aumento del **8.46%**.

4.2.3. Hipótesis 3

La adición de 01 cuarta Bomba al Sistema de Impulsión de Agua de Mar produce degradación en el sistema.

De acuerdo con el análisis en estado estable con el nuevo caudal de 1055 m³/h, El SIAM falla antes de los **20 años**, por lo que podrá operar con un caudal de 1055 m³/h hasta el **año 17**, reduciendo su vida útil en un **15%**.

4.2.4. Hipótesis General

La ampliación de un sistema de impulsión de agua de mar es viable técnicamente para cubrir la demanda de agua de una Planta de ósmosis inversa.

Luego de contrastar las tres hipótesis específicas podemos comprobar que la ampliación del SIAM es viable técnicamente, pues la capacidad de bombeo aumenta en un 11.05%, la presión de bombeo también aumenta en un 8.46%, pero con la desventaja de la reducción de la vida útil del sistema en un 15%.

4.3. Discusión de resultados

Los resultados respaldan claramente la hipótesis 1. La adición de una cuarta bomba ha incrementado significativamente la capacidad de bombeo del sistema, permitiendo que el SIAM maneje un mayor volumen de agua. Esto es evidencia directa y cuantitativa que confirma la hipótesis propuesta.

La hipótesis 2 también se confirma con los resultados obtenidos. La inclusión de la cuarta bomba no solo aumentó la capacidad de bombeo, sino que también elevó la presión dentro del sistema, lo que es crítico para el transporte eficiente del agua a través de largas distancias y elevaciones, especialmente en sistemas de ósmosis inversa.

La hipótesis 3 también se confirma, aunque con consecuencias negativas. Si bien la cuarta bomba proporciona beneficios en términos de capacidad y presión, también introduce tensiones adicionales dentro del sistema, lo que resulta en una reducción de la vida útil del mismo. Esto sugiere que, aunque técnicamente viable, la solución puede requerir ajustes o consideraciones adicionales para manejar los efectos adversos sobre la durabilidad del sistema.

Finalmente podemos indicar que las tres hipótesis han sido confirmadas por los resultados del estudio. Sin embargo, la confirmación de la hipótesis 3 subraya la importancia de realizar un análisis más exhaustivo para equilibrar las mejoras en la capacidad y presión con la integridad a largo plazo y sostenibilidad del sistema.

CONCLUSIONES

1. **Incremento en la capacidad de bombeo:** El análisis confirmó que la adición de una cuarta bomba al SIAM incrementa significativamente la capacidad de bombeo del sistema, alcanzando un aumento del 11.05% en la capacidad total, que se traduce en un caudal máximo de 1055 m³/h. Esto demuestra que la hipótesis de que la adición aumentaría la capacidad de bombeo fue válida y se alinea con el primer objetivo específico de mejorar la capacidad de bombeo para cubrir la demanda creciente de la planta de ósmosis inversa.
2. **Aumento en la presión de bombeo:** Con la instalación de la cuarta bomba, la presión de bombeo del sistema aumentó un 8.46%, elevando la altura dinámica total de 1265 mca a 1372 mca. Este resultado es crucial para mejorar la eficiencia en la entrega de agua al proceso de desalinización, cumpliendo con el segundo objetivo específico de incrementar la presión del sistema para mejorar el rendimiento general de la planta de ósmosis inversa.
3. **Impacto en la vida útil del sistema:** El análisis también reveló que la adición de la cuarta bomba tiene efectos adversos sobre la vida útil del sistema, reduciéndola en un 15%, con una operatividad efectiva hasta el año 17 en lugar de los 20 años previstos. Este hallazgo responde al tercer objetivo específico de evaluar la degradación del sistema causados por la expansión del SIAM, señalando una necesidad de considerar medidas compensatorias para mitigar este impacto.

4. **Este estudio ha evaluado la viabilidad técnica de ampliar el Sistema de Impulsión de Agua de Mar (SIAM)** en el Puerto de Marcona mediante la adición de una cuarta bomba, con el fin de satisfacer la creciente demanda de agua de la planta de ósmosis inversa. Los resultados obtenidos confirman que la ampliación del SIAM mediante la adición de una cuarta bomba se presenta como una solución técnicamente viable para aumentar la capacidad de bombeo y la presión, cumpliendo con la demanda actual de la planta de ósmosis inversa. No obstante, es imperativo considerar las implicaciones a largo plazo en la vida útil del sistema.

RECOMENDACIONES

1. Realizar evaluaciones regulares de la eficiencia del sistema para asegurar que las mejoras en la capacidad y la presión no comprometan otros aspectos operativos, particularmente en lo que respecta a la energía consumida y los costos operacionales.
2. Dado el aumento de la carga operativa y los efectos corrosivos y de desgaste aumentados por la adición de la nueva bomba, es esencial diseñar e implementar un programa de mantenimiento robusto que aborde estos retos y prolongue la vida útil del sistema.
3. Investigar y evaluar alternativas de diseño que puedan ofrecer mejoras en la eficiencia sin comprometer la vida útil del sistema. Esto podría incluir la utilización de materiales más resistentes a la corrosión, el rediseño de componentes críticos, o la integración de tecnologías avanzadas de control y monitoreo.
4. Implementar dispositivos o sistemas que ayuden a reducir el impacto del aumento de presión y caudal sobre la estructura existente, como sistemas de amortiguación o válvulas de alivio de presión más eficientes, para proteger el sistema contra fenómenos como el golpe de ariete.
5. Capacitar al personal técnico en la operación y mantenimiento del sistema ampliado para garantizar que todas las mejoras y cambios sean gestionados de manera efectiva y segura.

REFERENCIAS

- Asociación Estadounidense de Obras Hidráulicas (AWWA). (2019). Tomas para instalaciones de desalinización de agua de mar.
- Bayona, C. (2024). Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. <https://iimp.org.pe/noticias/antofagasta-minerals-considera-que-proyectos-en-el-peru-tambien-pueden-usar-agua-de-mar>
- Bielich, P., & Huertas, A. (2022). Proyecto de construcción de Optimización del Sistema de Impulsión Booster Pad 2, del proceso de lixiviación para la extracción de oro, bajo los estándares Globales del PMI, para la dirección de proyectos. Lima: Universidad de Ciencias Aplicadas.
- Curto, D., Franzitta, V., y Guercio, A. (2021). Una revisión de las tecnologías de desalinización del agua. *Applied Sciences*, 11(2), 670. <https://doi.org/10.3390/app11020670>
- Chie, LH y Abd Wahab, AK (2020). Derivación de criterios de diseño de ingeniería para el campo de flujo alrededor de la estructura de entrada: un estudio de simulación numérica. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (10), 827. <https://doi.org/10.3390/jmse8100827>
- Feria-Díaz, JJ, Correa-Mahecha, F., López-Méndez, MC, Rodríguez-Miranda, JP, & Barrera-Rojas, J. (2021). Tecnologías recientes de desalinización por hibridación e integración con ósmosis inversa: una revisión. *Agua*, 13(10), 1369. <https://doi.org/10.3390/w13101369>

- Gosling, SN, & Arnell, NW (2016). Una evaluación global del impacto del cambio climático en la escasez de agua. *Cambio climático*, 134 (3), 371-385.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0853-x>
- Gleick, P. H. (1993). *Water in crisis: A guide to the world's water problems*. Oxford University Press.
- Gómez, G. (2013). *Desalinización: Una alternativa para el futuro del agua dulce*. Tecnociencia.
- Heiranian, M., Fan, H., Wang, L., Lu, X. y Elimelech, M. (2023). Mecanismos y modelos para el transporte de agua en membranas de ósmosis inversa: historia, evaluación crítica y desarrollos recientes. *Chemical Society Reviews*.
<https://doi.org/10.1039/D3CS00395G>
- Lee Hooi Chie y Ahmad Khairi Abd Wahab (2020). Derivación de criterios de diseño de ingeniería para el campo de flujo alrededor de la estructura de entrada: un estudio de simulación numérica. *J. Mar. Sci. Eng.*, 8(10), 827.
<https://doi.org/10.3390/jmse8100827>
- Mastropietro, TF, Bruno, R., Pardo, E., & Armentano, D. (2021). Membranas de ósmosis inversa y nanofiltración para la eliminación altamente eficiente de PFAS: descripción general, desafíos y perspectivas futuras. *Dalton Transactions*, 50 (16), 5398-5410.
<https://doi.org/10.1039/D1DT00360G>
- MDPyR (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego). (2016). *Plan Nacional de Recursos Hídricos 2016-2030*. MDPyR.
- Muller, M. G. (2011). Integrating climate change impact assessment and agricultural water management into the CGIAR research agenda. *Agricultural Water Management*.

- Olivera, F. (2023). Análisis del comportamiento hidráulico del fenómeno de golpe de ariete en el sistema de abastecimiento de agua Vilcanota de la ciudad de Cusco. Universidad Nacional San Antonio Abad.
- Ramirez, A. (2020). Fenómenos transitorios en el diseño de una línea de impulsión – Caso Minera La Zanja. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Repositorio OceanBestPractices. (2019). Consideraciones sobre la captación de agua de mar para mitigar los impactos de las floraciones de algas nocivas.
- Stewart, C., Gormley, M., Xue, Y., Kelly, D. y Campbell, D. (2021). Análisis hidráulico en estado estacionario de redes de drenaje de aguas residuales de edificios de gran altura: base de modelado. *Buildings*, 11 (8), 344. <https://doi.org/10.3390/buildings11080344>
- Valdés, H., Saavedra, A., Flores, M., Vera-Puerto, I., Aviña, H., & Belmonte, M. (2021). Concentrado de ósmosis inversa: características fisicoquímicas, impacto ambiental y tecnologías. *Membranes*, 11 (10), 753. <https://doi.org/10.3390/membranes11100753>
- Wilf, M. (2016). *Desalination: A global perspective*. John Wiley & Sons.
- WWAP (World Water Assessment Programme). (2014). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and energy*. UNESCO.
- Yamini, OA, Movahedi, A., Mousavi, SH, Kavianpour, MR y Kyriakopoulos, GL (2022). Rendimiento hidráulico del sistema de toma de agua de mar mediante modelado CFD. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10 (7), 988. <https://doi.org/10.3390/jmse10070988>
- Yokogawa. (2021). BN-P-20211012-01 Sistemas de ósmosis inversa. <https://web-material3.yokogawa.com>

ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1: Matriz de Consistencia | 81 |
| Anexo 2: Matriz de Operacionalización de variables | 82 |
| Anexo 3: Curva de Rendimiento de las bombas | 83 |
| Anexo 4: Inercia del Motor eléctrico (1-2) | 84 |
| Anexo 5: Inercia del Motor eléctrico (2-2) | 85 |

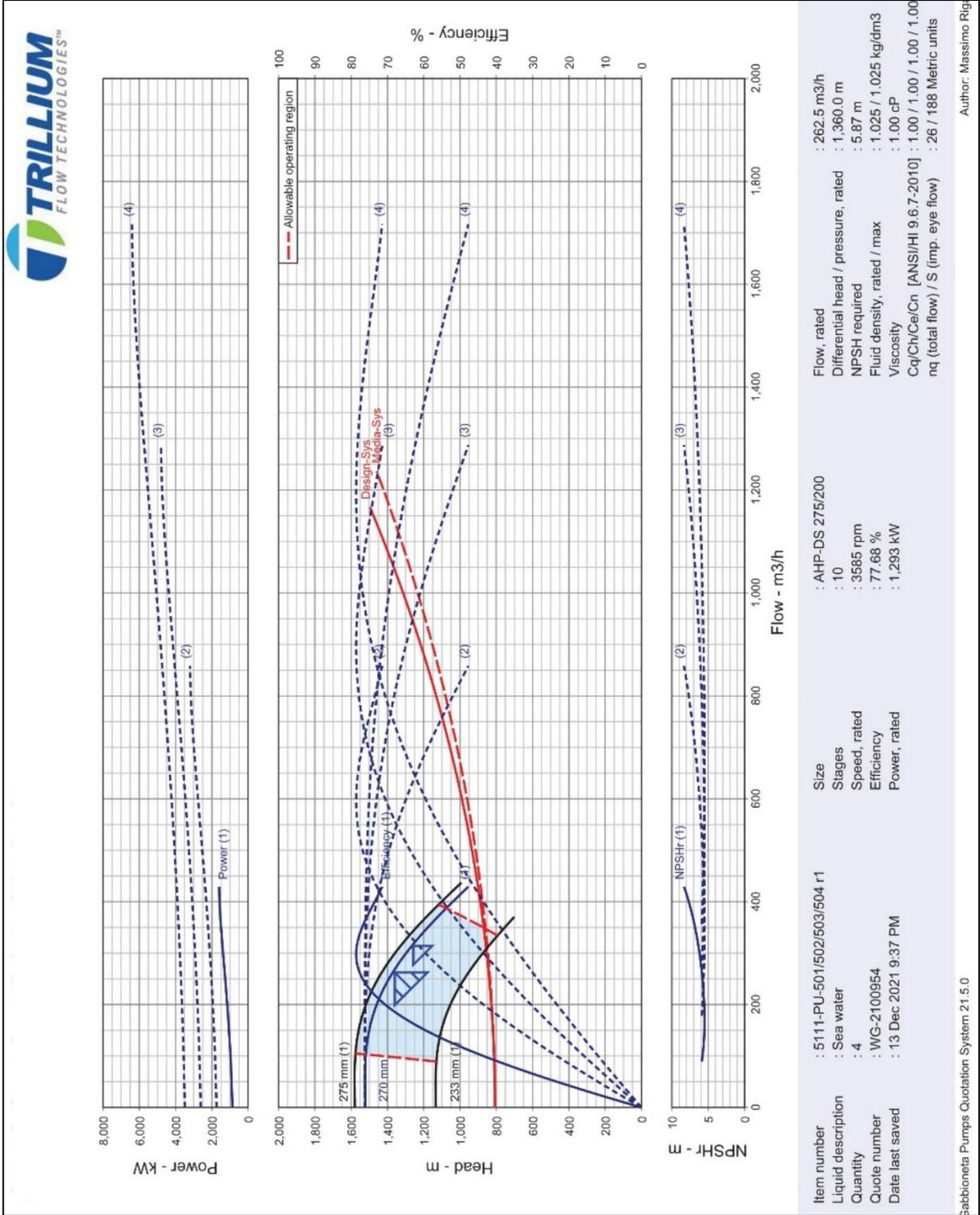
Anexo 1: Matriz de Consistencia

| PROBLEMA PRINCIPAL | OBJETIVO GENERAL | HIPÓTESIS GENERAL | VARIABLES | METODOLOGÍA |
|---|--|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ¿Qué efecto tiene la ampliación de un Sistema de Impulsión de Agua de Mar para una Planta de ósmosis inversa en el Puerto de Marcona? | <ul style="list-style-type: none"> Evaluar la viabilidad técnica de ampliar un Sistema de Impulsión de Agua de Mar para cubrir la demanda de agua de una Planta de ósmosis inversa en el Puerto de Marcona. | <ul style="list-style-type: none"> La ampliación de un sistema de impulsión de agua de mar es viable técnicamente para cubrir la demanda de agua de una Planta de ósmosis inversa en el Puerto de Marcona. | | |
| PROBLEMAS ESPECÍFICOS | | | | |
| <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. ¿De qué manera se logra mejorar la capacidad de bombeo de agua en un Sistema de Impulsión de agua de mar existente para cubrir la demanda de agua de la Planta de Ósmosis Inversa? b. ¿De qué manera se puede incrementar la presión de bombeo de agua a un Sistema de Impulsión de agua de mar existente para cubrir la demanda de agua de la Planta de Ósmosis Inversa? c. ¿De qué manera se puede degradar el sistema de impulsión de Agua de Mar al ampliarlo para cubrir la demanda de agua de la Planta de Ósmosis Inversa? | <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Analizar hidráulicamente la adición de 01 cuarta Bomba a un Sistema de Impulsión de Agua de Mar compuesto por 03 bombas para aumentar la capacidad de bombeo b. Determinar el incremento de la presión de bombeo del Sistema de Impulsión de Agua de Mar al adicionar 01 cuarta Bomba de similares características c. Analizar la degradación producida en el Sistema de Impulsión de Agua de Mar al adicionar 01 cuarta Bomba de similares características. | <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. La adición de 01 cuarta Bomba al Sistema de Impulsión de Agua de Mar aumenta la capacidad de bombeo del sistema. b. La adición de 01 cuarta Bomba al Sistema de Impulsión de Agua de Mar incrementa la presión de bombeo del sistema. c. La adición de 01 cuarta Bomba al Sistema de Impulsión de Agua de Mar produce degradación en el sistema. | <p>VARIABLE DEPENDIENTE:</p> <p>Demanda de agua de la Planta de ósmosis inversa</p> <p>VARIABLE INDEPENDIENTE:</p> <p>Capacidad del sistema de impulsión de agua de mar</p> | <p>Nivel: Descriptivo</p> <p>Tipo: Aplicada y Enfoque Cuantitativo</p> <p>Diseño: No Experimental</p> |

Anexo 2: Matriz de Operacionalización de variables

| Definición nominal | Definición real | Definición operacional | Dimensión | Indicadores | Técnicas e Instrumentos |
|---|--|---|---|--|---|
| VD: Demanda de agua de la Planta de ósmosis inversa | Volumen de agua que la Planta de ósmosis inversa necesita para operar a su máxima capacidad de producción | Diferencia entre el volumen de agua que la planta está diseñada para procesar por unidad de tiempo en un tiempo determinado y el volumen de agua que la planta realmente produce por unidad de tiempo en un tiempo determinado. | Volumen de agua demandada | Caudal de agua (m ³ /h) | Técnica: Revisión documental Instrumentos: Diseño de Ingeniería |
| VI: Capacidad del sistema de impulsión de agua de mar | Volumen máximo de agua de mar que el sistema de impulsión puede transportar por unidad de tiempo a la Planta de Ósmosis Inversa. | Volumen máximo de agua que el sistema puede bombear por unidad de tiempo a la presión máxima que el sistema puede generar al final de la tubería. | Capacidad de bombeo Presión de bombeo Degradamiento del sistema | Caudal de bombeo máximo (m ³ /h) Altura dinámica de trabajo NPSH (m.c.a) Vida útil del sistema (años) | Técnica: Observación Estructurada Instrumentos: Registros de observación |

Anexo 3: Curva de Rendimiento de las bombas



Anexo 4: Inercia del Motor eléctrico (1-2)

| DATA SHEET | |  | | | |
|---|------------------------|---|--------------------------|----------------|----------|
| Three Phase Induction Motor - Squirrel Cage Rotor | | | | | |
| Customer | | : WEIR GABBIONETA | | | |
| Product line | | : W60 | | | |
| Frame | : 450 | Service factor | : 1.10 | | |
| Output | : 1750 kW | Moment of inertia | : 20.9 kgm ² | | |
| Poles | : 2 | Locked rotor time | : 10s (hot) | | |
| Frequency | : 60 Hz | Temperature rise ³ | : class B at SF 1.00 | | |
| Rated voltage | : 4160 V Connect.: Y | Temperature rise at SF | : class F at SF 1.10 | | |
| Rated current | : 280.5 A | Duty cycle | : S1 | | |
| Rotor voltage | : Not applicable | Ambient temperature | : 0 °C up to 40 °C | | |
| Rotor current | : Not applicable | Altitude | : 1000 m | | |
| Locked rotor current | : 1964 A | Protection Degree | : IP56 | | |
| LRC (p.u.) | : 7 | Cooling method | : IC511 | | |
| No load current | : 56.1 A | Mounting | : B3R | | |
| Rated speed | : 3582 rpm | Direction of rotation ¹ | : Counterclockwise | | |
| Slip | : 0.5 % | Noise level ² | : 83 dB(A) | | |
| Rated torque | : 4666 Nm | Vibration | : A 2.3 mm/s rms | | |
| Locked rotor torque | : 85 % | Starting method | : Frequency inverter | | |
| Breakdown torque | : 250 % | Coupling | : Direct | | |
| Insulation class | : H | | | | |
| Output | 50% 75% 100% | Load type | : Centrifugal pump | | |
| Efficiency(%) | 95.5 96.1 96.2 | Load torque | : 4642 Nm | | |
| Power factor | 0.85 0.89 0.9 | Load Inertia (J=GD ² /4) | : 0.925 kgm ² | | |
| Operation limits with frequency inverter 30 Hz up to 60 Hz (Variable torque) | | Voltage Peak Phase-to-Ground | : <= 3800 V | | |
| | | Voltage Peak Phase-Phase | : <= 6500 V | | |
| | | dV/dt | : <= 1800 V/us | | |
| | | THD maximum | : < 5% | | |
| Notes: | | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> - Stray load losses 0.50% of input power. - The motor is suitable for 3 cold starting(s) or 2 hot starting(s) - Thermal limit curve at CM-13591/2018 - Torque vs speed curve for vfd starting at CM-16965/2017 - Torque and current vs speed curve at CM-16966/2017 - Stiff shaft design | | | | | |
| Standards | Specification | : IEC 60034-1 | Vibration | : IEC 60034-14 | |
| | Test | : IEC 60034-2 | Tolerance | : IEC 60034-1 | |
| | Noise | : IEC 60034-9 | | | |
| This revision replaces and cancel the previous one, which must be eliminated. (1) Locking the motor from the shaft end. (2) Measured at 1m and with tolerance of +3dB(A). (3) At the rated point. | | These are average values based on tests with sinusoidal power supply, subject to the tolerances stipulated. | | | |
| Rev. | Changes Summary | | Performed | Checked | Date |
| 4 | FOR APPROVAL | | NILSONL | | |
| Performed by | SIDNEIBELLE | | | 37409 / 2017 | |
| Checked by | TVOIGT | | | Page | Revision |
| Date | 21/NOV/2017 | | | 1 / 2 | 4 |

Anexo 5: Inercia del Motor eléctrico (2-2)

| PLANILLA DE DATOS | |  | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------|--|--------------------------|------------|-------|----------------|------|------|------|--------------------|------|------|-----|--|--|--|
| Motor Trifásico de Inducción - Rotor de Jaula | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cliente | | : WEIR GABBIONETA | | | | | | | | | | | | | | |
| Línea del producto | | : W60 | | | | | | | | | | | | | | |
| Carcasa : 450 Potencia : 1750 kW Polos : 2 Frecuencia : 60 Hz Tensión nominal : 4160 V Conexión: Y Corriente nominal : 280.5 A Tensión secundaria : No se aplica Corriente secundaria : No se aplica Corriente de arranque : 1964 A I _p /I _n : 7 Corriente en vacío : 56.1 A Rotación nominal : 3582 rpm Deslizamiento : 0.5 % Par nominal : 4666 Nm Par de arranque : 85 % Par máximo : 250 % Clase de aislamiento : H | | Factor de servicio : 1.10 Momento de inercia : 20.9 kgm ² Tiempo de rotor bloqueado : 10s (caliente) Elevación de temperatura ¹ : clase B con FS 1.00 Elevación de temperatura en FS : clase F con FS 1.10 Régimen de servicio : S1 Temperatura Ambiente : 0 °C hasta 40 °C Altitud : 1000 m Grado de Protección : IP56 Método de enfriamiento : IC611 Forma constructiva : B3R Sentido de giro ¹ : Anti-horario Nivel de ruido ² : 83 dB(A) Vibración : A 2.3 mm/s rms Método de Arranque : Convertidor de frecuencia Acoplamiento : Directo | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <tr> <td>Potencia</td> <td>50%</td> <td>75%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>Rendimiento(%)</td> <td>95.5</td> <td>96.1</td> <td>96.2</td> </tr> <tr> <td>Factor de potencia</td> <td>0.85</td> <td>0.89</td> <td>0.9</td> </tr> </table> | | Potencia | 50% | 75% | 100% | Rendimiento(%) | 95.5 | 96.1 | 96.2 | Factor de potencia | 0.85 | 0.89 | 0.9 | Tipo de carga : Bomba centrífuga Par de la carga : 4642 Nm Inercia de la carga (J=GD ² /4) : 0.925 kgm ² | | |
| Potencia | 50% | 75% | 100% | | | | | | | | | | | | | |
| Rendimiento(%) | 95.5 | 96.1 | 96.2 | | | | | | | | | | | | | |
| Factor de potencia | 0.85 | 0.89 | 0.9 | | | | | | | | | | | | | |
| Límites de operación con convertidor de frecuencia 30 Hz hasta 72 Hz (Par variable) | | Tensión de Pico Fase-Tierra : <= 3800 V Tensión de Pico Fase-Fase : <= 6500 V dV/dt : <= 1800 V/us TDH máxima : < 5% | | | | | | | | | | | | | | |
| Notas: - Pérdidas suplementarias: 0.50% de la potencia absorbida - Motor apto a 3 arranque en frío o 2 en caliente - Par y corriente x rotación, ver curva CM-13594/2018 - Curva de par x rotación para convertidor de frecuencia:cm-13593/2018 - Límite térmico, ver curva CM-13592/2018 - S112# stiff shaft design | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Normas | Especificación : IEC 60034-1 | | Vibración : IEC 60034-14 | | | | | | | | | | | | | |
| | Ensayos : IEC 60034-2 | | Tolerancia : IEC 60034-1 | | | | | | | | | | | | | |
| | Ruido : IEC 60034-9 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Esta revisión substituí y cancela la anterior, la cual deberá ser eliminada. (1) Mirando la punta delantera del eje del motor. (2) Medido a 1m y con tolerancia de +3dB(A). (3) En 100% de la carga. | | Los valores indicados son valores médio con base en ensayos y para alimentación en red senoidal, sujetos a las tolerancias de la norma. | | | | | | | | | | | | | | |
| Rev. | Resumen de los cambios | | Ejecutado | Verificado | Fecha | | | | | | | | | | | |
| 1 | PARA APROBACION | | NILSONL | | | | | | | | | | | | | |
| Ejecutor | ESCAMILLA | | 28990 / 2018 | | | | | | | | | | | | | |
| Verificador | NILSONL | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fecha | 4/JUL/2018 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Página | Revisión | | | | | | | | | | | | | |
| | | 2 / 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | |