ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

"GESTIÓN DE INTEGRIDAD DE DUCTOS DE LA PLANTA DESALADORA EWS DE MINERA ESCONDIDA LIMITADA"

Camila Tramon Illanes

Proyecto para optar al Título de Ingeniera Civil Mecánica

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Profesora Guía: María Josefina Torres

Profesor Co-Guía: Cristóbal Galleguillos

2020

AGRADECIMIENTOS

No hay palabras que puedan describir la emoción, felicidad y energía que siento en mí, por haber culminado con éxito mi periodo de estudio.

Agradezco en primer lugar a la Universidad Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, quien me ha brindado un desarrollo tanto profesional como personal.

Quiero agradecer la valiosa colaboración y confianza otorgada por la empresa BHP, Minera Escondida quienes me permitieron el desarrollo del presente trabajo.

A mis padres Claudio Tramon y Pamela Illanes por haberme proporcionado la mejor educación, lecciones de vida y su gran su apoyo, a mi hermana Ignacia Tramon por estar siempre a mi lado.

A mis compañeros de clase, con los que he compartido grandes momentos Nicolás Araya, Sebastián Sanhueza, Diego Jopia y Nicolás Ponce.

Agradezco a todas aquellas personas que de una u otra forma me apoyaron para alcanzar mi meta.

Gracias

"Ningún hombre esta vencido mientras el mismo no se rinda en su propia mente…",
Napoleón Hill

RESUMEN

Chile se encuentra inmerso en una gran crisis hídrica hace más de 10 años, siendo la zona norte del país la más afectada [1]. La actividad minera, también localizada principalmente en el norte de país, está asociada al consumo de elevadas cantidades de agua para su funcionamiento. En la Región de Antofagasta, Minera Escondida Limitada (MEL) construyó la planta desalinizadora más grande de Latinoamérica, finalizada en 2017. Esta planta, llamada Escondida Water Supply (EWS), actualmente aporta con el 62% de los requerimientos hídricos de la mina La Escondida, propiedad de MEL [2]. Una vez tratada el agua salada en la planta, esta debe ser trasladada hasta la mina, ubicada a 178 Km de distancia y 3332 m.s.n.m. Para esto, el sistema cuenta con 2 circuitos de tuberías, las cuales se encuentran expuestas a diversos factores que pueden alterar su integridad, tales como la corrosión interna y externa, sedimentación, desastres naturales y otros. Para asegurar su funcionamiento adecuado y no comprometer su importante aporte hídrico, es necesario mantener un protocolo estricto de mantención, el cual aún no se ha desarrollado.

El objetivo de esta memoria es generar un sistema de gestión de integridad a partir de estrategias de mantenimiento que aseguren la integridad de las condiciones físicas de las tuberías de EWS, además de analizar el comportamiento de las pérdidas de carga y evaluar si es necesario utilizar dispositivos para la limpieza interna de estas.

El sistema de impulsión está compuesto por dos tuberías de acero al carbono de 42” de diámetro y cada una se compone de cuatro estaciones de bombeo de alta presión, ubicadas en paralelo. Ambas líneas viajan desde el puerto El Coloso, Antofagasta, donde se ubica la planta desalinizadora, hasta un reservorio común en Minera Escondida limitada. En cada estación de bombeo se pueden encontrar: estanques de balance de agua, bombas de alta presión, líneas de recirculación, válvulas de control y flujómetros. Además, existen válvulas entre las estaciones, las cuales pueden ser de retención, drenaje o venteo, siendo estas últimas de especial importancia en el sistema de tuberías [3].

Los principales problemas que afectan la integridad de las tuberías y el óptimo funcionamiento de las líneas son la corrosión (interna y externa) y las pérdidas de carga, que están determinadas por múltiples factores.

Para evaluar la corrosión interna se utilizaron los siguientes elementos: cupones de corrosión, probetas resistencia de polarización lineal, análisis químico y bacteriológico del agua y robot

de video-inspección. Las condiciones internas de las tuberías se estudiaron mediante análisis de precipitación de sedimentos en los filtros y pérdidas de carga del sistema entre estaciones. Con los controles ejecutados en EWS y normas establecidas, se elaboraron planes de mantenimiento con el fin de indicar de forma clara la frecuencia y controles necesarios para garantizar la durabilidad y también mitigar factores que afecten a su integridad.

El control de la corrosión externa está basado en un revestimiento externo y el sistema de protección catódica. Se evaluó la condición externa de las tuberías mediante las siguientes técnicas: Inspección visual, Medición de espesores por UT(ultrasonido), técnicas CIPS y DCVG.

Se implementaron planes de mantenimiento con frecuencias y actividades con controles ya ejecutados en EWS, y también se incluyeron nuevas actividades para asegurar la integridad externa de la tubería como: Prueba de tensión Holiday y Mantenimiento de los elementos del sistema de protección catódica, estos ayudarán a verificar las condiciones en la que se encuentra y, además ayuda a proteger al sistema de protección catódica de posibles fallas de algunos de sus elementos. El sistema protege a las tuberías en los lugares donde el revestimiento ha fallado, actuando como la segunda línea de defensa contra la corrosión tras el revestimiento externo en tuberías enterradas.

Las pérdidas de cargas, que pueden ser estáticas o dinámicas, se establecieron mediante la creación de un perfil hidráulico. Los factores que determinan la pérdida de carga son la rugosidad, corrosión, falla de revestimiento, obstrucciones al paso del flujo y filtraciones, entre otros. Complementariamente se realizó un análisis de costos operacionales y la relación costo-efectividad de realizar un proceso de limpieza interna de forma periódica (PIG), el cual fue desestimado debido al bajo costo que implican las condiciones actuales de pérdida de carga entre los distintos tramos.

ABSTRACT

Chile has been immersed in a major water crisis for more than 10 years, with the northern part of the country being the most affected. Mining activity, also located mainly in the north of the country, is associated with the consumption of high amounts of water for its operation. In the Antofagasta Region, Minera Escondida Limitada (MEL) built the largest desalination plant in Latin America, completed in 2017. This plant, called Escondida Water Supply (EWS), currently contributes 62% of the water requirements of the La mine Hidden, owned by MEL. Once the salt water in the plant has been treated, it must be transferred to the mine, located 178 km away and 3,332 m.s.m. For this, the system has two pipe circuits, which are exposed to various factors that can alter its integrity, such as internal and external corrosion, sedimentation, natural disasters, and others. To ensure its proper functioning and not compromise its important water supply, it is necessary to maintain a strict maintenance protocol, which has not yet been developed.

The objective of this report is to generate maintenance plans to ensure the integrity of the physical conditions of the EWS pipes, in addition to analyzing the behavior of head losses and evaluating whether it is necessary to use devices for internal cleaning of these.

The delivery system is made up of two 42”diameter carbon steel pipes and each consists of four high-pressure pumping stations, located in parallel. Both lines travel from El Coloso port, Antofagasta, where the desalination plant is located, to a common reservoir at Minera Escondida limited. In each pumping station, you can find water balance tanks, high-pressure pumps, recirculation lines, control valves and flowmeters. In addition, there are valves between the stations, which can be check, drain or vent, the latter being of special importance in the piping system.
The main problems that affect the integrity of the pipes and the optimal operation of the lines are corrosion (internal and external) and pressure drops, which are determined by multiple factors.

The following elements were used to evaluate internal corrosion: corrosion coupons, linear polarization resistance test pieces, chemical and bacteriological analysis of water, and a video-inspection robot. The internal conditions of the pipes were studied through analysis of sediment precipitation in the filters and pressure drops of the system between stations.

With the controls carried out in EWS and established standards, maintenance plans were developed in order to clearly indicate the frequency and controls necessary to guarantee durability and also mitigate factors that affect its integrity.
The external corrosion control is based on an external coating and the cathodic protection system. The external condition of the pipes was evaluated using the following techniques: Visual inspection, Thickness measurement by UT (ultrasound), CIPS and DCVG techniques.

Maintenance plans with frequencies and activities with controls already implemented in EWS were implemented, and new activities were also included to ensure the external integrity of the pipeline such as: Holiday stress test and Maintenance of the elements of the cathodic protection system, these will help verify the conditions in which it is found, and also helps protect the cathodic protection system from possible failures of some of its elements. The system protects pipes in places where the lining has failed, acting as the second line of defense against corrosion after external lining in buried pipes.

The head losses, which can be static or dynamic, were established by creating a hydraulic profile. The factors that determine the pressure drop are roughness, corrosion, coating failure, obstructions to the flow path and leaks, among others. In addition, an analysis of operational costs and the cost-effectiveness ratio of carrying out a periodical internal cleaning process (PIG) was carried out, which was rejected due to the low cost implied by the current load loss conditions between the different sections.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS 2
RESUMEN 3
ABSTRACT 5
GLOSARIO 9
1. INTRODUCCIÓN 11
1.1. OBJETIVOS 12
1.1.1. OBJETIVOS GENERALES 12
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 12
2. MARCO TEÓRICO 13
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA EMPRESA Y SUS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS 13
2.2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA Y SUS COMPONENTES 13
2.2.1 SISTEMA DE IMPULSIÓN 14
2.2.2 LÍNEAS DE TUBERÍAS 14
2.2.3. CONDICIONES ACTUALES DE BOMBEO 16
2.2.4. VÁLVULAS 17
2.2.4.1 VÁLVULA ENTRE ESTACIONES 17
2.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA 19
2.3.1 CORROSIÓN 19
2.3.1.1 CORROSIÓN EXTERNA 20
2.3.1.2 CORROSIÓN INTERNA 21
2.3.2 PÉRDIDA DE CARGA 22
3. METODOLOGÍA 24
3.1 TÉCNICA DE MONITOREO DE LA TASA DE CORROSIÓN INTERNA 24
3.1.1. CUPONES DE CORROSIÓN 24
3.1.2. PROBETAS DE RESISTENCIA DE POLARIZACIÓN LINEAL (LPR), SENSORES DE CORROSIÓN: 25
3.1.3. ANÁLISIS QUÍMICO Y BACTERIÓLOGO DEL AGUA 26
3.2. TÉCNICAS DE MONITOREO DE CONDICIONES INTERNAS DE LA TUBERÍA 29
3.2.1. ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN DE SEDIMENTOS EN FILTROS DE BOMBAS DE IMPULSIÓN 29
3.2.2 PLAN DE MANTENIMIENTO CON ROBOT DE VIDEO-INSPECCIÓN 30
3.2.3 PERFIL HIDRÁULICO, PÉRDIDAS DE CARGA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE AGUA 31
3.2.5 INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS VÁLVULAS DE VENTEO 36
3.3 SISTEMA DE DETECCIÓN DE FUGAS, LEAK DETECTION 37

3.4 CONTROL CORROSIÓN EXTERNA 38
3.4.1 SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA 39
3.4.2 MEDICIÓN DE ESPESOR DE LA PARED 41
3.4.3 TÉCNICA CIPS ("CLOSE INTERVAL POTENTIAL SURVEY") 43
3.4.4 TÉCNICA DCVG ("DIRECT CURRENT VOLTAGE GRADIENT") 44
3.4.5 PRUEBA DE TENSIÓN "HOLIDAY" 45
3.5 ANÁLISIS DE CONDICIONES AMBIENTALES 46
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS 48
4.1 INSPECCIÓN Y PLAN DE MANTENIMIENTO REVESTIMIENTO INTERNO 48
4.1.1 PROBETA ELÉCTRICA (LPR), *sensor de corrosión* 48
4.1.2 FILTRO DE SUCCIÓN DE BOMBAS 52
4.1.3 ROBOT DE VIDEO INSPECCIÓN 54
4.1.4 ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE CARGA 57
4.1.5 LIMPIEZA "PIG" o CHANCHO 72
4.2 INSPECCIÓN Y PLAN DE MANTENIMIENTO REVESTIMIENTO EXTERNO 74
4.2.1 PLAN DE INSPECCIÓN, TÉCNICA CIPS ("Close Interval Potential Survey") 78
4.2.2 TÉCNICA "DCVG" 83
4.2.3 HOLIDAY DETECTOR 84
4.2.4 SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA 86
4.2.5 MEDICIÓN DE ESPESOR UT 91
4.3 VÁLVULAS DE VENTEO 94
3.4 MITIGACIÓN DESASTRES NATURALES 95
4.4.1 VULNERABILIDAD DE LLUVIA SEVERAS 95
5. RECOMENDACIONES 100
6. CONCLUSIONES 103
6. BIBLIOGRAFÍA 104
7. ANEXOS 107
7.1 ANEXO 1 107
7.2 ANEXO 2 108
7.3 ANEXO 3 109

GLOSARIO

Bombas de alta presión: es una máquina capaz de transformar energía mecánica en energía potencial para el fluido.

Flujómetros: son instrumentos medidores de caudal y velocidad de un fluido que se encuentre en movimiento.

Manómetro: Un manómetro es un instrumento empleado para medir la presión de un fluido en circuitos cerrados.

Válvulas de corte o bloqueo: Estas válvulas tienen como función obstruir el paso del fluido, generar un corte según el propósito dentro del sistema.

Válvulas "Tee": Válvulas con tres conexiones de tubería.

Válvulas de retención: Son válvulas encargadas de impedir la inversión del flujo en las tuberías, permitir el paso en un solo sentido.

Manifold: son elementos fundamentales en las redes de distribución de fluidos regulando el flujo de éstos en un sistema hidráulico entre bombas, actuadores y otros componentes.

Válvula Bypass: Esta válvula cumple la función de controlar la presión de un circuito hidráulico.

Flange ciego: Este elemento es usado para cerrar un extremo de una línea, un extremo de una válvula, alguna conexión de un equipo.

"Pig" de limpieza: son herramientas utilizadas para limpiar la superficie interna de las tuberías.

Subpresiones: Golpe de presión negativa al momento del vaciado de la tubería (drenaje), ya sea voluntaria o accidentalmente.

Sobrepresiones: Golpe de presión positiva superiores a la presión admisible del sistema, debido a acumulación de aire que no son evacuados al exterior de la tubería pudiendo causar rotura.

Alarma "High": Alarma que indica que el equipo se encuentra en el límite de su funcionamiento.

Ion: Es una partícula cargada eléctricamente constituida por un átomo o molécula que no es eléctricamente neutro

Electrolito: Es cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que se comporte como un conductor eléctrico.

Electrodo: Un electrodo es un conductor eléctrico utilizado para hacer contacto con una parte no metálica de un circuito.

Tubería Polarizada: Estructura protegida a través de un flujo de electrones repartidos por toda la superficie externa, lo cuales son recibidos de un ánodo (electrodo).

Caída IR (%): Tensión generada por una corriente aplicada entre dos puntos de una estructura metálica o gradiente de potencial originado en un electrolito, medido entre un electrodo de referencia y el metal de un ducto o estructura, conforme con la ley de Ohm (V=IR).

Corriente continua: Es un flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial y carga eléctrica.

Corriente Alterna: Se denomina a la corriente eléctrica en la que la magnitud y el sentido varían cíclicamente.

Rectificadores: Un rectificador es el dispositivo electrónico que permite convertir la corriente alterna en corriente continua.

Test-Point: Estaciones de test para control de potenciales en zona de estudio, se usa para inspección del aérea y registro de la protección catódica**.**

Perfil de resistividades: La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad.

Camas anódicas: Son un conjunto de ánodos que suministran corriente para la protección de la estructura, estos pueden ser de tipo sacrificial o de corriente impresa, conectados a la tubería a través de estacione de prueba.

Aislamiento eléctrico: es un material cuyas cargas eléctricas internas no pueden moverse causando una escasa magnitud de corriente bajo la influencia de un campo eléctrico.

Enrocado: Es un procedimiento que se realiza para proteger obras de ingeniería el cual está conformado por algún tipo de roca.

Encauzada: Corriente de fluido dirigido por otro camino.

Quebrada: Paso estrecho y abrupto entre montañas.

Terraplén: Montón de tierra con que se rellena un hueco o que se levanta con un fin determinado.

Detrítico: Es cualquier formación sedimentaria que está compuesta de productos de la descomposición de rocas preexistentes.

1. INTRODUCCIÓN

Chile se encuentra inmerso en una gran crisis hídrica desde hace más de 10 años [1]. Dentro de los factores determinantes en esta, se encuentra la reducción de las precipitaciones (30% en el último siglo en la zona central), la mega-sequía instalada desde 2010, la deforestación, la construcción en las cuencas y el aumento acelerado en el consumo de agua dulce. Según el informe de la Dirección General de Aguas de Chile (2016) [4], la minería consume un 3% del total de agua a nivel nacional, teniendo mayor importancia aún al considerar que muchas minas del país se encuentran en la zona norte, donde la disponibilidad de agua es considerablemente más reducida que en el centro y sur [5].

Desde el año 2002, con el fin de combatir su propia sequía, Israel lleva desarrollando un programa de construcción de plantas desaladoras, las cuales han permitido tratar las aguas marinas y subterráneas, haciéndolas útiles para distintos fines como agricultura y minería [6]. A día de hoy, el agua desalinizada corresponde a la principal fuente de agua fresca en este país, representando más de un 30% de la oferta total [7].

Como medida para combatir el déficit hídrico nacional y reducir su impacto en este, Minera Escondida Limitada (MEL) construyó la planta desalinizadora más grande de Latinoamérica entre los años 2013 y 2017 [8]. Esta es conocida como EWS (Escondida Water Supply) y está ubicada en Puerto el Coloso, en la Región de Antofagasta. EWS es una de las principales fuentes de suministro de agua para la mina La Escondida, aportando con aproximadamente el 62% del total de agua necesaria para cumplir con la demanda de las plantas concentradoras propias y de otros clientes [2]. Para llegar hasta la mina, el agua debe transportarse una distancia de 180 Km Al considerar la magnitud de la importancia de la desalinización en esta empresa, se hace evidente que su mantención es un factor clave, tanto para evitar problemas medio ambientales como de operaciones. Con este objetivo, ha surgido la necesidad de implementar un Plan de Gestión Integrado de las Tuberías del Sistema de Transporte EWS.

El plan deberá considerar un análisis de la integridad física y las estrategias de mantenimiento actualmente utilizadas, los cuales ayudarán a definir las frecuencias de inspección y mantenimiento necesarias. Así también, los registros de inspección y las normas asociadas ayudarán a modificar e implementar planes de mantenimiento de EWS para asegurar la calidad de las tuberías; los registros de inspección a analizar son de distintos métodos tecnológicos de registro continuo (CIPS, DCVG, UT, video inspección, análisis de filtros cónicos de bombas, pH y bacteriólogo, entre otros). Además de este análisis, se realizará un estudio de pérdida de carga entre las estaciones de bombeo de las líneas de EWS (Línea A

y Línea B); este análisis se ejecutará para determinar las pérdidas de eficiencia de los tramos entre las estaciones de las tuberías a través de los años. Según la condición en que se encuentren los tramos, se decidirá si se debe enviar un dispositivo de limpieza (“Pig” o “chancho”) y se elaborará un estudio económico de los costos operativos de cada una de las estaciones para verificar la factibilidad de su utilización.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVOS GENERALES

Realizar un análisis íntegro de las tuberías de EWS para verificar su estado físico tanto externo como interno.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.1.2.1. Estructurar un sistema de gestión de integridad de ductos para asegurar las condiciones físicas de las tuberías de EWS a partir de las normas asociadas a la integridad de las tuberías y la información obtenida de evaluaciones del estado de la tubería de años anteriores.

1.1.2.2 Determinar el comportamiento de las pérdidas de carga de cada tramo entre estaciones, durante los últimos 3 años.

1.1.2.3 Analizar el comportamiento interno de los tramos de la tubería según las pérdidas de carga asociadas durante los últimos 3 años.

1.1.2.4 Utilizar los resultados de la evaluación de pérdida de carga para analizar si es recomendable enviar una herramienta “Pig” de limpieza para alguno de los tramos entre las estaciones de las tuberías EWS.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA EMPRESA Y SUS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS

Minera Escondida Limitada (MEL) es una empresa minera dedicada mayormente a la extracción de cobre y corresponde a una de las productoras a cielo abierto más grande del mundo.

El suministro total de agua necesario para abastecer a MEL al mes es de 11.748.022 $[m^3]$, necesarios para poder abastecer a las concentradoras, perforaciones y campamentos, entre otros. El agua total es adquirida a través de aguas frescas (pozos, desaladora y fondo de mina) y agua recuperada (tranque y espesadores de relaves). Actualmente el mayor distribuidor para MEL corresponde a la planta desaladora EWS el cual entrega alrededor del 62% del total de agua necesaria, equivalente a 7.232.286 $[m^3]$ aproximadamente. La expansión de EWS mediante el aumento en el número de bombas, ha determinado un aumento relativo de su aporte a MEL en un 24% desde enero a mayo de 2020 [2]. Esta medida fue necesaria debido a que la compañía disminuyó gran parte de las extracciones de aguas subterráneas por el término de determinados permisos sobre los campos de pozos de acuíferos naturales, en particular del acuífero Monturaqui, que antiguamente aportaba con una 28,5% del agua total y cuyo permiso caducó el 31 de diciembre de 2019 [9].

2.2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA Y SUS COMPONENTES

La planta desalinizadora EWS está ubicada en Puerto Coloso, el cual está situado a aproximadamente 15 Km al sur de la ciudad de Antofagasta, en la II Región de Chile. Fue construida con el fin de utilizar la tecnología basada en el principio de ósmosis inversa (OI) de agua de mar para convertirla en agua fresca, para luego ser transportada desde la costa en Puerto Coloso hasta la mina La Escondida, a 180 Km de distancia y 3.332 m.s.n.m.

La desaladora consta de 5 áreas operacionales:

1. Sistema de captación de agua de mar.
2. Sistema de pre-tratamiento del agua para limpieza fina.
3. Sistema de ósmosis inversa y descarga de agua procesada.
4. Reservorios de agua y estaciones de bombeo de alta presión.
5. Sistema de transmisión de energía para alimentar las instalaciones de la planta.

El agua desalinizada obtenida por EWS es transportada hacia la planta de óxidos (3034,67 m.s.n.m) y también para un reservorio de agua (3234 m.s.n.m), ambos ubicados en MEL. El reservorio tiene una capacidad de 489.000 m^3 para una medición de nivel del 90,9% y está conectado a cañerías de descarga, las cuales están encargadas de distribuir agua por gravedad a tres principales destinos: las concentradoras Laguna seca 1(LS1 u OGP1), Laguna seca 2 (LS2) y Los Colorados. Una pequeña parte es entregada para el consumo de otros clientes [3].

2.2.1 SISTEMA DE IMPULSIÓN

El sistema completo de impulsión de agua desalinizada comprende las siguientes instalaciones principales:

1. Dos tuberías paralelas de 42" de diámetro y aproximadamente 178 Km de largo cada una (Línea A y Línea B).

2. Cuatro estaciones de bombeo en paralelo de alta presión (HPPS): Estación N°1(HPPS1), Estación N°2(HPPS2), Estación N°3(HPPS3) y Estación N°4(HPPS4).

3. Reservorio de agua

Una vez completado el proceso de OI, el agua desalinizada es transportada por un armado de dos tuberías paralelas idénticas, denominadas línea A y línea B, que operan de forma independiente. El sistema cuenta además con 4 estaciones de bombeo de alta presión: la primera estación de bombeo se encuentra en Puerto Coloso y los tres restantes están intermedias antes de llegar al reservorio de Minera Escondida. La capacidad de bombeo permite transportar hasta 4000 L/s de agua desalinizada entre ambas cañerías [3].

2.2.2 LÍNEAS DE TUBERÍAS

Cada línea tiene sus propias bombas dedicadas en cada estación de bombeo con las mismas condiciones. Ambas comienzan el recorrido desde la estación de bombeo HPPS1 en Coloso hasta el reservorio y se encuentran enterradas en toda su longitud, 178 km aproximadamente.

Las tuberías son de 42" de diámetro, fabricadas en acero al carbono API 5L Gr X70. El espesor de la pared es variable según la presión interna de las cañerías. Se encuentran protegidas por revestimiento interior FBE (Fusion Bonded Epoxy) y revestimiento exterior del tipo tri-capa (3LPE), el cual incluye un sistema de protección catódica para mitigar el fenómeno de la corrosión [3,9].

A continuación, se puede observar las Tablas 1 y 2 las características del sistema de tubería de las Línea A y B:

Desde	Hasta	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Distancia [m]	Distancia Total [km]	Elevación entre Estaciones [m]
Estación Bomba N°1	Estación Bomba N°2	1066,8	30,2	3	68,17	12-753,49
			20,6	30		
			17,5	20		
			15,7	9738		
			10,7	58379		
Estación Bomba N°2	Estación Bomba N°3	1066,8	30,2	3	52,99	755,56-1553,27
			20,6	136		
			17,5	3		
			15,7	23902		
			10,7	28945		
			30,2	7		
Estación Bomba N°3	Estación Bomba N°4	1066,8	22,9	3	22,23	1570,83-2455,57
			20,6	8279		
			15,7	6794		
			10,7	7142		
			30,2	5		
Estación Bomba N°4	Reservorio	1066,8	22,9	3	35,3	2477,56-3234
			20,6	2559		
			15,7	8001		
			10,7	24752		

Tabla 1 Sistema de tubería EWS, Línea A

Desde	Hasta	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Distancia [m]	Distancia Total [km]	Elevación entre Estaciones [m]
Estación Bomba N°1	Estación Bomba N°2	1066,8	30,2	3	68,08	12-753,49
			22,6	13		
			20,6	13		
			17,5	22		
			15,7	9687		
			10,7	58339		
Estación Bomba N°2	Estación Bomba N°3	1066,8	30,2	3	52,94	755,56-1553,27
			17,5	3		
			15,7	23935		
			10,7	29004		
Estación Bomba N°3	Estación Bomba N°4	1066,8	30,2	3	22,22	1570,83-2455,57
			22,9	10		
			20,6	8271		
			15,7	6789		
			10,7	7145		
Estación Bomba N°4	Reservorio	1066,8	30,2	3	35,3	2477,56-3234
			22,9	3		
			20,6	2537		
			15,7	8016		
			10,7	24743		

Tabla 2 Sistema de tubería EWS, Línea B

2.2.3. CONDICIONES ACTUALES DE BOMBEO

En cada estación de bombeo de alta presión (HPPS 1-4) existen estanques de balance de agua, bombas de alta presión, líneas de recirculación, válvulas de control y flujómetros. Cada estación tiene quince bombas principales instaladas en paralelo, las cuales se dividen en dos grupos: un grupo de ocho bombas alimentan la Línea A y otro grupo de siete bombas alimentan la Línea B. Estas están encargadas de tomar el agua del estanque de balance de la estación para luego impulsarse hasta el estanque de balance de la estación siguiente, y así sucesivamente hasta llegar al reservorio.

El sistema de bombeo utiliza el mismo modelo de bomba (carga y capacidad idénticas) en todas las estaciones, ajustándose sólo el diámetro del rodete, según los requerimientos de altura de impulsión de cada estación y optimizando el rendimiento de cada bomba, las dimensiones mínimas y máximas del rodete son: 314,8 [mm] y 393,5 [mm]. Estas son del tipo centrífuga multi-etapa (6 etapas), con carcaza partida horizontal y succión simple Las características principales de las bombas se muestran en la Tabla 3 que está a continuación [3]:

Estaciones de Bombeo	Flujo mín. m^3/s	Flujo máx. m^3/s	Altura de Descarga Máxima [m]	Eficiencia (%)
HPPS1	0,1365556	0,325	1069	85,2
HPPS2	0,1391389	0,3313889	1110	85,4
HPPS3	0,1388056	0,3305556	1149	85,8
HPPS4	0,1416111	0,3372222	1104,6	85,5

Tabla 3 Características de bombas de alta presión

2.2.4. VÁLVULAS

Las estaciones de bombeo, en especial las que operan con elevadas alturas manométricas, son instalaciones de alto riesgo debido a las grandes masas de agua que deben mover y a las altas presiones de operación que se alcanzan. Cualquier cambio repentino en las condiciones de trabajo puede provocar graves consecuencias, tales como la rotura de cañerías, falla eléctrica, sobrepresiones o sub-presiones, entre otros. Por lo anterior, existen válvulas hidráulicas instaladas a lo largo de las líneas de EWS; estos dispositivos son instrumentos de regulación de agua, con los cuales se puede iniciar, detener o regular la circulación de esta, según se requiera. Se pueden encontrar en el sector de descarga, en el de admisión, en la línea de recirculación y entre las estaciones de las líneas. Estas últimas están directamente implicadas en el sistema de transporte y deben considerarse en cualquier plan de mantenimiento a desarrollar [3].

2.2.4.1 VÁLVULA ENTRE ESTACIONES

1.- A la salida de cada Línea (A y B) desde la estación HPPS1, hay una “válvula *tee*” con válvula de corte y flange ciego, el cual permitirá la conexión de la infraestructura necesaria para la instalación futura de un sistema de lanzador de “*pig*” para limpieza.

2.- Entre la estación de bombeo 1 hasta la estación de bombeo 2 existen las siguientes válvulas:

a. Válvula de retención (1).
b. Válvulas de venteo (7).
c. Válvulas de drenaje (2).

3.- Entre la Estación de Bombeo 2 y la Estación de Bombeo 3, ambas tuberías no contemplan válvulas.

4.-Entre la Estación de Bombeo 3 y la Estación de Bombeo 4 existe la siguiente válvula:

a. Válvula de venteo (1).

En la figura 1 se puede observar las válvulas de venteo y drenaje que se encuentran instaladas entre Puerto el Coloso y MEL:

Figura 1 Plano llave & índice y Venteos & Drenajes, entre Puerto el Coloso y MEL.
Fuente: EWS, Execution Phase

En la siguiente tabla (4) se puede verificar las válvulas existentes en cada estación de bombeo para ambas Líneas de impulsión (A y B):

Elementos de cada estación de Bombeo	Tubería de Succión Línea A	Tubería de Succión Línea B	Tubería de Descarga Línea A	Tubería de Descarga Línea B	Recirculación Línea A	Recirculación Línea B
Válvula anti-retorno	–	–	5	4	5	4
Válvula Drenaje	5	4	5	4	10	8
Válvula Control	–	–	5	4	5	4
Válvula Corte	5	4	5	4	5	4
Transmisor de Presión	5	4	5	4	–	–
Flujómetro	–	–	5	4	–	–

Tabla 4 válvulas asociadas a las tuberías en las estaciones de bombeo de EWS

2.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

2.3.1 CORROSIÓN

Uno de los desafíos que enfrenta la industria de transporte de fluidos es el control de la corrosión, la cual puede generarse fácilmente al interior y exterior de la tubería debido a su entorno y características del flujo. Este fenómeno genera un desgaste en el metal, causando una debilidad en la pared que afecta directamente a las velocidades del fluido, la rugosidad y a la eficiencia del sistema, pudiendo provocar tiempos de inactividad inesperados y costosos.

La corrosión del metal desgasta y debilita la pared de la tubería, lo que obliga a disminuir la efectividad operativa del sistema de transporte y a su vez aumentan los costos asociados a la renovación de instalaciones del sistema. La tasa de corrosión determina la velocidad de desgaste en la superficie interna y además entrega una señal anticipada de los daños potenciales que ocurrirían en la estructura, de mantenerse las condiciones corrosivas existentes. Es importante determinar la naturaleza de la corrosión, identificar sus causas y los parámetros de control de esta para tomar medidas adecuadas para la mitigación de este fenómeno y así incrementar la efectividad del sistema de transporte de fluido

La corrosión es la forma natural de devolver los metales procesados a sus estados nativos como compuestos químicos o minerales, por lo que se requiere conocer sus características del agua tanto física como químicas y la cantidad de sustancias disueltas o suspendidas que

contenga, para acondicionar el agua para el uso deseado. El deterioro interno de la tubería puede ser inducido por corrosión electroquímica o contribución bacteriana, y la tendencia corrosiva de cada estación dependerá de la calidad de agua. Esta técnica realiza un estudio de la calidad de agua post-tratamiento con muestras de agua de distintos puntos del sistema impulsión, las cuales son representativas para analizar la tendencia corrosiva del agua en cada tramo de las tuberías, este ensayo es indispensable para el control de calidad, es un proceso estratégico de evaluación y de inspección, ya que suministrará la información necesaria para llevar a cabo las medidas correctivas inmediatas o a mediano plazo, para que la calidad sea mantenida o efectivamente lograda. El comportamiento corrosivo del agua está principalmente influenciado por excesos o déficit de concentración de algunos elementos, pH del agua, crecimiento microbiano, alcalinidad, temperatura, gases disueltos, entre otros.

2.3.1.1 CORROSIÓN EXTERNA

La corrosión externa en tuberías metálicas se produce a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno, causado por la generación de sitios anódicos y catódicos en la superficie; este efecto ocurre generalmente donde existen defectos de recubrimiento externo en las tuberías como poros, grietas y desprendimientos, permitiendo el contacto del acero con la humedad del suelo lo que induce a la corrosión la cual se agrava según el nivel de resistividad y pH del suelo.

Figura 2 efecto de la corrosión externa del acero, Planta Cero, Puerto ColosoMEL. fuente: ASISCORP

En MEL, para el control de la corrosión actualmente se utiliza la combinación de revestimientos dieléctricos con sistemas de protección catódica, los cuales se consideran como las medidas más efectivas para atenuar los efectos de corrosión externa en tuberías subterráneas. El sistema de protección catódica ayuda a proteger la cañería en los lugares donde el revestimiento ha fallado (existe una degradación natural con el tiempo), por lo que,

si el sistema se encuentra inactivo, la tubería será más susceptible a la corrosión por el contacto directo entre el medio corrosivo y las superficies de acero expuestas en estos defectos.

Para la verificación del estado del recubrimiento de la tubería existen distintos tipos de metodologías, las cuales usan técnicas de inspección directas e indirectas; estas nos ayudan a evidenciar la presencia de este fenómeno, localizar las fallas de revestimiento, dimensionar los daños y además permiten detectar puntos de fallas en zonas enterradas. Las metodologías más utilizadas para la inspección del revestimiento y de la efectividad de la protección catódica, es la combinación de técnicas CIPS ("Close Interval Potencial Survey") y DCVG ("Direct Current Voltage Gradient"), las cuales ayudan a determinar puntos con potencial de falla y también comprobar si el sistema está protegiendo adecuadamente al revestimiento, midiendo los potenciales a lo largo de la tubería, los cuales son recomendados por la EDCA (External Corrosion Direct Assesmente Methodology) propuestas por NACE SP 502, como inspecciones indirectas que ayudan a definir la causa raíz de la corrosión y de esta forma se puede controlar y mejorar la integridad. También existen otras técnicas para verificar el estado superficial de la pintura, como la medición del espesor por UT (ultrasonido) y la prueba de tensión "HOLIDAY", que indica el estado de adherencia del revestimiento sobre la tubería.

Las metodologías mencionadas anteriormente ayudan a evaluar la integridad física de las tuberías, como también a determinar las causas que provocaron la propagación. Algunas de estas técnicas han sido utilizadas en MEL, pero la mayoría no se encuentra dentro del plan establecido de mantenimiento. El nuevo protocolo se realizará a partir de estudios anteriores y de la experiencia laboral local. Las actividades y frecuencias de estas serán basadas en las API 1160 "Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines" y ASME B31.4 "Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries" asegurar la conservación de la tubería y mitigar la corrosión interna y externa.

2.3.1.2 CORROSIÓN INTERNA

Por su parte, la corrosión interna depende principalmente del tipo de fluido transportado. La velocidad de degradación dependerá a su vez de la naturaleza del fluido, debido a la existencia de algunos iones caracterizados por atacar elementos metálicos y generando el consumo del material, el cual se acelera antes la presencia de oxígeno [54,55].

Para las inspecciones internas de la tubería de EWS se han utilizado distintos tipos de metodologías, tales como: análisis de las precipitaciones de los filtros cónicos de bombas, robot de video-inspección, análisis químico del agua y cupones de corrosión, entre otros. No todos se encuentran dentro del plan de mantenimiento, pero se han realizado al menos una vez para el estudio de la condición interna de la tubería, al igual que lo observado en la mantención de condiciones externas.

El plan de mantenimiento actual de las condiciones internas de las tuberías está basado en una serie de normas separadas, siendo las más relevantes las normas: API 1160 y ASME B31.4, las cuales se mencionaron anteriormente

API 1160 considera las siguientes medidas: inyectar inhibidores de corrosión (control químico del fluido), mantener una velocidad de flujo estable para el arrastre agua, limpieza frecuente con cerdos ("Pigs") de limpieza, mantenimiento de las válvulas de venteo y evitar la entrada de oxígeno. Algunas de las actividades mencionadas por esta norma han sido estudiadas, pero no poseen un plan y tampoco una frecuencia determinada.

2.3.2 PÉRDIDA DE CARGA

La pérdida de carga es la suma de las variaciones de altura y presión, que son causadas por la fricción del fluido contra las paredes internas de la tubería, cambios de sección y dirección del flujo en accesorios. La pérdida aumenta a través de los años debido al incremento de rugosidad en las paredes que se produce por el desgaste de la pintura anticorrosiva y por los sedimentos adheridos a las paredes. Además de la rugosidad, las pérdidas pueden aumentar según las condiciones de operación. Si el área se mantiene constante, el principal factor que determina directamente la pérdida de altura es el aumento de la velocidad (la cual es directamente proporcional al caudal): si esta crece o decrece afecta proporcionalmente al tamaño de la pérdida. De esta manera, el aumento del caudal a partir de enero de 2020 produjo un impacto considerable en las pérdidas de altura del fluido, debido al aumento de la velocidad de transporte. La relación directa entre el caudal y la velocidad se puede observar en la ecuación de continuidad (ecuación 1):

$$Q = v * A \qquad \textit{Ecuación 1}$$

$$Q = caudal \ \frac{m^3}{s}$$

$$v = velocidad\ \frac{\mathrm{m}}{s}$$

$$A = área\ de\ la\ sección\ transversal\ de\ la\ tubería\ m^2$$

En suma, la generación y modificación de estrategias para la verificación de integridad ayudará a garantizar una mayor protección y control de la corrosión, contribuirá a la seguridad del sistema y del personal, evitará la contaminación del medio y los costos de mantenimiento y de operación se mantendrán dentro del margen, ya que habrá menor probabilidad de falla y generación de fugas o roturas en las tuberías. Para la creación de un buen plan de mantenimiento se deben identificar las amenazas potenciales que podrían afectar de alguna forma a la integridad de los ductos.

3. METODOLOGÍA

3.1 TÉCNICA DE MONITOREO DE LA TASA DE CORROSIÓN INTERNA

Para el caso de la limpieza por "Pig", se realizará un estudio del estado interno de las tuberías mediante un análisis de pérdida de carga en cada tramo entre estaciones, observando de cuánto ha sido el aumento anual en la rugosidad a lo largo de los últimos tres años. Este análisis será el que determine si es necesario lanzar una herramienta ("pigs") para su limpieza, al considerar la pérdida de carga debido a la rugosidad en las paredes. A su vez, se elaborará un estudio de factibilidad económica del costo del lanzamiento versus la pérdida económica debido al aumento de pérdidas de carga.

3.1.1. CUPONES DE CORROSIÓN

Esta técnica es uno de los métodos más simples para la aproximación de la corrosión interna en las tuberías. Para la aplicación de este método se expone un pequeño trozo de metal (el cupón) a un ambiente corrosivo durante un período de tiempo para determinar la reacción del metal al entorno. Los cupones ayudan a monitorear la efectividad de los programas de mitigación de corrosión en tiempo real, al observar la evolución de los datos obtenidos a través del tiempo.

Las pérdidas de peso resultante de cualquier cupón expuesto por un período de tiempo será el valor promedio de corrosión durante un intervalo de tiempo; normalmente esta medición se realiza con un periodo de tiempo de exposición de mínimo 30 días antes de ser removidos, limpiados y pesados nuevamente. Los cupones de prueba se cambian en una secuencia de 30 a 60 días, normalmente entre más tiempo están expuestos más cercanos estarán los valores a las condiciones del sistema.

La medición obtenida de los cupones es expresada como tasa de corrosión o velocidad de corrosión expresada en mpy (milésima de pulgada por año), se obtiene mediante la siguiente ecuación (2) [10,11]:

$$CR = \frac{2{,}227 * 10^4 * W}{A * T * D}$$ *Ecuación 2*

Dónde:

CR=Velocidad de corrosión promedio (mpy)

W=Pérdida de peso (g)

A= Área inicial de la superficie expuesta del cupón ($pulg^2$)

T=Tiempo de exposición $(días)$

D=Densidad de la aleación (g/cm^3)

3.1.2. PROBETAS DE RESISTENCIA DE POLARIZACIÓN LINEAL (LPR), SENSORES DE CORROSIÓN:

La probeta LPR (*Linear Polarization Resistance)* es un técnica cuantitativa y no destructiva, elaborada para monitorear la corrosión interna; se caracteriza por identificar rápidamente la tasa de corrosión presente, la cual es medida de forma directa y permite la estimación de la velocidad de corrosión instantánea. La técnica se basa en la aplicación de un potencial de polarización (10mV) a un electrodo metálico inmerso en una solución (agua), en la cual la

Figura 3 Sensor de Corrosión LPR, estación N°1, EWS, Fuente: Informe Roxar Corrosion Monitoring, *EMERSON*

corriente requerida para mantener ese potencial es directamente proporcional a la corrosión en la superficie del electrodo sumergido, ya que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entorno del potencial de corrosión y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión [12].

En EWS existen cuatro analizadores de corrosión (Corr-Log, ROXAR) por línea, uno en cada estación. Este se compone por un sensor (probeta LPR) y un transmisor, que son capaces de entregar una señal de salida entre 4-20 m.A. La señal es entregada a un receptor por medio a lazos de corriente(cable), el cual proporcionará información de forma continua a la

sala de control. Las señales recibidas en la sala de control se pueden visualizar en línea en la plataforma de visualización disponible (Honeywell), el cual registra datos cada 20 segundos [13].

3.1.3. ANÁLISIS QUÍMICO Y BACTERIÓLOGO DEL AGUA

El agua post-tratamiento (agua procesada antes de la impulsión) será intervenida mediante la adición de inhibidores de corrosión, con el objetivo de mantener estables los parámetros requeridos para asegurar la calidad. Este método de análisis de calidad de agua podrá definir la eficiencia de los inhibidores de corrosión, y evaluar si la cantidad dosificada en la estación N°1 es la necesaria o necesita un ajuste para alcanzar los valores ideales de calidad de l agua y mitigar la corrosión en toda la línea. La causa principal que afecta a la calidad es el pH; este se ajustará al inicio (agua de ingreso estación N°1) con la dosificación de inhibidores adecuados, por lo cual el nivel de pH, al igual que otros factores que afectan al deterioro, serán monitoreados en cada estación de bombeo para mejorar y/o mantener la calidad de agua de los acueductos.

Los inhibidores de corrosión son los productos químicos que reaccionan con una superficie metálica, dando a la superficie cierto nivel de protección, disminuyen o eliminan la acción del medio ambiente para corroerlo. Los inhibidores trabajan a menudo fijándose por absorción en la superficie metálica, formando sobre esta una película protectora que detiene la reacción corrosiva ya que actúa como barrera entre esta y el agua. Se debe mantener una dosis continuas y suficientemente altas para prevenir la redisolución de la capa protectora; y alcanzar un flujo de agua constante sobre las superficies metálicas del sistema, ayudando a prevenir picaduras y desgaste prematuro de las paredes de la tubería, por los que es muy importante evitar las interrupciones en la adición del inhibidor pueden causar pérdida de las películas protectoras por la disolución y bajar las concentraciones podría prevenir la formación de las capas protectoras en toda la superficie. La dosis va ir variando según la calidad de agua entregado por sala de control gracias a instrumentos instalados en el sistema y también según los informes de análisis químico entregados cada semana.

Los inhibidores de corrosión cumplen con las siguientes características principalmente [56]:

a. Revisten química y/o físicamente las superficies metálicas.

b. Forman una barrera que aísla la humedad y el oxígeno de la superficie metálica.

c. Pueden neutralizar la alcalinidad o acidez de la superficie.

En EWS los productos químicos de pos-tratamiento (agua desalinizada) se inyectan en la tubería y se mezclan con agitadores estáticos antes de enviar el agua a los tanques de agua del producto. El permeado tratado fluye hacia el tanque de agua del producto y una pequeña porción se envía al sistema de agua de servicio antes del tanque de agua del producto. El agua del tanque del producto (llamada agua del producto) se envía a la estación de bombeo de alta presión 1B.

Los Inhibidores utilizados para el control de corrosión de los elementos del sistema de transporte de agua, post-tratamiento incluye la adición de ortofosfato de zinc, carbonato de sodio y dióxido de carbono para alcanzar los valores ideales de calidad del agua, y para el control del crecimiento microbiano en el agua de producto y en las cañerías de transporte es controlado por dosificación de golpe con hipoclorito de sodio, los cuales se describirán a continuación:

A) Dióxido de Carbono.

Este compuesto tiene el propósito de estabilizar el pH rápidamente, baja el nivel de pH si este se encuentra fuera de rango.

B) Ceniza de Soda o Carbonato de Sodio.

Ayuda a proporcionar la alcalinidad en el agua de permeabilidad de RO para mantener un pH estable (es decir, mantener el agua bien protegida), lo que evita que el agua sea corrosiva y dañar el equipo aguas abajo.

C) Hipoclorito de Sodio.

Ayuda a reducir y controlar el crecimiento de microbiano en la tubería antes de enviar el agua al producto tanques de agua. Es un compuesto que puede usarse efectivamente para la purificación del agua. Se utiliza a gran escala para la purificación de superficies, blanqueamiento, eliminación de olores y desinfección del agua.

D) Ortofosfato de Zinc.

Su función es formar una capa protectora en la superficie de la tubería. Los niveles de ortofosfato entregado se controlan para evitar la sobrealimentación que podría provocar el desperdicio de productos químicos sin un beneficio adicional, así como la acumulación excesiva en las paredes de la tubería.

Calidad del agua a transportar

La Tabla 5 presenta los rangos según los valores de diseño de la calidad del agua producida por la planta desalinizadora de Coloso y que será transportada por las tuberías [3]:

Parámetro	mg/l como ion	
	Rango	
	Min	Max
K^+	2	18
Na^+	65	300
Mg^{2+}	1.4	8
Ca^{2+}	0.4	3
HCO_3^-	24	32
Cl^-	100	500
SO_4^{2-}	1.3	7
SiO_2	0.01	0.15
Boron	0.4	2.8
TDS	170	800
pH	7.4	7.8

Tabla 5 Calidad de agua para EWS, fuente: Manual para sistema de transporte de agua EWS, MEL.

Según los análisis químicos desarrollados agua se puede verificar la calidad de agua en según los rangos propuestos por EWS mostrados en la Tabla 5, se puede identificar con mayor facilidad el aumento o disminución de los aditivos post-tratamiento (agua almacenado en un estanque antes de ser bombeada hacia el reservorio de agua) para su estabilización, y como se mencionó anteriormente se utiliza ortofosfato de zinc, carbonato de sodio y dióxido de carbono para alcanzar los valores ideales de calidad del agua, y para controlar el crecimiento microbiano en la cañerías se utiliza hipoclorito de sodio.

Los parámetros controlados con la dosificación de inhibidores antes de salir de la impulsión son los siguientes:

A. Fosfato mg
B. Cloro libre mg
C. pH, s.u
D. Conductividad, us/cm

Actualmente se realiza un monitoreo semanal de muestras del Sistema de impulsión de agua desalada en cada estación, los cuales se pueden observar por reportes entregados por la empresa contratada para estos estudios, la información entregada es del rango en que se encuentran los siguientes parámetros: Fosfato, Zinc, pH, conductividad y hierro soluble. Con estos parámetros el personal entrega recomendación para el corte repentino de alguna de las dosis de químicos para acondicionar el agua para detener o reducir considerablemente la tendencia corrosiva del agua [3,14].

Esta inspección es importante ya que en el caso de la falla de alguno de los sensores indicador de químicos dosificados sirve como respaldo para comprobar si la cantidad entregada es la necesaria para el control de la velocidad de reacción.

3.2. TÉCNICAS DE MONITOREO DE CONDICIONES INTERNAS DE LA TUBERÍA

3.2.1. ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN DE SEDIMENTOS EN FILTROS DE BOMBAS DE IMPULSIÓN

Se realizará un análisis físico-químico de los sedimentos o sólidos encontrados en el filtro cónico de la bomba para determinar los componentes que obstruyen su rejilla. Al identificar los elementos involucrados, se puede idear el mecanismo para atenuar o disminuir esta anomalía y así evitar la obstrucción del filtro. Una obstrucción importante puede comprometer la presión de succión de la bomba, disminuyendo su eficiencia; si la presión sobrepasa el umbral máximo de operación, se deberá aplicar una detención de la bomba para realizar un mantenimiento al filtro y análisis de sedimentos.

La presión anteriormente descrita se monitorizará en pantalla en la sala de control a través de DCS (sistema de control distribuido), sistema encargado de explorar cada estación de bombeo en forma cíclica con el fin de recibir datos desde cada Panel de Control de las estaciones de bombeo y emitir órdenes de partida o detención a las bombas según las demandas operativas de agua. Si la presión sobrepasa el nivel máximo de impulsión se

activará una a Alarma de “Alto” (High) del Plan de Emergencia por falla de la bomba, la cual se observa en pantalla a través de la plataforma disponible en sala de control; luego de este aviso, los operadores detendrán la bomba de manera inmediata para aplicar las acciones correctivas que permitan corregir la condición alarmada por sala de control y luego autorizar nuevamente la partida de la bomba [15,16].

3.2.2 PLAN DE MANTENIMIENTO CON ROBOT DE VIDEO-INSPECCIÓN

Esta técnica es un estudio complementario dirigido a evaluar el comportamiento de las condiciones internas de las tuberías y de los tanques de las estaciones de bombeo, las cuales pueden monitorearse gracias a las imágenes capturadas en tiempo real a través de las cámaras instaladas en los robots de video-inspección. Se pueden visualizar las condiciones físicas en que se encuentra el interior de la tubería y reportar cualquier defecto y hallazgo que se encuentre al interior de ésta, tales como el estado de las uniones, la existencia de fallas o roturas, etc. Los robots son controlados por el operador y son capaces de inspeccionar largas extensiones de tubería y tanques de gran diámetro; debido a su alta resistencia y potencia, acceden con facilidad sin el riesgo de quedar atascados en las irregularidades de estos.

El equipo utilizado en MEL es un robot tele-operado y sumergible con una capacidad máxima de recorrido al interior de la tubería de 500 metros de inspección, equipado con una cámara robotizada con un zoom de 40x y rotación de 360° en su eje y 270° de arriba abajo. La video-inspección completa se almacena en un medio digital la cual se adjunta y forma parte del reporte entregado.

Figura 4 Robot-video inspección, Fuente: Informe Video- Inspección Estación N°2, TESRA

La inspección se realiza en el sector de descarga de las Estaciones de Bombas, para este monitoreo primero se deberá drenar parcialmente la línea por seguridad del personal y facilidad de acceso, para poder abrir el flange ciego en el cual será introducido el robot para realizar la inspección al interior de la tubería, este es sumergido en el agua y recorrerá una longitud de 400 metros aproximadamente aguas abajo [17,18].

Figura 5 Sector de descarga estación de bomba N°2, apertura flange ciego,
Fuente: Informe inspección interna de cañería Línea B, ASISCORP

3.2.3 PERFIL HIDRÁULICO, PÉRDIDAS DE CARGA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE AGUA

Para el análisis de las pérdidas de las tuberías es necesario evaluar la curva del sistema de impulsión de cada tramo, con la cual se puede determinar la energía que debe suministrar el sistema de bombeo en cada estación. La curva total del sistema incluye dos tipos de cargas (alturas): la carga estática, que corresponde a la diferencia de altura entre el punto de toma de agua y el de entrega de agua, y la carga dinámica, la cual dentro del sistema representa la energía que tiene que gastar el agua impulsada para poder llegar hasta el punto deseado. La carga dinámica está compuesta por la altura de velocidad y las pérdidas de carga, las cuales pueden ser por fricción, por singularidades o por presión de trabajo de accesorios o instrumentos pertenecientes a la red de impulsión; representa las pérdidas primarias (tubería recta) y secundarias (accesorios) de la tubería, por lo que la sumatoria de todas las pérdidas del fluido puede representarse la curva cuadrática del sistema de bombeo y a diferencia de la carga estática si depende del caudal, la cual deriva de la siguiente ecuación [19]:

$$H_{Total} = H_E + H_D$$ *Ecuación 3*

$$H_{Total} = Altura\ total\ de\ impulsión\ (m.c.a)$$

$$H_E = Carga\ o\ altura\ estática\ de\ elvación\ (m.c.a)$$

$$H_D = Carga\ o\ altura\ dinámica\ (m.c.a)$$

La carga dinámica puede representarse como una curva cuadrática en función del caudal, obtenida mediante la siguiente ecuación:

$$H_D = \sum K * \frac{v^2}{2 * g} + f * \sum L \frac{v^2}{D * 2g} \approx \overline{K} * Q^2$$ *Ecuación 4*

Por lo tanto, la curva del sistema de impulsión es igual a:

$$H_{Total} = H_E + \overline{K} * Q^2$$ *Ecuación 5*

Por medio de esta curva se puede calcular la potencia útil necesaria para transportar el fluido de un punto a otro en términos de consumo energético. Los parámetros utilizados para determinar la potencia son el caudal (Q) y la altura total de elevación (H_{Total}) Finalmente, la potencia hidráulica puede obtenerse a través de:

$$Potencia = \rho * g * H_{Total*} Q\ \ [kWh]$$ *Ecuación 6*

Para el estudio de la pérdida de carga se hará un análisis comparativo de las diferencias de potencia anual requerida para los cuatro sistemas de impulsión de cada tubería (Línea A y línea B), por lo que con esta diferencia se obtiene la variación de los costos de operación del sistema de bombeo de los últimos tres años (2018-2020). Para realizar el análisis de los costos es necesario considerar varios parámetros importantes: Caudal involucrado (m3/h), Potencia de los motores (kW), tiempo de funcionamiento y el costo de la potencia por el tiempo de funcionamiento (kWh), el cual irá variando año tras año.

El valor de los costos de potencia asociados al sistema de impulsión nos indicará si es necesario realizar una limpieza con “Pigs”, ya que si existe un aumento considerable del consumo de energía para el funcionamiento del sistema se deberá lanzar un chancho de limpieza para incrementar la eficiencia del sistema de transporte de agua desalada.

El método de análisis de pérdida de carga del sistema entre estaciones considerando ambas líneas de impulsión no está implementada como plan de inspección, el cual es importante para verificar el comportamiento interno a través del tiempo, para cuantificar la pérdida

energética que ha sufrido el sistema de impulsión debido a incrustaciones en las paredes, aumento de rugosidad y erosión. Para este estudio hidráulico se utilizará la información registrada en los manómetros de descarga de las estaciones de bombeo, la cual indica la presión y flujo de salida total de cada línea por estación, estos datos se obtienen de la plataforma de visualización disponible Uniformance.

Luego de la agrupación de datos de todos los tramos en Excel se procede a graficar la curva del sistema para el mes de marzo de los años 2018,2019 y 2020, de esta manera, se puede obtener la tendencia de la pérdida de carga asociada al sistema de impulsión. Posteriormente, estos datos serán ajustados de acuerdo a la ecuación de pérdida de carga de un sistema, la cual tiene forma y=ax^2+bx+c (y: altura de bombeo, x: Caudal y a, b y c: Constantes), con esta información se analizará también:

1. Pérdida de altura v/s caudal
2. Pérdida energética v/s caudal
3. Si se cumple la condición para el lanzamiento de limpieza con “Pigs”

Con esto últimos se verificará cuanto ha sido el aumento de impulsión de la estación de bombeo por tramos debido a suciedad o fallos del revestimiento interno de la tubería, además se obtendrán los costos asociados a este incremento de altura con los cuales se podrá determinar si la cantidad de pérdida monetaria por el aumento de energético de las bombas para compensar los cambios internos superan los costos de lanzamiento de limpieza con “Pigs”. Este tipo de limpieza no se ha intentado antes de Minera escondida , aún no existen las instalaciones para su lanzamiento y recepción entre estaciones. Esta técnica es recomendada por la Norma API 1160, “Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines”, para mantener la integridad de ductos y aumentar su eficiencia.

3.2.4 LIMPIEZA CON HERRAMIENTAS “PIGs”

Los “Pigs” (Pipeline Internal Gauge) o “Raspa Tubos” son herramientas independientes, que se mueven entre ductos y se utilizan en operaciones de limpieza y retiro de sedimentación, escombros, sólidos e incrustaciones encontrados en la superficie interna de la tubería. Esta herramienta constituye una forma simple y eficiente de optimizar el flujo en las tuberías, incrementando la capacidad de transporte, reduciendo la corrosión y minimizando la presencia de materias extrañas en el fluido, además de ayudar a generar un importante ahorro de energía al reducirse la presión de impulsión de bombas secundario a la disminución de los obstáculos que impedían el paso del fluido de forma continua. Existen varias formas de “Pigs”, tales como en copas, discos, esferas, cepillos, imanes, etc. [20,21].

Las herramientas de limpieza se clasifican en dos grupos:

I. *Pigs* de limpieza blanda: dispositivo desechable fabricado a partir de espuma de poliuretano (también se les conoce como *pigs* de espuma), son instrumentos flexibles y resistentes al desgaste, capaces de ajustarse diametralmente a reducciones y obstáculos que encuentren en su trayecto. Se utilizan principalmente para remover líquidos acumulados, arena, parafina y polvos, entre otros.

II. *Pigs* de limpieza rígida: el cuerpo de la herramienta es fabricado en acero, acero inoxidable o aluminio. Son reutilizables y se usan para remover líquidos acumulados, arena, parafina, sedimentos, etc., por lo que para superficies abrasivas incrementa la habilidad de limpieza.

Para la selección del tipo de herramienta de limpieza a utilizar es necesario considerar los siguientes factores como:

1. Condiciones de operación el ducto
2. Diseño del sistema de tuberías
3. Riesgos involucrados
4. El tipo de “Pig” a utilizar

Figura 6 Herramienta de limpieza "Pig", fabricados con espuma de poliuretano, Fuente: Escondida, BHP.

Esta técnica no se ha implementado aún, pero existe el espacio para la instalación de los receptores y lanzadores para cada estación, según el diseño del sistema de EWS. A la salida de cada Línea (A y B) en cada estación, se ha dejado prevista una “tee” con válvula de corte y flange ciego o tapa, por donde se introduce la herramienta. El sistema permitirá la conexión de la infraestructura necesaria para el sistema de lanzador de “Pig” de limpieza, y también a la llegada de las tuberías desde la estación N°2 la infraestructura incluye un sistema de recepción del “Pig” hasta llegar al reservorio, para facilitar la inserción de la herramienta en el lanzador la instalación incluye válvulas y equipos de manipulación montados en patín para ser introducido en el sistema.

Está técnica no ha sido probada, el plan de mantenimiento sugerido se realizará en base a la condición interna de los tramos de EWS por lo que se requiere un estudio detallado para su implementación y lanzamiento, como se mencionó anteriormente carece de ingeniería para su acceso y recepción. El plan de mantenimiento establecido indicará su frecuencia en base a las condiciones internas de la tubería principalmente con el método de análisis de pérdida de carga, pero se considerarán también los robot-video inspección y análisis de filtros cónicos de succión.

3.2.5 INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS VÁLVULAS DE VENTEO

Las válvulas de venteo o ventosas son dispositivos automáticos que permiten el paso del aire desde la tubería a la atmósfera o desde la atmósfera a la tubería, según que la presión en ésta sea superior o inferior a la presión atmosférica. El aire puede introducirse en la tubería cuando ocurre la puesta en marcha de la bomba y también por el proceso de succión en los vórtices formados durante la aspiración, normalmente las acumulaciones de bolsas de aire se concentran en las zonas más elevadas de la tubería donde hay cambios de pendiente más brusco, además en estos sectores se producen grandes alteraciones en la presión por lo que es necesario que el aire acumulado pueda liberarse por medio de la válvula para que no ocurran roturas o fallas y el paso del caudal no se vea obstruido, ya que las bolsas de aire reducen el caudal que circula por la tubería perdiendo eficiencia el sistema debido a las altas pérdidas de carga generadas y si no se toman medidas para su evacuación podrá ocasionar grandes daños en la instalación.

Las bolsas de aire y el aire disuelto en el agua pueden ocasionar los siguientes problemas en las conducciones:

1. Roturas de las tuberías debido a sobrepresiones o incluso a depresiones.
2. Limitación parcial o total de la circulación del agua.
3. Pérdidas de la eficiencia del sistema y aumento de costos.
4. Inexactitud en las mediciones de caudal y desgaste de partes móviles de contadores.

La válvula utilizada en EWS es de tipo aire combinada D-100, con una presión de diseño 100 bar y con un diámetro de 8”, este tipo de válvula tiene las características de una válvula de descarga de aire y una válvula de aire y vacío. Por lo que puede descargar automáticamente o admitir grandes volúmenes de aire durante el llenado o drenaje de las tuberías. La entrada de aire en respuesta a la presión negativa (cae por debajo de la presión atmosférica) protege al sistema de las condiciones de vacío destructivas, esto ocurre cuando la tubería se vacía ya sea voluntaria o accidentalmente como consecuencia de tareas de mantenimiento, reparación o roturas. Y la descarga ocurre normalmente en cambios de pendiente pronunciados, el cual ayuda a reducir los “picos de presión” (aumento repentino de la presión interna de la tubería) y otros fenómenos destructivos [22,23].

Las válvulas de venteo se encuentran entre algunos tramos de los Acueductos de 42” , cada línea tiene la misma cantidad y se encuentra instaladas en los mismos sectores entre las estaciones de bombeo. Las primeras válvulas se encuentran entre la estación de bombeo 1 y la estación de bombeo 2 (longitud aproximada de 66 km), con una cantidad de siete válvulas

de venteo, más adelante entre la estación de bombeo 3 y la estación de bombeo 4 (longitud aproximada de 22 km) hay una válvula, y entre la estación de bombeo 2 y estación de bombeo 3 ambas tuberías no contemplan válvulas de venteo.

3.3 SISTEMA DE DETECCIÓN DE FUGAS, LEAK DETECTION

El sistema de detección de fugas (LSD) es capaz de localizar filtraciones existentes a lo largo de la tubería indicando su magnitud y ubicación. Esta técnica apoya a la inspección visual ya que ayuda a detectar filtraciones que no sean visuales y aún más difícil en tuberías enterradas, en el caso de detectar alguna filtración el sistema emite avisos de advertencia de diversas intensidades recomendando el cierre de la tubería ante la confirmación de una fuga, y a si se le podrá aplicar mantenimiento, gracias a esta herramienta se puede monitorear de forma periódica la integridad de las tuberías de transporte de agua. Esta inspección se puede realizar gracias a una unidad independiente que se comunica con un servidor y proporciona una interfaz de usuario del sistema detección de fugas, llamada FloworX.

Este software proporciona la existencia de alguna filtración e indica su ubicación, en el caso de que se detecte alguna proporciona alarma para dar aviso a la falla del sistema y realiza un diagnóstico completo de la línea luego de este evento. El sistema detecta la fuga gracias a un método de balance de volumen en intervalos de tiempo, realiza un cálculo con la diferencia del volumen de entrada, volumen de salida y cambio de linepack (variaciones de parámetros como: velocidad, la presión, la temperatura, etc. a lo largo de la tubería), entre más largo sea el intervalo de tiempo implementado se puede detectar la fuga más pequeña (en términos de caudal de fuga), la fórmula del método de balance de fuga se ve a continuación:

<u>Método de balance de volumen (VBL)</u>

Ecuación para el balance global durante un período dado:

$$V_{DIF} = V_{in} - V_{OUT} - dV_{LINE}$$ *Ecuación 7*

$$V_{DIF} = Diferencial\ del\ Balance\ total$$

$$V_{in} = Volumen\ de\ Entrada$$

$$V_{OUT} = Volumen\ de\ Salida$$

$$dV_{LINE} = Variación\ en\ linepack$$

En la siguiente imagen se puede observar la ubicación de los sensores de flujo a la entrada y salida de la tubería [24]:

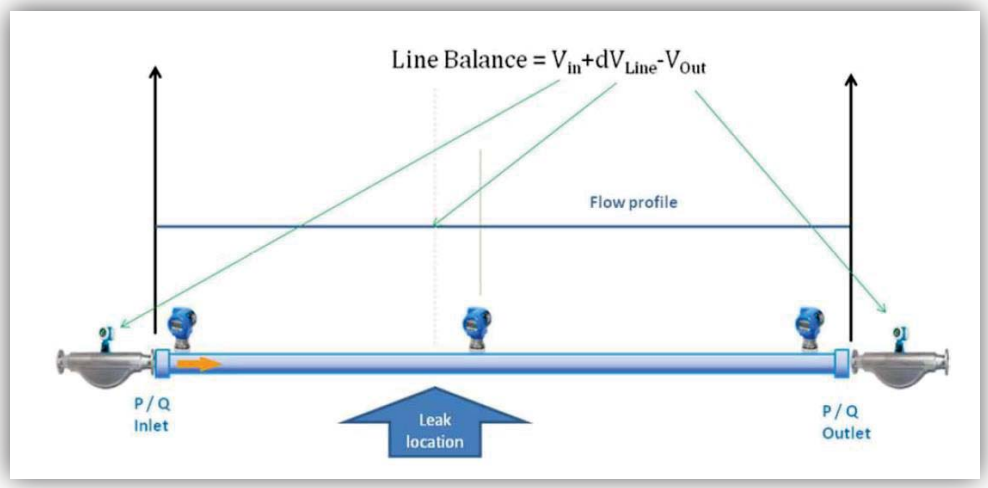

Figura 7 Método de balance de volumen(VLB), Fuente: Black & Veatch

3.4 CONTROL CORROSIÓN EXTERNA

Actualmente en la industria se utiliza la combinación de revestimiento externo dieléctrico con sistemas de protección catódica, los cuales se consideran como la medida más efectiva para controlar los efectos de corrosión externa en tuberías subterráneas.

Los revestimientos externos entregan una excelente protección, pero es muy usual que a medida que pasa el tiempo este se vaya deteriorando debido a distintos factores como: absorción de agua, presiones de la tierra, abrasión del suelo, daño de raíces, ataque bacteriológico, entre otros. Estos daños favorecen el desarrollo de corrosión en los lugares donde se producen contactos entre el medio corrosivo (la tierra) y las superficies de acero expuestas por los daños del revestimiento. El sistema de protección catódica actúa como medida complementaria y tiene la función de proteger la cañería en los lugares donde el revestimiento ha fallado. Actúa mediante el suministro de electrones a la superficie de la estructura metálica, transformando su potencial a valores más negativos con respecto al medio en que se encuentra y así inhibiendo la formación de corrosión [31].

3.4.1 SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

El sistema de protección catódica (PC) tiene la función de proteger las tuberías en los lugares donde el revestimiento ha fallado, actuando como la segunda línea de defensa contra la corrosión externa tras el revestimiento externo. Esta técnica está encargada de reducir la velocidad de corrosión polarizando la superficie metálica a valores más negativos que el potencial de corrosión, haciendo que la superficie del metal se comporte como un cátodo de una celda electroquímica, obteniéndose así la protección o inmunidad deseada

Existe dos sistemas de protección, una es mediante ánodos de sacrificio y la otra mediante corriente impresa, la cuales se describen a continuación:

Corriente impresa: La corriente de protección proviene de una fuente externa de corriente continua, en la que el polo negativo se conecta a la estructura y el polo positivo a un ánodo auxiliar inerte (electrodo dispersor de la corriente), cerrándose el circuito a través del electrólito (suelo).

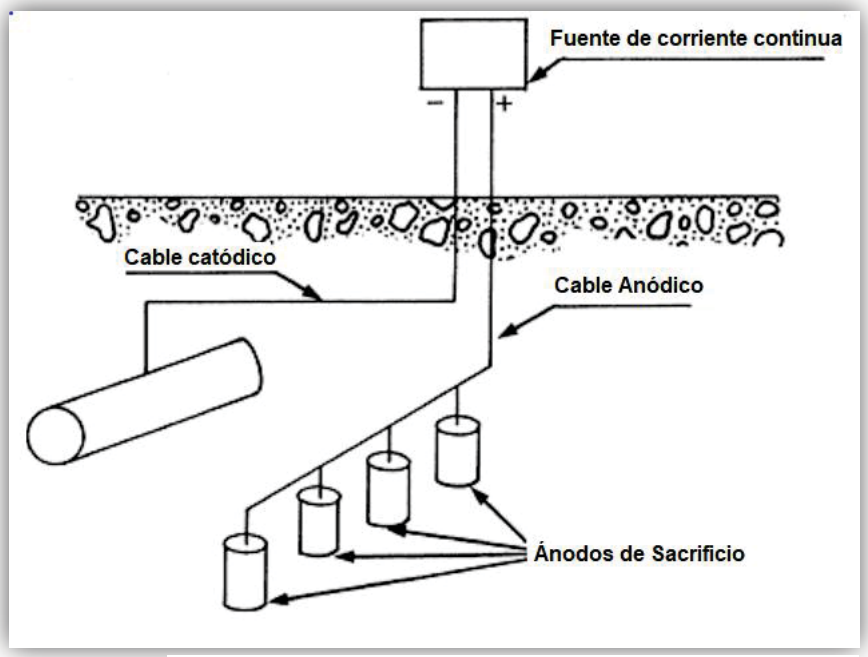

Figura 8 Sistema de protección corriente impresa, Fuente: Biblioteca digital ILCE.

Ánodos de sacrificio: El ánodo está compuesto de una aleación metálica con tendencia a la oxidación mayor que el de la estructura que se debe proteger. El efecto de esta diferencia, entre los dos metales, hace que el ánodo sea elemento que se corroe, actuando como inhibidor natural y manteniendo la estructura principal intacta. Normalmente, los materiales metálicos empleados como ánodos son aleaciones de Zn, Mg, y Al, los cuales representan una gran diferencia de potencial en relación al acero [25,26].

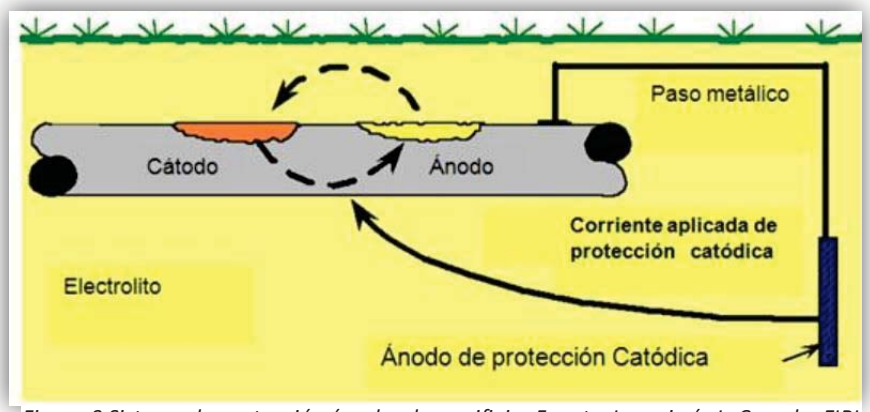

Figura 9 Sistema de protección ánodos de sacrificio, Fuente: Ingeniería L. Corrales EIRL

El sistema de protección catódica deberá contar con capacidad adecuada para lograr un potencial "polarizado" mínimo en la tubería de acero enterrada. Los criterios de "potencial polarizado" se describen en la norma NACE International Standard Practice, SP0169. Para determinar que la estructura se encuentra protegida catódicamente, se consideran los siguientes criterios [27]:

<u>CRITERIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA</u>

I. Valor mínimo del potencial de -0,850 V, medido entre la superficie de la estructura con respecto al electrodo de referencia cobre-sulfato de cobre, Cu-CuSO4. Este potencial puede ser bien una medida directa del potencial polarizado o bien un potencial debido a una corriente aplicada.
II. Criterio de polarización: hace referencia a un cambio en la polarización catódica que establece un mínimo de polarización de 100mV entre la superficie de la estructura y el electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito, debido a la aplicación de una corriente de protección.
III. El potencial instantáneo máximo de desconexión ("OFF") deberá ser un positivo mayor a –1,20 voltios con respecto al electrodo de referencia.

Un sistema de protección catódica debe considerar los siguientes elementos: [25]

a. Estructura a proteger: la tubería alojada en el seno del electrolito (suelo) en la que se instala el lecho anódico y así es conectada al polo negativo de la fuente de corriente directa
b. Fuente de corriente directa: suministra la potencia necesaria para hacer circular la corriente de protección requerida por las estructuras.
c. Lecho anódico: agrupamiento de ánodos cuya función es drenar corriente al electrolito por medio de este se cierre el circuito. Este agrupamiento se conecta al polo positivo de la fuente de corriente directa, con lo que actúa como ánodo del sistema.
d. Cableado: la estructura, la fuente de corriente directa y el lecho anódico requieren interpretarse eléctricamente. Esto se consigue con un cable de cobre, cuyo calibre dependerá de la cantidad de corriente a manejar.

La diferencia con el sistema de protección catódica es que no posee una fuente de corriente directa como el sistema mencionado anteriormente, el cual es alimentado a través de un rectificador (dispositivo que permite convertir la corriente alterna en corriente continua). Los ánodos de sacrificio son capaces de polarizar la estructura gracias a la gran diferencia de potencial entre el electrodo/suelo; la ventaja de este sistema es que no requiere mantenimiento ni ajuste de operación, además de no necesitar instalaciones especiales para el suministro de energía; solo va a requerir un recambio cuando y el electrodo se encuentre consumido.

3.4.2 MEDICIÓN DE ESPESOR DE LA PARED

La inspección por ultrasonido (UT), es un método no destructivo en el cual una sonda envía un conjunto de ondas de alta frecuencia que se introducen en el material con el propósito de determinar con precisión el espesor de las paredes de la tubería y de esta manera diagnosticar si es que se puede operar bajo las condiciones actuales. Se debe efectuar la medición en instalaciones superficiales y enterradas, tanto en puntos de la línea regular como en sitios donde el desgaste de pared puede ser crítico: válvulas, accesorios y conexiones [28].

Para realizar esta prueba con el equipo medidor de espesor, se aplica la técnica de pulso/eco para la medición de espesor puntual y la calibración del equipo. Esta medición se realiza en 4 puntos del perímetro de la tubería o accesorios; el método se describe a continuación:

3.4.2.1 MÉTODO PULSO-ECO

Este método de ultrasonido pulso/eco utiliza ondas acústicas longitudinales para la medición de espesores según la zona a evaluar. Se miden los tiempos de envío y recepción de una señal sonora ultrasónica que viaja a través del medio que se va a medir y que se refleja en la frontera de esta. La profundidad de la falla está determinada por el intervalo de tiempo entre el pulso inicial y el eco producido por la falla. La magnitud de la falla se estima comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado por una interface, con la amplitud del sonido reflejado desde un reflector de referencia de tamaño conocido o por una pieza de respaldo que no contenga fallas [29].

El personal que desarrolla la técnica para EWS cuenta con calificación de acuerdo con las recomendaciones de la American Society Nondestructive Testing "ASNT", y el UT utilizado para la medición de espesor se indica a continuación:

Equipo: Medidor de Espesor 38 DLPLUS, Marca Olympus

Transductor: Dual D790, 5 MHz, 12mm.

Patrón: Bloque calibración de 2P Modelo 2218M S/N T003172.

Cable: Cable Lemo 00

Acoplante: Ultragel II – B

La medición UT se realiza en 4 puntos del perímetro de la tubería al igual que en los accesorios (codos, expansiones y/o reducciones), pero en este caso se utiliza más de un diámetro para su medición a lo largo de este (generalmente se realiza en tres puntos, en los extremos y a la mitad de este). Los puntos de inspección se describen a continuación:

Inspección de línea

Para las inspecciones de línea, es importante determinar la dirección del fluido, ya que esto permite determinar el sentido de la nomenclatura utilizada para la localización de las mediciones, el primer punto de medición es el 12, su posición se puede visualizar en la Figura 10, este se localiza en el tope de la tubería y es tomando como referencia según la dirección del fluido, la toma de información se realizará de manera siguiendo el horario técnico de las agujas del reloj [30].

Ubicación de las mediciones de espesores con Ultrasonido.

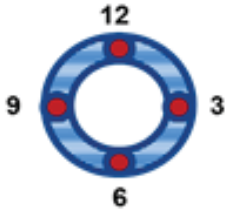

Figura 10, cuatro puntos de la medición, Fuente: Emerald Energy PCL

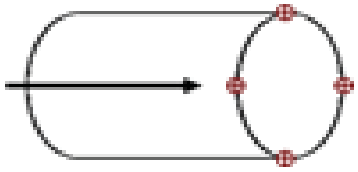

Figura 11 dirección del flujo de la tubería, Fuente: Emerald Energy PCL

NOTA: Es muy importante tomar en consideración como criterio principal los sitios bajos o de posible acumulación de fluidos, zonas de alta turbulencia, independientemente de la distancia indicada [30].

3.4.3 TÉCNICA CIPS ("CLOSE INTERVAL POTENTIAL SURVEY")

La técnica CIPS (*Close Interval Potencial Survey*) consiste en la medición continua de los potenciales de la tubería-suelo con respecto al electrodo de referencia (de cobre-sulfato de cobre), se realiza a intervalos cortos a lo largo de la tubería protegida catódicamente. Este sistema está equipado con Cajas de Medición de Potenciales (CMP) y el suelo con celdas de referencia (electrodo); ambos son conectadas a un voltímetro con sistema de colector de datos, el cual registra los potenciales tubería-suelo en todo el trayecto recorrido por el operador a través de una computadora. Los datos registrados ayudan a realizar un análisis detallado de los niveles de protección catódica en tuberías subterráneas.

Los potenciales de la cañería son registrados con corriente encendida ("ON") y con corriente apagada ("OFF"). Los potenciales ON permiten evaluar el estado del revestimiento de la tubería . Un potencial estable quiere decir que existe una diferencia constante entre los potenciales "ON-OFF". Una reducción en la diferencia entre los perfiles de potenciales (por interferencias eléctricas) y en el perfil de potencial en las zonas donde existen defectos se grafican como valles, donde el tamaño de estos será proporcional a la severidad de los defectos. Por su parte, el re-levantamiento de potenciales "OFF" permite identificar el nivel de protección catódica; para su evaluación se debe desconectar en forma coordinada los equipos. El rango de potencial debe mantenerse entre la frontera (-850 mV y -1140 mV). Si el potencial está por sobre -850 mV indica una insuficiente polarización del acero de la tubería, siendo más vulnerable al efecto de corrosión del acero; si está bajo -1140 mV implica una

excesiva polarización, situación que puede resultar perjudicial para el revestimiento de la cañería por efectos de despegue catódico [31].

La técnica de CIPS cumple las siguientes funciones:

1. Identificación de zonas con inadecuados niveles de protección catódica.
2. Identificación de zonas con excesivos niveles de protección catódica.
3. Identificación de zonas con posibles deficiencias en la calidad del revestimiento.
4. Identificación de zonas afectadas por posibles interferencias eléctricas.

3.4.4 TÉCNICA DCVG ("DIRECT CURRENT VOLTAGE GRADIENT")

La técnica de "*Direct Current Voltage Gradient*" (DCVG) es un sistema utilizado para la detección y análisis de defectos del revestimiento de tuberías subterráneas. Los defectos se localizan examinando los gradientes de potencial en la tierra sobre la tubería para determinar la dirección del flujo de las corrientes de protección catódica, lo que está directamente relacionado con la sensibilidad del voltímetro. Dado que la protección catódica actúa en un flujo de corriente hacia los puntos de acero expuestos en la cañería, los defectos en el revestimiento pueden ser localizados individualmente. La sensibilidad de los instrumentos permite localizar los defectos más pequeños aproximadamente de 10 cm y la gravedad del defecto hace relación a la amplitud de gradiente de voltaje, entre el epicentro del defecto y la tierra [31].

Existe cuatro categorías para clasificar la magnitud del defecto [31]:

I. **Categoría 1 (51-100 % IR):** Se considera por tener una altísima superficie de acero expuesta a la tierra impide el funcionamiento adecuado de los sistemas de protección catódica, aumentando los riesgos de corrosión. Requiere de una reparación inmediata.

II. **Categoría 2 (36-50 % IR):** Representa amplias áreas de acero en contacto con la tierra. Estos defectos generan altos consumos de corrientes de protección catódica e impiden una buena distribución de corriente desde los puntos de suministro de protección catódica. Requiere de una reparación a corto plazo

III. **Categoría 3 (16-35 %IR):** Representa medianas áreas de acero en contacto con la tierra, causando moderados consumos de corrientes de protección catódica. Requiere de una reparación a largo plazo.

IV. **Categoría 4 (0-15 %IR):** Representa pequeñas áreas de acero en contacto con la tierra. Los defectos se consideran de menor importancia dado que los sistemas de protección catódica pueden proteger estos puntos a largo plazo. No requiere reparación de revestimiento.

3.4.5 PRUEBA DE TENSIÓN "HOLIDAY"

Esta técnica para inspeccionar la condición el revestimiento externo de la tubería, se utiliza como detector de fallas, este se encarga de medir el nivel de adherencia entre la pintura anticorrosiva y la tubería.

Para realizar esta monitoreo primero se debe hacer una inspección visual de los tramos de tuberías descubiertos luego de realizar la técnica DCVG explicada el ítem 3.6.3, los cuales corresponden a puntos críticos de la tubería que ya poseen una falla o tienen una alta probabilidad, luego de la observación se escogerá inspeccionar los puntos que posean mayores daños en la tubería para detectar el grado de la falla y verificar si es que el recubrimiento externo requiere reparación.

Actualmente en EWS no se ha aplicado esta técnica aún, pero el detector de fallas "Holiday detector", ya se encuentra disponible para el siguiente mantenimiento de la tubería, el detector adquirido es Holiday de CC pulsante Elcometer 280 Kit Top, detecta defectos de alta tensión

Figura 12 Herramienta prueba de adherencia revestimiento externo Holiday detector, Fuente: Elcometer.

con CC pulsante, es capaz de inspeccionar el revestimiento sin la necesidad de conectar un cable de retorno a tierra en el sustrato, además de soportar inspección en superficies sucias,

húmedas y conductivas funciona con un rango entre 0,5 kV – 35 kV para espesores de pintura hasta 8,75 mm [32,33].

Esta herramienta utiliza un resorte (Figura 12) de acuerdo al diámetro de la tubería que se va a realizar, el cual luego de ser ajustado en la tubería junto al operador recorre los tramos de tubería a inspeccionar y cuando suena una alarma indica que el recubrimiento posee fallas o fisuras en esa zona, ayuda a ubicar sectores con fallas de pintura que no fueron identificadas visiblemente.

3.5 ANÁLISIS DE CONDICIONES AMBIENTALES

Todos los sistemas de abastecimiento de agua potable están expuestos en mayor o menor grado a las emergencias y desastres, ya que los ductos atraviesan diferentes regiones geográficas. Aún aquellos sistemas que operan en áreas geográficas con escaso riesgo de fenómenos naturales como huracanes, sismos, inundaciones, etc. necesitan igualmente estar preparados para emergencias en prevención de accidentes, roturas, que pueden contaminar el agua y afectar seriamente el servicio, además es uno de los mayores gastos de mantenimiento en sistema de tuberías, por lo que las empresas deben incluir planes de mitigación y de emergencia dirigidos a disminuir la vulnerabilidad, y a dar la mejor respuesta posible una vez se produce el impacto [34].

En efecto, existen diversos fenómenos que contribuyen a esto, a saber:

1. Desastres naturales

2. Pérdidas de apoyo del terreno.

Estos pueden producir ovalizaciones y/o tensiones de diferente naturaleza y, en el peor de los casos, roturas de los ductos con los consiguientes, los desastres naturales incluyen ocasionan daños y destrucción de diversa magnitud sumado fundamentalmente a la acción indirecta del ser humano, los cuales se mencionarán a continuación [35]:

1. Desastres generados por fenómenos meteorológicos

   I. Deslizamiento
   II. Derrumbe
   III. Alud
   IV. Aluvión
   V. Corrimiento de tierra

2. Desastres generados por procesos dinámicos de la superficie de la Tierra

I. Inundación
II. Sequías
III. Heladas
IV. Tormentas
V. Granizada
VI. Tornados
VII. Huracanes

3. Desastres generados en el interior de la Tierra

I. Terremoto
II. Tsunami
III. Erupción volcánica

Los daños por personas o grupos al margen de la ley. La destrucción de ductos proveniente de actividades de sabotaje o maliciosas es poco común en la mayoría de las áreas del mundo, en especial cuando la tubería es subterránea, el sabotaje es relativamente difícil ya que es de difícil acceso. Las instalaciones superficiales estarán cercadas y protegidas. El sistema regulador de presión será controlado a distancia reduciendo de esa manera pérdidas del sistema, los desastres inducidos por la actividad del hombre más comunes son los siguientes [36]:

I. Incendio (Urbano, Industrial y Forestal)
II. Explosión
III. Derrame de sustancias peligrosas
IV. Contaminación ambiental
V. Fuga de Gases

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 INSPECCIÓN Y PLAN DE MANTENIMIENTO REVESTIMIENTO INTERNO

4.1.1 PROBETA ELÉCTRICA (LPR), *sensor de corrosión*

En la actualidad no hay un plan de mantenimiento e inspección para las probetas LPR. Estos sensores de corrosión son muy importantes para verificar el comportamiento corrosivo del agua de forma periódica en todas las estaciones de bombeo en EWS, es el único indicador que da la información instantánea de cada estación ya que en el caso de los cupones la información es semanal y por otra parte solo se encuentran instalados en la Estación N°1 por lo que no se puede acceder a la información global de las líneas.

Para comprobar el correcto funcionamiento de las probetas eléctricas se contrató gente especializada para hacer un chequeo preventivo, verificar las si las señales que se envían a la sala de control a través de este sistema es el correcto y si es que alguno de los sensores requiera mantenimiento en el caso de tener alguna falla. Este chequeo solo se ha realizado una vez luego de la puesta en marcha de estos sensores, los cuales son prácticamente nuevos ya que tienen solo un año de funcionamiento, por lo que era necesario realizar este estudio para verificar si la instalación del sistema fue el correcto [13].

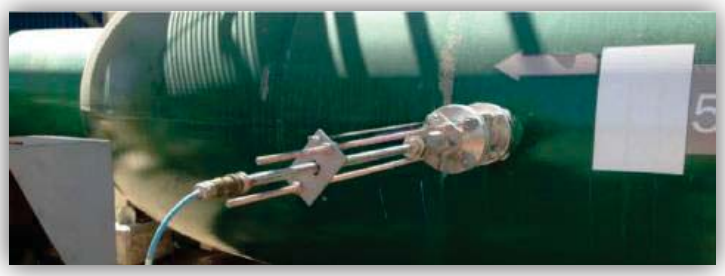

Figura 13 Probeta LPR, Estación N°2, Fuente: Emerson

Figura 14 Cableado de la probeta LPR, Estación N°2, Fuente: Emerson

Trabajo realizado

El personal primero realizo una inspección visual del sistema en terreno, donde se extrae la probeta para hacer un chequeo preventivo y verificar si se encuentra en correctas condiciones, luego de este chequeo se instaló nuevamente el sensor y se revisó si el sistema de montaje al igual si es que existía algún desperfecto en el cableado, y finalmente para comprobar si las señales entregadas por estos elementos son los correctos se simuló la transmisión de señal de salida en terreno (prueba de lazo) para los cuatro sensores de corrosión de cada línea. La corriente simulada entrega una señal de 4,12 y 20 mA; la información registrada de esta variación fue evaluada a través de los gráficos de las cuatro señales en la sala de control, en la cual se puede visualizar el comportamiento de la tasa de corrosión para cada señal de salida.

En la inspección visual en terreno se encontró todo correcto para cada estación, las probetas no requerían cambio y no se les notaba algún desperfecto, al igual que en el cableado, no se observaron fallas ni tampoco desconexiones en la caja.

En la prueba de lazo la información obtenida de la simulación de 4-20mA en terreno v/s información en sala de control si se encontraron inconvenientes en uno de los sensores de corrosión, de las cuatro señales recibidas en la sala de control, la estación N°4 presento problemas esto se pudo observar en pantalla que la señal transmitida por esta probeta no correspondía a la señal entregada por el transmisor simulado, esta señal se puede observar en las siguientes imágenes [13]:

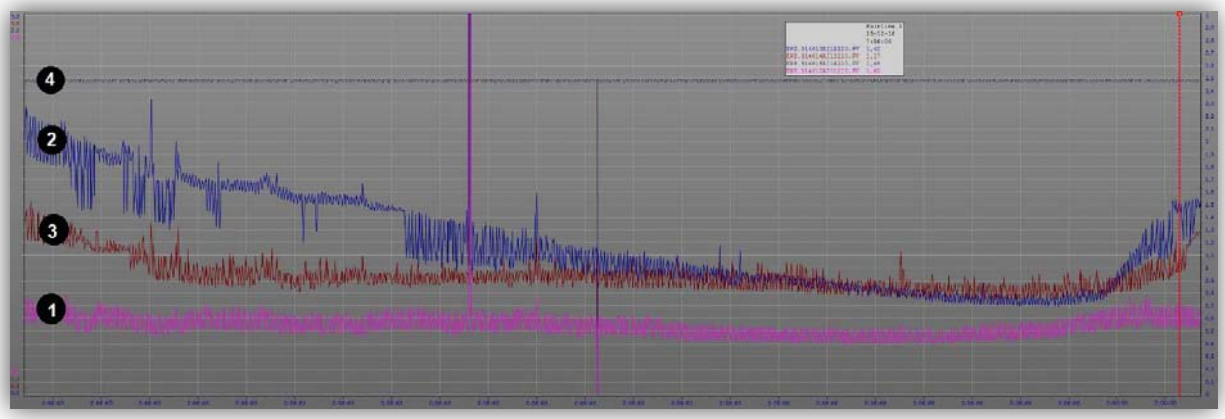

Figura 15 señales de las cuatro estaciones, capturas del software Honeywell, Fuente: Informe Roxar Corrosion Monitoring EWS, Emerson.

Cada estación de bombeo corresponde a la siguente numeración:

a. Estación N°1 corresponde al numero 1, rosado
b. Estación N°2 corresponde al numero 2, rojo
c. Estación N°3 corresponde al numero 3, azul
d. Estación N°4 corresponde al numero 4, negro

Y luego en un intervalo de tiempo de 4 horas el resultado es el siguiente:

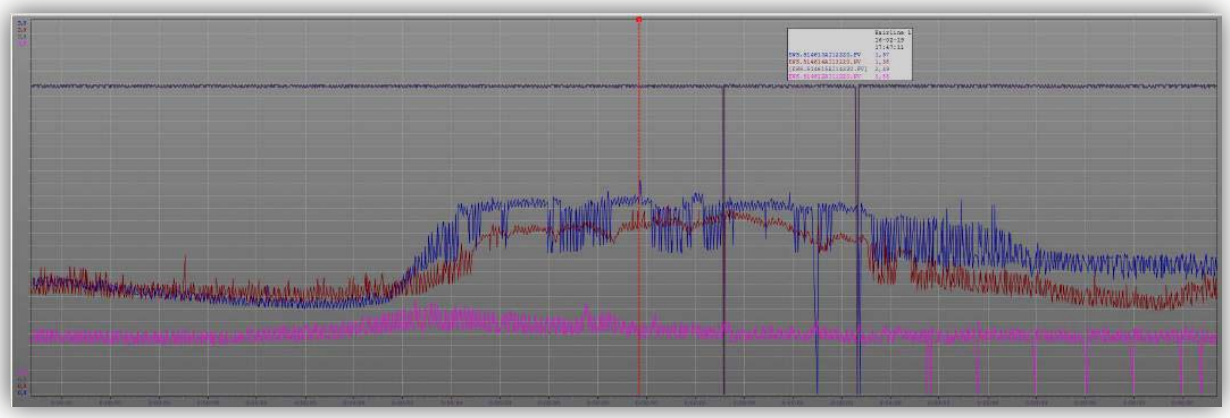

Figura 16 señales de las cuatro estaciones, capturas del software Honeywell, Fuente: Informe Roxar Corrosion Monitoring EWS, Emerson.

Se puede apreciar en la gráfica que las estaciones 1, 2 y 3, no se encuentra inconveniente en la medición. La estación 4 está en su rango máximo lo que implica que podría haber problemas de comunicación o falla del sensor, por lo que se deberá será necesario realizar un chequeo nuevamente del sensor de esta estación, verificar si es necesario adquirir repuesto para la solución. Con este análisis podemos comprobar lo necesario que es la implementación de planes de mantenimiento y monitoreo ya que se pueden identificar con rapidez las fallas y dar una pronta solución.

Para la creación de los planes con sus actividades asociadas y determinación de la frecuencia necesaria para la inspección de la tasa de corrosión y mantenimiento de los elementos del sistema, se generan a partir del análisis de los registros de revisión del sistema descrito anteriormente y recomendaciones del personal especializado, los cuales serán descritos a continuación [13]:

1) **Inspección de la Tasa de Corrosión**

Descripción Tarea

- Inspección visual tasa de la corrosión presente en la plataforma de visualización disponible (Honeywell).
- Registrar de la medición de la tasa de corrosión de las cuatro estaciones (HPPS1, HPPS2, HPPS3 y HPPS4) obtenidas de la plataforma (Honeywell).
- Obtención de un reporte de los registros de la tasa de corrosión de las estaciones y luego incorporación de este a la plataforma de Análisis de Calidad de agua y corrosividad.

  Frecuencia: Semanal

2) **Inspección de los Sensores de Corrosión**

Descripción Tarea

- Inspección visual externa del estado de los sensores de corrosión en cada estación:
  - ✓ Verificación si hay desperfecto de cableado
  - ✓ Evaluación del Sistema de Montaje
- Verificación de que los parámetros necesarios para simular una señal de salida de 4-20 mA estén correctos.
- Simulación de la señal de salida a 4-20 mA en terreno para los cuatro sensores de corrosión del sistema.
- Inspección visual de la señal de salida de 4-20 mA de las cuatro estaciones en la sala de control, tasa de corrosión.

  Frecuencia: Semestral

3) **Mantenimiento de los sensores de corrosión**

Descripción Tarea

- Extracción de los sensores de corrosión de cada estación para verificar el estado de todos sus componentes.
- Verificación del estado del instrumento y reinstalación o reemplazo, según corresponda.

  Frecuencia: Anual

4.1.2 FILTRO DE SUCCIÓN DE BOMBAS

Actualmente no hay una frecuencia definida para de análisis de sólidos encontrados en los filtros de bombas, se requiere para lograr entender la causa de formación de sedimentos, precipitados e incrustaciones en líneas de agua, y de esta forma poder determinar la manera de atenuar este fenómeno para evitar que ocurra la obstrucción en el filtro. La obstrucción ocurre generalmente por restos de revestimiento por fallo de adherencia con la tubería, también por sólidos formados por la adición de productos químicos durante el proceso de desalinización y antes de ser impulsado. Para acceder a estos sólidos, reunir y enviar a laboratorio se debe realizar una limpieza de filtros de alguna de las bombas de las estaciones. La limpieza ocurre solo cuando se activa la alarma “high”, la cual fue descrita en el apartado 3.2.1 y también cuando alguna bomba requiere mantención.

Este análisis se ha realizó en julio de 2019 por primera vez, en una de las bombas de impulsión de la línea A en la estación N°1, con la que se pudo determinar la causa y solución del problema. El estudio de la muestra de sólido incluyó [15]:

1. Análisis de ICP (Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo, o ICP) : Técnica usada para identificar y determinar las cantidades de concentraciones de casi todos los elementos relacionados con muestras metálicas [51].

2. Análisis del sólido por difracción de rayos X y fluorescencia: Estas técnicas son utilizadas para análisis cualitativo, cuantitativo y semi-cuantitativo de la muestra sólida gracias a longitudes de onda dispersivas por rayos X, puede revelar la naturaleza mineralógica presentes en el sólido [52,53].

La frecuencia del plan de inspección al igual que las tareas necesarias para su aplicación se generarán a partir de la información obtenida de todas las limpiezas que han ocurrida en este último tiempo, se considerarán las recomendaciones del personal que trabaja en terreno y el personal de operaciones de minera escondida, las cuales se describirán a continuación:

1) Inspección visual del diferencial de presión de los filtros de succión de las bombas de impulsión de cada estación (HPPS1, HPPS2, HPPS3 y HPPS4).

Descripción Tarea

Este parámetro se debe visualizar en la sala de operaciones de EWS, información entregada en pantalla del DCS (Sistema de Control Distribuido).

- La información obtenida se debe comparar con el valor objetivo, además se determinará el nivel de desviación y condición, para desarrollar los análisis de la información del turno.

- Si él $Diferencial\ de\ presión\ filtro\ de\ succión\ bomba \geq 76\ kpa$, se activara la alarma, por lo que se deberá generar planes de emergencia por falla de impulsión de la bomba, se deben tomar las siguientes medidas:

  I. Personal de Sala de control deberá generar un aviso a operaciones del incidente
  II. Personal de operaciones deberá poner fuera de servicio de la bomba con falla.
  III. Luego de la salida de servicio de la bomba, se enviará personal a terreno revisar el equipo para luego realizar la limpieza del filtro cónico de impulsión de la bomba, se deben tomar los siguientes pasos:

  ✓ Realizar una "limpieza" en el filtro cónico de la bomba afectada

  ✓ Luego se debe realizar un análisis de precipitación de sedimentos del filtro cónico de la bomba, cada vez que se genere alguna limpieza.

  IV. Luego de la restauración, DCS deberá verificar si el operador toma las acciones correctivas que permitan corregir la condición alarmada por sala de control, para autorizar nuevamente la partida de la bomba.

NOTA: Se debe asegurar el monitoreo de las variables antes, durante y después que las acciones respuestas sean implementadas.

Frecuencia: semanal.

4.1.3 ROBOT DE VIDEO INSPECCIÓN

Esta técnica no posee frecuencia y tramos inspección definidos para el estudio en EWS, la cual es necesaria para observar las condiciones internas de los ductos en cada estación, ayuda a verificar la existencia de fallas en el revestimiento como: desprendimiento de pintura, falta de adherencia entre capas, agrietamiento, corrosión y también si existen acumulación de impurezas en las paredes de la tubería ya que estas pueden obstruir el paso del fluido. Además, debido al aumento de flujo y de presión en ambas líneas desde enero 2020 se debe monitorear con mayor precisión ya que esta condición puede acelerar el deterioro del revestimiento producto a la erosión.

En agosto de 2017 se lanzó por primera vez un robot video-inspección en la línea B en la Estación de bombas N°2, la cual fue solicitada debido a que se encontró una cantidad considerable de restos de pintura en uno de los filtros de succión de las bombas. Se recorrió una longitud de 421,7 metros agua abajo con la que se pudo revisar las paredes internas y las uniones soldadas, se encontró evidencia de corrosión y revestimiento desprendido concentrado principalmente en los cordones de soldadura. Varios hallazgos en uniones soldadas se ubican principalmente en la zona contraria al sentido del flujo. En esta zona se generan micro turbulencias y debiera estar más propensa a una falla del revestimiento.

Figura 17 captura de imagen de la tubería interna línea B, estación N°2, Fuente: Tesra.

Para la creación del plan de robot video-inspección se considerarán las observaciones encontradas en el estudio de la estación de bombas N°2 y recomendaciones del personal que realizó la primera inspección, además se realizará un taller junto al personal de operaciones y mantenimiento de minera escondida para verificar los tiempos necesario para el bloqueo y drenaje de la tubería, y también cuando se podrá realizar la inspección sin interferir el normal funcionamiento de Minera Escondida [17,18].

Se examinó distintas situaciones para realizar esta inspección según los planes de mantenimiento de las plantas concentradoras, ya que son las mayores consumidoras de agua, necesaria para una serie de actividades del proceso de una tonelada de mineral.
El equipo de mayor consumo es el molino SAG, el cual es usado en plantas mineras para moler rocas de mineral para reducir su tamaño y hacerlo apto para las etapas siguientes de procesamiento de dicho mineral.

Minera Escondida posee cinco molinos SAG en las concentradoras; en El Colorado hay tres molinos, dos de estos requieren 80 l/s para su funcionamiento y el restante 100 l/s para que la planta pueda rendir 4988 ton/hr, Laguna Seca 1 requiere 200 l/s para el funcionamiento del SAG y rendir una cantidad 5606 ton/hr y por último Laguna Seca 2 al igual que la mencionada anteriormente necesita una cantidad de 200 l/s para rendir una cantidad de 6624 ton/hr [2].

El mantenimiento para un molino SAG se realiza normalmente cada seis meses, los planes de mantenimiento de MEL indican que requieren aproximadamente una cantidad de 100 horas para realizar el trabajo por lo que esto indican que hay una cantidad de cuatro días hábiles para poder realizar la inspección con robots en una de las líneas del Acueductos de 42” ya que se requiere una por lo menos en funcionamiento continuo para el abastecimiento de la mina.
Según lo indicado anteriormente se concluyó que la inspección se realizará cuando se aplique los mantenimientos a los molinos, solo se podrá utilizar la técnica para una de las líneas y la otra deberá estar en funcionamiento y viceversa, cada tramo será inspeccionada cada 4 años según lo acordado con personal de mantenimiento.
Se podrá aplicar esta técnica solo para dos tramos de la línea en cada inspección ya que se tiene un tiempo límite de cuadro días, y según lo conversado con personal de operaciones que participaron en la primera inspección con robot en la Estación N°2 se demoraron un total de dos días para: bloqueos de las válvulas, drenaje en la tubería (pequeña cantidad) y abrir el flange ciego para introducir el robot sumergible.

A continuación, se indicarán los pasos a seguir para realizar esta inspección:

1) **Inspección de tuberías con Robot de video inspección**

Descripción de tarea:

- Inspección condiciones internas con robot inteligente a lo largo de ambas tuberías (líneas A y B) entre las estaciones y reservorio (HPPS1 a HPPS2, HPPS2 a HPPS3, HPPS3 a HPPS4 y HPPS4 a Reservorio).
  Nota: se debe escoger dos tramos de una de las líneas a inspecciona

Para realizar la inspección se deben realizar los siguientes pasos:

- ✓ Bloqueo válvula de interconexión, y así limitar el paso del agua a solo una de las Líneas de impulsión (la válvula tiene una entrada y dos salidas).

- ✓ Bloqueo de válvulas a la entrada del Estanque, el cual pertenece al sector de descarga a ser inspeccionado.

- ✓ Drenaje de agua con el Manifold de descarga a la llegada de cada estación, este se encuentra entre la entrada del estanque y el flange ciego, esto se requiera para evitar accidentes con los operadores y también para una mayor facilidad de acceso del robot, el drenaje será mínimo

- ✓ Luego el personal debe retirar el flange ciego de la línea para introducir el robot y realizar la inspección, 400 metros agua abajo.

- ✓ Luego retirar el robot y se debe realizar el mismo procedimiento para el segundo tramo a inspeccionar.

Frecuencia: cada cuatro años.

Nota: Se debe realizar para una de las líneas la inspección de dos tramos, luego el siguiente año dos tramos de la otra línea y así sucesivamente los tramos irán cambiando por lo que la inspección de cada uno de ellos se realizará cada 4 años.

4.1.4 ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE CARGA

Las faenas mineras son uno de los principales consumidores de energía eléctrica a nivel país, esta es necesaria para el proceso y muy importante para las actividades del sistema de impulsión de agua para el traslado del fluido de un punto al otro. La desalinización de agua de mar es considerada como la mejor opción para solventar el suministro de agua en la minería, ya que la demanda de agua ha ido en crecimiento y existe una gran incertidumbre en cuanto su futura disponibilidad en los recursos hídricos, además de que actualmente las regulaciones ambientales no permiten la sobreexplotación en algunas cuencas de Chile [19]. El problema es que los costos de bombeo de agua pueden llegar a niveles tales que podrían poner en riesgo la rentabilidad de una determinada iniciativa, también es fundamental la mantención de la integridad del sistema debido al alto consumo que existe hoy en día en la mina, ellos dependen de este recurso para operar, EWS abastece el 62% de agua para la mina MEL.

Para la determinación de las condiciones internas de las tuberías se hará un análisis de pérdida de carga de los tramos de los Acueductos de 42" de EWS, con este estudio se podrá verificar cuando ha sido el aumento a través de los años debido a la rugosidad, corrosión, falla de revestimiento, obstrucciones al paso del flujo por incrustaciones en las paredes, etc. La pérdida de carga de las tuberías será expresada a través de la obtención de la curva del sistema entre tramos, la cual involucra dos tipos de cargas (alturas): Carga Estática y Carga Dinámica. La suma de las dos cargas mencionadas anteriormente da como resultado la altura total requerida en la impulsión de la bomba para llegar al punto de elevación deseado venciendo las pérdidas de carga del sistema.

La altura de impulsión y flujo de cada estación de bombeo se obtiene a partir de manómetros ubicado en la impulsión de cada estación, esta información se puede visualizar minuto a minuto en la plataforma disponible *Uniformance*.

La altura estática entre estaciones es información conocida por lo que junto a los datos de la altura de impulsión entregado por los sensores se puede construir un gráfico de tipo dispersión de la curva del sistema a través de Excel, gracias a la disposición de una nube de puntos formados por la variable x e y, se aproxima la curva mediante un polinomio de grado dos, el cual nos entrega un línea de tendencia muy similar a la original, se aproxima a una parábola igual a y= ax^2+bx+c (Los coeficientes A, B y C son contantes, x: caudal e y: altura Total), con esta curva se podrán evaluar las siguientes variables:

1. Pérdida de Carga de las tuberías.
2. Pérdida de eficiencia del sistema.
3. Variación de Costos de Operación.

Los tres puntos mencionados anteriormente serán evaluados para los cuatro tramos de cada Acueducto de 42" (Línea A y Línea B) en los últimos tres años (2018-2020) el mes de Marzo. El factor más importante para este análisis es la presión de impulsión porque es el parámetro que va indicar inmediatamente si los tramos del ducto han sufrido un aumento debido a las pérdidas por fricción entre fluido y paredes de la tubería. Este incremento afectaría directamente a las pérdidas económicas de EWS, ya que las bombas requieren mayor potencia para impulsar el agua de un punto a otro, esto genera un mayor consumo energético, y a su vez un aumento de costos de operación (Nota: se debe hacer un análisis comparativo con un mismo caudal).

Este análisis nos entregará un estimativo del aumento los costos por pérdidas de carga, y además esta información ayudará a evaluar si alguno de los tramos de EWS requiera limpieza con "Pig" para minimizar las pérdidas asociadas a obstrucciones por sedimentos de las paredes, bolsas de aire, etc.

La importancia de este análisis es poder reducir la vulnerabilidad y los riegos de desabastecimiento en caso de fallas en las plantas de desalinización, es un punto que se debe tratar y evaluar para aumentar la eficiencia en su uso sin afectar el requerimiento de agua que se tiene para satisfacer las necesidades de la mina MEL.

A continuación, se observarán las alturas de elevación, estática y largos de las líneas de impulsión de EWS:

Estaciones de Bombeo	Altura de Elevación Total [m.s.m]	Altura Estática [m]	Largo Línea A [km]	Largo Línea B [km]
HPPS1-HPPS2	753,49	753,49	68,17	68,08
HPPS2-HPPS3	1553,27	797,71	52,99	52,94
HPPS3-HPPS4	2455,57	884,74	22,23	22,22
HPPS4-Reservorio	3234	756,44	24,76	35,3

Tabla 6 Altura de elevación, estética y largos de las líneas de impulsión de EWS

Las características principales de las bombas de alta presión de las estaciones de EWS de las líneas de impulsión se muestran en la Tabla 7 que está a continuación:

Estaciones de Bombeo	Flujo Operación Admisible m^3/s	Altura de Descarga Máxima [m]
HPPS1	0,1365-0,325	1069
HPPS2	0,139-0,331	1110
HPPS3	0,139-0,330	1149
HPPS4	0,142-0,337	1104,6

Tabla 7 Características de bombas de alta presión

Para el estudio se utiliza un total de 910 datos de muestreo para la construcción de gráficos y análisis posteriores. Se tienen los datos del flujo y presión de impulsión en la descarga de cada sistema de bombeo por estación, con estos se realizará una función que aproximará el comportamiento de la presión de descarga con respecto a el caudal, a partir de una regresión lineal con tendencia polinómica obtenida a partir de la deducción analítica de la aproximación discreta mínimo cuadrática lineal, técnica de análisis numérico enmarcada dentro de la optimización matemática, generando una relación de cualquier grado $y = a_0 + a_1 * x + a_2 * x^2 + .. + a_n * x^n$, para el estudio se genera una ecuación de grado 2 ya que es la que más se asemeja al comportamiento de la curva del sistema la cual es igual a:

$$H_{Total} = H_E + K * Q^2 \qquad \textit{Ecuación 8}$$

En definitiva, un problema de ajuste consistirá en resolver un sistema de la forma:

$$y = a_0 + a_1 * x + a_2 * x^2 \qquad \textit{Ecuación 9}$$

Se requiere ajustar a un polinomio de segundo orden, con la siguiente matriz:

$$n * a_0 + (\sum x_i) * a_1 + (\sum {x_i}^2) * a_2 = \sum y_i$$

$$(\sum x_i) * a_0 + (\sum {x_i}^2) * a_1 + (\sum {x_i}^3) * a_2 = \sum x_i * y_i$$

$$(\sum {x_i}^2) * a_0 + (\sum {x_i}^3) * a_1 + (\sum {x_i}^4) * a_2 = \sum {x_i}^2 y_i$$

$$n\ hasta\ i = 1$$

A continuación, se presentan los gráficos obtenido de altura de total $[m]$ v/s caudal $[m^3/s]$, de la Línea A. Los gráficos incluyen las ecuaciones cuadráticas de la curva del sistema de los últimos tres años, junto a su coeficiente de determinación, denominado R², el cual determina la calidad del modelo para replicar los resultados, adquiere valores entre 0 y 1, entre más cercano a uno implica una aproximación a la curva real, los cuales veremos a continuación:

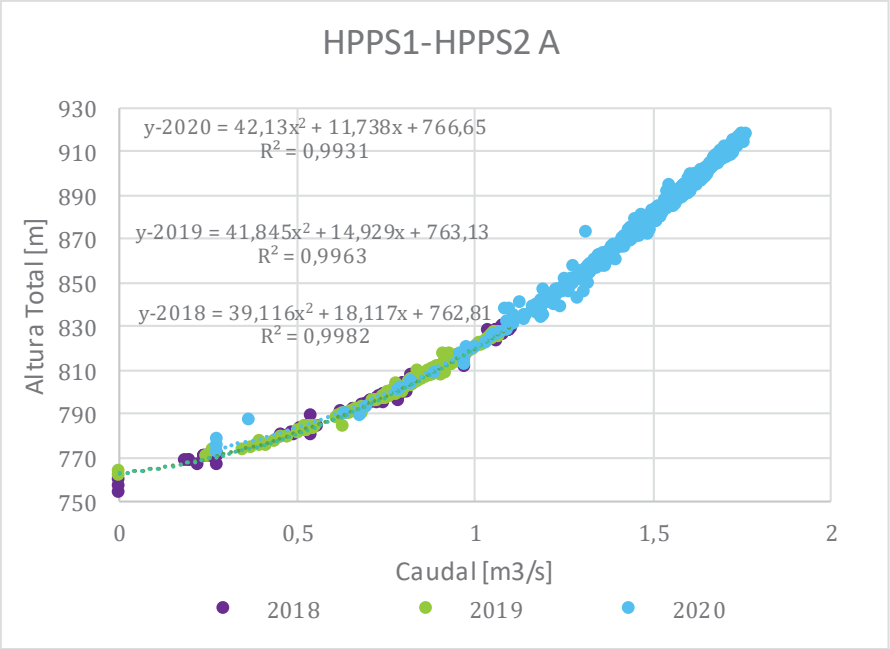

Figura 18 Gráfico altura total [m] v/s caudal [m3/s], HPPS1-HPPS2, Línea A, Fuente: Elaboración Propia

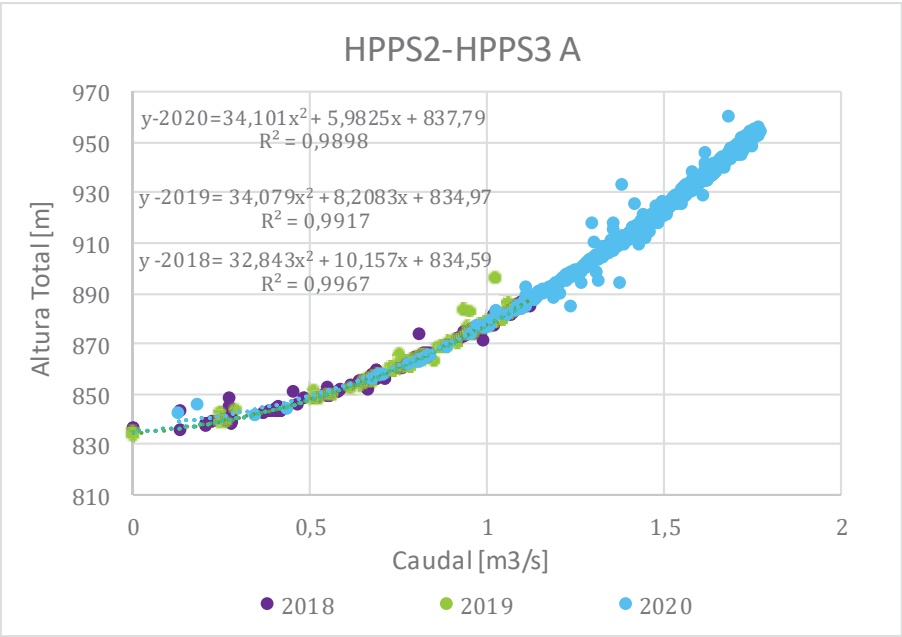

Figura 19 Gráfico altura total [m] v/s caudal [m3/s], HPPS2-HPPS3, Línea A, Fuente: Elaboración Propia

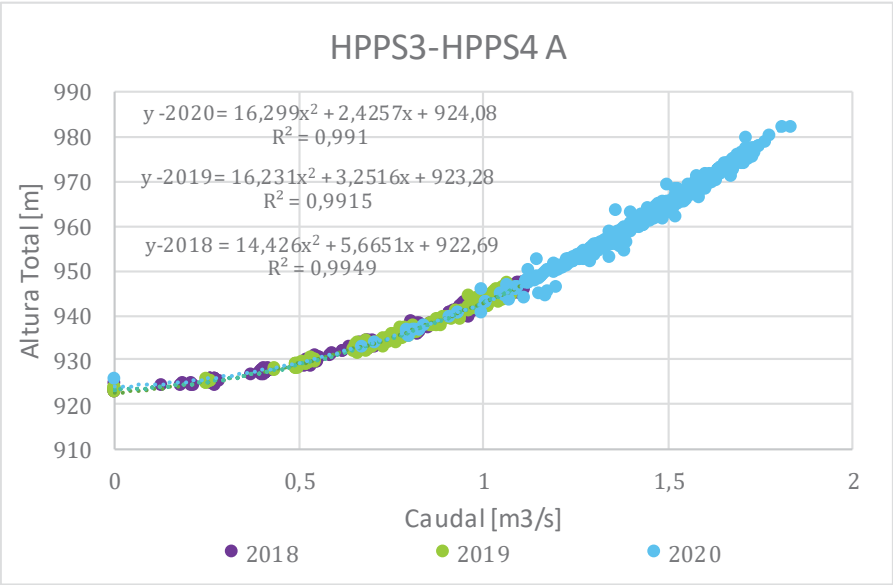

Figura 20 Gráfico altura total [m] v/s caudal [m3/s], HPPS3 -HPPS4, Línea A, Fuente: Elaboración Propia

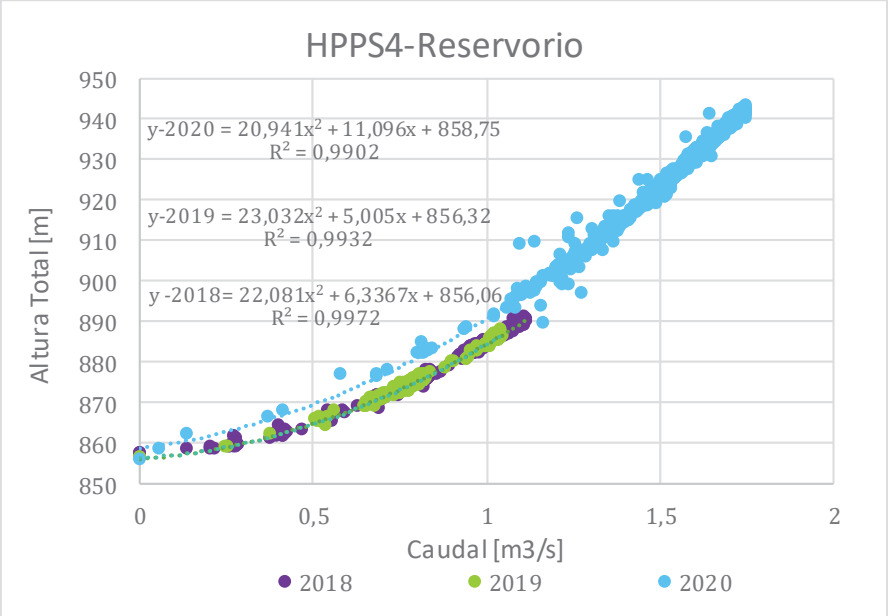

Figura 21 Gráfico altura total [m] v/s caudal [m3/s], HPPS4-Reservorio, Línea A, Fuente: Elaboración Propia

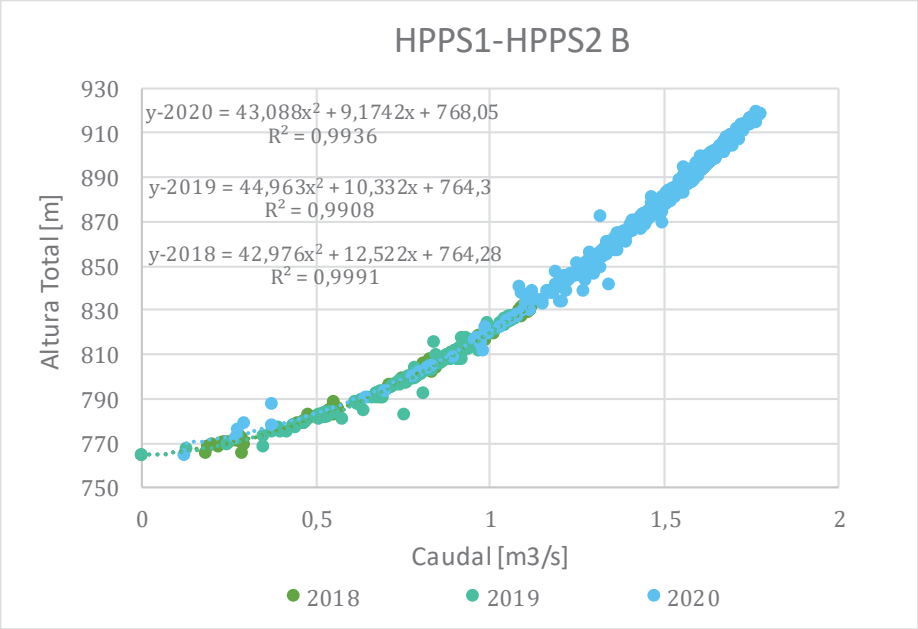

Figura 22 Gráfico altura total [m] v/s caudal [m3/s], HPPS1-HPPS2, Línea B, Fuente: Elaboración Propia

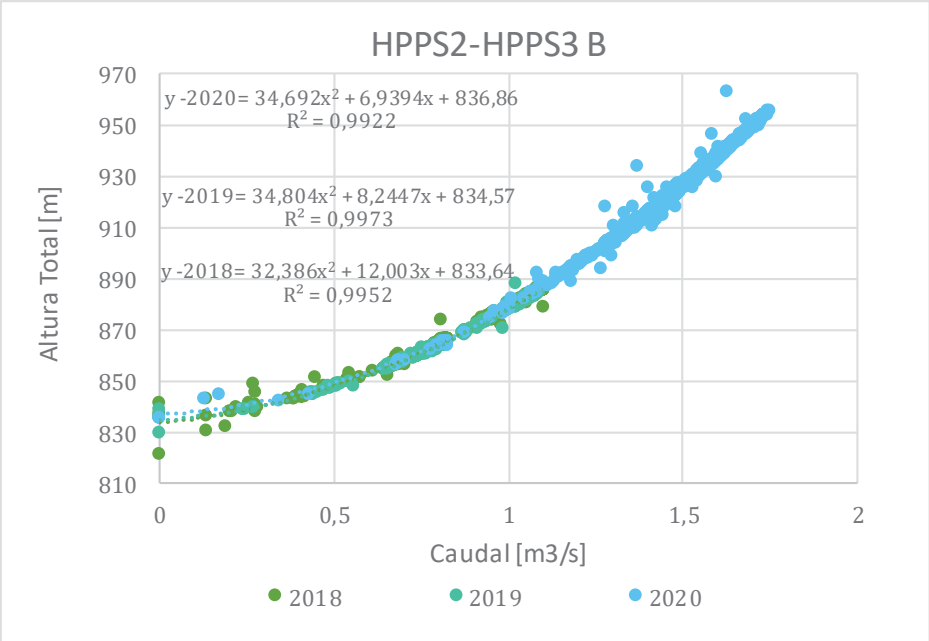

Figura 23 Gráfico altura total [m] v/s caudal [m3/s], HPPS2-HPPS3, Línea B, Fuente: Elaboración Propia

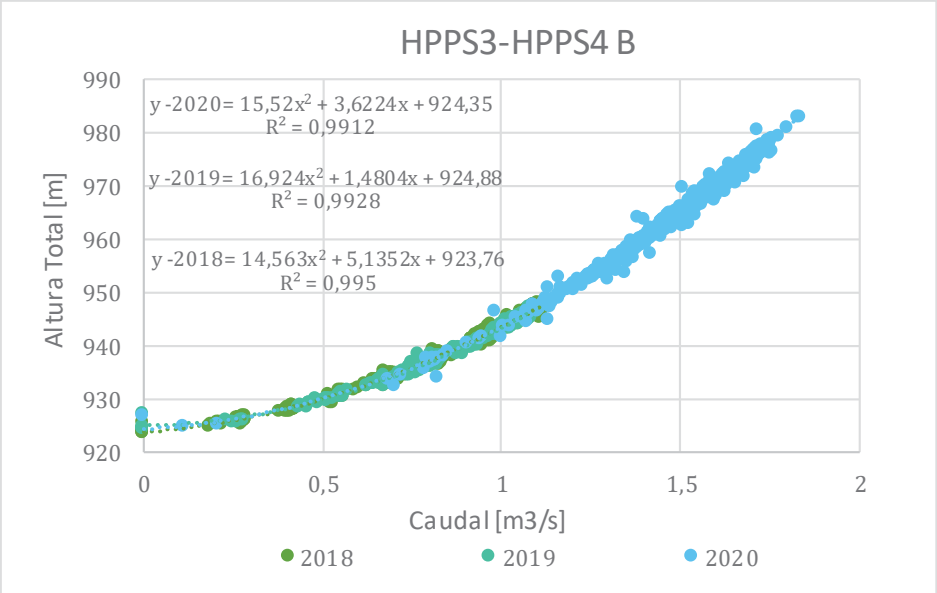

Figura 24 Gráfico altura total [m] v/s caudal [m3/s], HPPS3-HPPS4, Línea B, Fuente: Elaboración Propia

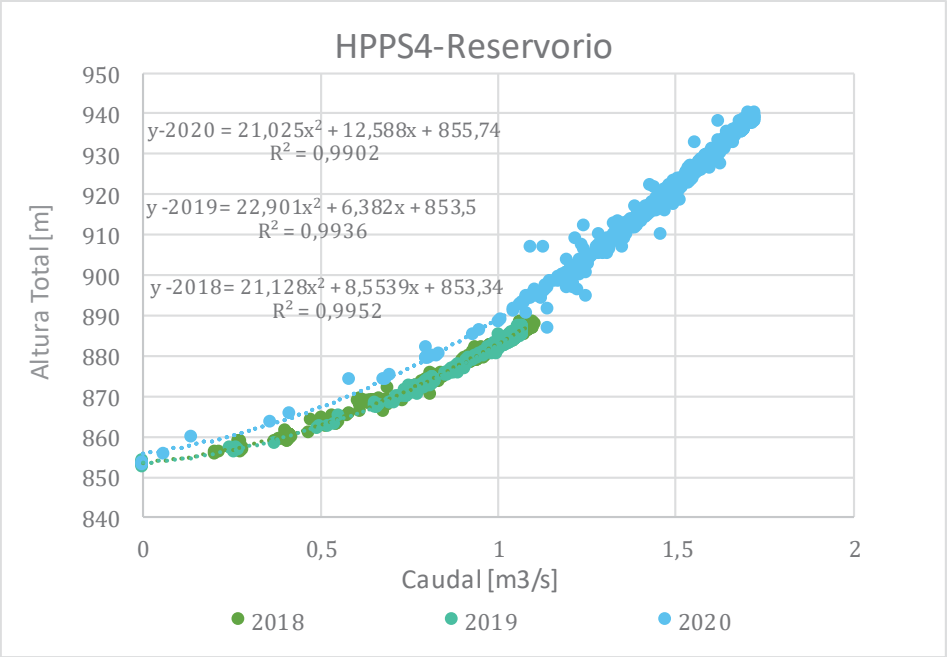

Figura 25 Gráfico altura total [m] v/s caudal [m3/s], HPPS4-Reservorio, Línea B, Fuente: Elaboración Propia

La cantidad de agua suministrada por cada línea (A y B) difiere en un pequeño porcentaje, también al pasar los años el agua impulsada ha sufrido un incremento, este efecto se puede observar en la siguiente tabla (8):

Año	Línea A m^3/s	Línea B m^3/s	Total de Agua m^3/s
2018	0,813	0,805	1,618
2019	0,916	0,887	1,803
2020	1,495	1,477	2,972

Tabla 8 Cantidad de agua suministrada por cada línea de impulsión

La pérdida de carga en tuberías es la pérdida de presión de un fluido al producirse fricción entre el fluido contra las paredes internas de la tubería. El fluido pierde energía por el rozamiento continuo con la tubería y por la fricción que ocurre en el paso de accesorios o dispositivos, que serán vistos como obstáculos en la conducción. Por lo que la pérdida es considerada como la diferencia de presión entre dos puntos, para un determinado caudal.

Para el análisis se examinará la modificación del estado inicial de energía del flujo necesaria para la impulsión, en el caso de que esta aumente implicaría que existe una pérdida de energía debido a un aumento de rugosidad en las paredes, las bombas requerirán un mayor esfuerzo para poder elevar el fluido de un punto a otro, aumentara su potencia suministrada para vencer las pérdidas debido a la fricción.

Para la comparación de la altura impulsada, al igual que las pérdidas de carga de cada estación de los últimos tres años, se deberá realizar con un mismo caudal ya que las pérdidas de carga dependen de varias variables como la sección, longitud, caudal, material y tipo de fluido. Para hacer una comparación entre años y comparar la perdida de eficiencia debido a la rugosidad se debe hacer para la misma cantidad de flujo y así la pérdida no aumente por otras variables, aunque en los gráficos anteriores se puede observar claramente por se incrementan las cargas debido al aumento de flujo.

A continuación, se podrá verificar las cantidades de las variables anteriormente descritas de la Línea A, Caudal, Altura total y Pérdida de carga entre los años 2018-2020:

Estaciones de Bombeo	Caudal Total	Altura Total Impulsión	Altura de Pérdida de carga
–	m3/s	m	m
2018			
HPPS1-HPPS2	0,813	803,4	49,9
HPPS2-HPPS3	0,813	864,5	66,84
HPPS3-HPPS4	0,813	936,83	51,91
HPPS4-Reservorio	0,813	875,8	119,4
2019			
HPPS1-HPPS2	0,813	802,9	49,43
HPPS2-HPPS3	0,813	864,16	66,45
HPPS3-HPPS4	0,813	936,65	51,91
HPPS4-Reservorio	0,813	875,6	125,17
2020			
HPPS1-HPPS2	0,813	804	50,4
HPPS2-HPPS3	0,813	865,2	67,48
HPPS3-HPPS4	0,813	936,82	52,085
HPPS4-Reservorio	0,813	881,61	125,172

Tabla 9 Tabla análisis pérdida de carga, Línea A

A través de la evaluación realizada mediante el método de mínimos cuadrados durante el primer y último año de evaluación (2018 y 2020 respectivamente) y corrigiéndola ecuación a modo de iniciar la curva en el mismo punto (misma cota estática), en todas las estaciones, se obtienen las siguientes variaciones porcentuales:

Estaciones de Bombeo	Variación Pérdidas de carga (%)
HPPS1-HPPS2	1,00
HPPS2-HPPS3	0,96
HPPS3-HPPS4	0,34
HPPS4-Reservorio	4,83

Tabla 10 variaciones porcentuales, pérdidas de carga 2018-2020, Línea A

A continuación, se podrá verificar las cantidades de las variables anteriormente descritas de la Línea B, Caudal, Altura total y Pérdida de carga entre los años 2018-2020:

Estaciones de Bombeo	Caudal Total	Altura Total Impulsión	Altura de Pérdida de carga
–	m3/s	m	m
2018			
HPPS1-HPPS2	0,805	802,2	48,7
HPPS2-HPPS3	0,805	864,3	66,5
HPPS3-HPPS4	0,805	937,3	52,5
HPPS4-Reservorio	0,805	873,9	117,47
2019			
HPPS1-HPPS2	0,805	801,75	48,26
HPPS2-HPPS3	0,805	863,76	66,1
HPPS3-HPPS4	0,805	937,1	52,3
HPPS4-Reservorio	0,805	873,47	117,03
2020			
HPPS1-HPPS2	0,805	803,4	49,86
HPPS2-HPPS3	0,805	864,9	67,21
HPPS3-HPPS4	0,805	937,32	52,6
HPPS4-Reservorio	0,805	879,5	123,05

Tabla 11 Tabla análisis pérdida de carga, Línea B

A continuación, se puede observar las variaciones porcentuales de la Línea B, entre 2018-2020 respectivamente:

Estaciones de Bombeo	Variación Pérdidas de carga (%)
HPPS1-HPPS2	2,38
HPPS2-HPPS3	1,07
HPPS3-HPPS4	0,19
HPPS4-Reservorio	4,75

Tabla 12 variaciones porcentuales, pérdidas de carga 2018-2020, Línea B

En las gráficas anteriores de las Líneas A y B, se puede observar el cambio que ha sufrido la altura de impulsión al pasar los años, solo debido a pérdidas de carga referidas a rugosidad por lo que no se incluye el aumento de caudal impulsado el año 2019 y aún más en el año 2020, este último se verá afectado debido a su aumento de velocidad lo que lo hace un flujo más turbulento y a la ves provoca mayor erosión en las paredes de la tubería. Pero al analizarlo debido a rugosidad podemos comprobar que el aumento no ha sido muy significativo para ambas líneas, y que el año 2019 no posee un aumento por lo contrarió un pequeño porcentaje de disminución, por lo que presentaría una pérdida de carga con signo "-" (*negativo*) en comparación con 2018. Las desviaciones presentadas se pueden deber a

una calibración defectuosa de la instrumentación, aire en la línea, presencia de material sedimentado en la impulsión o elevación real de estación diferente a las indicadas en los antecedentes.

Las variaciones para ambas líneas entre 2018-2020 se han mantenido relativamente contantes entre las Estaciones N°2 hasta la Estación N°4, lo que indica que el aumento de pérdidas no ha sido muy grande ya que el incremento no supera al 1,1 %. En las Estaciones N°1 hasta la Estación N °2 aún sigue siendo leve para la Línea ha ya que solo ha crecido un 1%, en cambio para la Línea B el crecimiento es de un 2,38% por lo que supera a la Línea A en más del doble en términos de pérdida de carga, por lo que implica que hay mayor rugosidad en las tuberías o también existe mayor obstrucción en los filtros de bombas.
Entre las Estaciones N°4 y Reservorio en ambas líneas existe un aumento considerable de pérdidas de carga, llegan casi al 5% lo que implica mayores pérdidas, mayor presión que deben impulsar las bombas para vencer las pérdidas y el flujo llegue a su destino.

Costos Operacionales

Este análisis tiene como objetivo determinar si el sistema satisface las condiciones mínimas de presión y de flujo en los puntos de consumo, con la menor inversión y los menores costos de operación. Los costos de energía son cada vez mayores y seguirán en aumento en el futuro, además que a medida que pasa el tiempo el aumento de rugosidad y velocidad juegan un papel importante, ya que hacen trabajar más a las bombas y además esta última puede causar efectos de erosión. El consumo eficiente de energía se hace cada vez más importante, por lo que la reducción de pérdidas de carga en las tuberías y los accesorios requieren atención. Este análisis ayudara a tomar la decisión adecuada para tomar la decisión adecuada con respecto a la desaladora de Puerto el Coloso.

Para efectos de análisis energéticos y costos de la Energía, el precio base del kWh para el proyecto EWS durante los últimos tres años son los siguientes:

1. 0,089727 US$/kWh, Año 2018
2. 0,090657 US$/kWh, Año 2019
3. 0,108002 US$/kWh, Año 2020

Es necesario destacar que se realizará el siguiente procedimiento para poder determinar aproximadamente cuantos son los KWh anuales para poder satisfacer la demanda de Agua

fresca desde las Estaciones de Bombeo. Se calculará primero la potencia necesaria para impulsar el fluido de un punto a otro en términos de consumo energético [Kwh] para un mismo caudal, y luego se estimará el costo de operación de estación de bombeo funcionando de manera continua (24 hrs diarias, 30 días al mes, 12 meses) [19].

El costo operacional por estación una hora funcionando es igual a:

$$Costo\ Energético(\$US) = Potencia\ \ operación(kWh) * Costo\ operacional\ (US\$/kWh) \qquad \textit{Ecuación 10}$$

Por lo tanto, el costo anual es:

$$Costo\ anual(\$US) = Costo\ Energético\left(\frac{\$US}{Hr\ operacional}\right) * 24\ \left(\frac{Hr}{día}\right) * 30\left(\frac{día}{mes}\right) * 12\left(\frac{mes}{año}\right) \qquad \textit{Ecuación 11}$$

A continuación, se podrá observar los costos de operación asociados al funcionamiento de las estaciones de impulsión, se incluirá la potencia necesaria para el correcto funcionamiento, y sus costos por hora y anual, el análisis se hará para el mismo caudal mencionado en los gráficos anteriores para hacer una comparación solo de pérdidas de carga debido o rugosidad o sedimentos en el filtro de succión, no por otras variables, los cuales se analizan más adelante.

A continuación, en la tabla (13) se puede observar los costos operacionales y potencia útil, Línea A:

Estaciones de Bombeo	Potencia Útil por hora	Costo Operacional por hora	Costo Operacional anual
–	kWH	$US	$US
2018			
HPPS1-HPPS2	396,672	35,59	307497,6
HPPS2-HPPS3	531,342	47,67	411868,8
HPPS3-HPPS4	414,05	37,15	320976
HPPS4-Reservorio	948,81	85,13	735523,2
2019			
HPPS1-HPPS2	392,951	35,62	307756,8
HPPS2-HPPS3	528,26	47,89	413769,6
HPPS3-HPPS4	412,63	37,4	323136
HPPS4-Reservorio	947,27	85,87	741916,8
2020			
HPPS1-HPPS2	401,807	43,39	374889,6
HPPS2-HPPS3	536,41	57,93	500515,2
HPPS3-HPPS4	414,01	44,71	386294,4
HPPS4-Reservorio	994,96	107,45	928368

Tabla 13 Costos Operacionales, Línea A

En la siguiente tabla (14) indica las variaciones de costos y potencia útil entre 2018-2020, de la Línea A:

Estaciones de Bombeo	Potencia kWh	Costo por Hr $US	Costo Anual $US
HPPS1-HPPS2	5,135	0,55458	4791,6
HPPS2-HPPS3	5,068	0,547344	4729
HPPS3-HPPS4	-0,04	-0,00432	-37,3
HPPS4-Reservorio	46,15	4,9842	43063,5

Tabla 14 Variación potencia kWH, y costos asociados

A continuación, en la tabla (15) se puede observar los costos operacionales y potencia útil, Línea B:

Estaciones de Bombeo	Potencia Útil por hora	Costo Operacional por hora	Costo Operacional anual
–	kWH	$US	$US
2018			
HPPS1-HPPS2	383,451	34,4	297216
HPPS2-HPPS3	524,016	47,01	406166,4
HPPS3-HPPS4	413,92	37,13	320803,2
HPPS4-Reservorio	924,61	82,96	716774,4
2019			
HPPS1-HPPS2	379,867	34,43	297475,2
HPPS2-HPPS3	519,856	47,13	407203,2
HPPS3-HPPS4	411,62	37,31	322358,4
HPPS4-Reservorio	921,15	83,5	721440
2020			
HPPS1-HPPS2	392,483	42,38	366163,2
HPPS2-HPPS3	529,03	57,13	493603,2
HPPS3-HPPS4	413,86	44,69	386121,6
HPPS4-Reservorio	968,53	104,6	903744

Tabla 15 Costos Operacionales, Línea A

En la siguiente tabla (16) indica las variaciones de costos y potencia útil entre 2018-2020, de la Línea B:

Estaciones de Bombeo	Aumento Potencia kWH	Aumento Costo Por Hr $US	Aumento Costo Anual $US
HPPS1-HPPS2	9,032	0,975456	8427,9
HPPS2-HPPS3	5,014	0,541512	4678,6
HPPS3-HPPS4	-0,06	-0,00648	-55,9
HPPS4-Reservorio	43,92	4,74336	40982,6

Tabla 16 Variación potencia kWH, y costos asociados

En los gráficos anteriores se puede observar los aumentos y disminuciones de la potencia útil requerida para cada una de las estaciones. Las variaciones entre las estaciones de bombeo en ambas líneas no han sido significativas, las más bajas son entre las Estaciones N°1 y N°3, las cuales no han superado los 6 kwH.

Para las Estaciones N°3 hasta la Estación N°4 se puede verificar que existe una disminución de potencia, por lo que en la variación entre los años 2018-2020 es negativo, esto se debe a un error de medición, ya sea por problemas de calibración del manómetro, falla en los

sensores, presencia de material sedimentado en la impulsión, entre otros. Además, que las aproximaciones de las curvas del sistema no están al 100%, por lo que también podría inducir a error, sin embargo, la disminución fue muy baja, con una medida de 0,04 kWh.

Normalmente la potencia necesaria al igual que las pérdidas de cargas van aumentando a medida que pasa el tiempo debido a que la rugosidad inicial se puede ver alterada debido a la calidad de agua y naturaleza de la superficie interior del conducto, la cual reduce la capacidad hidráulica por incremento de coeficiente de fricción o por incrustaciones pegadas a las paredes que obstruyen el paso del agua. El efecto del incremento de altura o pérdidas al pasar los años, se puede observar con mayor claridad en los gráficos de altura total v/s caudal, señalados anteriormente.

El sector entre la Estación N°4-Reservorio fue el que tuvo mayores incrementos de potencias y costos asociados debido a las grandes pérdidas de carga en el sistema de impulsión las cuales fueron superiores a 40 KwH para ambas Líneas, esto se pudo generar por distintas cosas como: falta de limpieza en los filtros de succión en la Estación N°4, la cantidad de concentración de inhibidores de corrosión que llega a la estación no es suficiente, lo cual provocaría una mayor probabilidad de que la tubería pueda corroerse internamente y la también según la disposición que se encuentre posicionada la tubería ya que algún cambio de cotas de elevación podría generar una alteración en las presiones de descarga. El año 2019 se produjo modificación en la capacidad del reservorio al igual que en las cotas de la tubería a su llegada. Este evento se realizó para aumentar la cantidad agua almacenada en el tanque anterior al reservorio debido a que la cantidad suministrada por los Acueductos de 42” superaba lo que este podía acumular, este incremento compenso la cantidad de agua de sobra y aseguró que este no rebalsara nuevamente. En consecuencia, al aumento de capacidad provoco una elevación de la cota de descarga en las tuberías por lo que para ingresar al estanque tuvo que aumentar su altura aproximadamente en 3 metros, esta modificación es otra variable que afecto al incremento en las pérdidas de las líneas.

Por lo tanto, el incremento en costo para el tramo más afectado superó los 40000 USD anuales en los Acueductos de 42”, para la Línea A fue de 43063,58 USD y para la Línea B de 40982,63 USD, este aumento solo contabilizo las pérdidas de carga para un mismo caudal, utilizando el mínimo de los últimos tres años, ya que, si se incluyeran las pérdidas debido al aumento de velocidad y caudal desde enero de 2020, crecerían notablemente ya que el incremento desde 2018 fue superior al 80 % tanto para la Línea A como para la Línea B, el costo anual supera los 2 millones de USD, debido a la energía necesaria para mover aproximadamente 1500 l/s por línea de impulsión.

4.1.5 LIMPIEZA “PIG” o CHANCHO

Siendo unos de los métodos de valoración de integridad, sugeridas por las normas ASME B 31.4 y API 1160, la limpieza de “Pig” o cerdo es uno de los métodos más recomendados para la mantención interna del ducto y el sistema opere en óptimas condiciones.

La herramienta al ser insertada viaja por el interior a lo largo de la longitud de una tubería de producción y tiene como finalidad remover los sedimentos y agua en el interior del ducto, para no obstruir o enmascarar cualquier anomalía importante. Las normas recomiendan que se realice una limpieza frecuente para que los sólidos incrustados en la tubería no generen obstrucción al paso del fluido, el cual genera una pérdida de carga en el sistema y a su vez provoca un aumento de energía al aumentar la presión de las bombas. Las tuberías que apliquen esta técnica deberán estar diseñas para que la herramienta pueda introducirse y viajar libremente entre los tramos, de tal forma que se evite los daños del “Pig”, tuberías o accesorios durante las operaciones (instalación lanzadora/receptor Pig descrita en el apartado 3.2.4).

En septiembre de 2019 se realizó un estudio para determinar la factibilidad técnica de utilizar dispositivos de limpieza interna “Pigs” en las cañerías del sistema de impulsión de la planta EWS. Este análisis verificó las ventajas, desventajas y riegos asociados al realizar este tipo de actividad, se compararon distintos tipos de herramientas los cuales se diferencian en los materiales de fabricación, diseño, y la elección de esta herramienta depende principalmente del tipo de limpieza específica a realizar en el ducto ya que esta puede eliminar desde partículas de parafina hasta escombros, este estudio se generó para poder encontrar la herramienta ideal que minimice la presencia de materias extrañas en los productos, los sedimentos no obstruyan el paso del fluido, esta no genere daños en la tuberías y/o accesorios y por último reducir la cantidad de corridas herramientas, y las operaciones de lanzamiento y recepción asociadas, que son necesarias para evitar la acumulación de corrosión e incrementar la capacidad de transporte.

Para el estudio se incluyeron dos tipos de herramientas de limpieza, una se le denomina limpieza blandos “Pig de espuma”, la cual está fabricado de poliuretano recubierto en espiral con elastómeros y se usan para remover líquidos acumulados, arena, polvos, entre otros y la otra herramienta se le llama “Pig de hacer”, la cual está fabricada de acero recubierto de discos, copas y/o platos de neopreno, poliuretano, acero, etc. Su función es remover líquidos acumulas, arena y sedimentos con gran adherencia.

Para la elección del tipo de herramientas de limpieza a utilizar en las tuberías de EWS se realizó un análisis de riegos por tipo de dispositivo según los casos más desfavorables que

pueden causar durante la operación, a continuación, se puede observar la tabla de la valoración de riego según su nivel y el resultado del análisis de riego para cada una de las herramientas [20]:

Valoración de Riesgo	
Nivel	Valoración
1	Despreciable
2	Moderado
3	Alto
4	Crítico

Tabla 17 Tabla valoración de riesgos

En la siguiente tabla (18) se puede observar la valoración de cada una de las herramientas y que nivel de riesgo tiene cada una de ellas:

Riesgo	Herramienta	de limpieza
	Espuma	Acero (escobillas)
Atascamiento de las Herramientas con Impacto en integridad de la tubería	1	4
Mala operación durante los procesos de lanzamiento y recibo de herramientas	2	4
Pérdida de recubrimiento interno (FBE) de la cañería	1	4
Pérdida de herramientas de limpieza en piscinas	1	4
Total Riesgo	5	16
Valoración Riesgo	1	4

Tabla 18 Tabla de nivel de riego de cada una de las herramientas de limpieza

En la tabla anterior se puede comprobar que la herramienta de acero entrega mucho más riesgo, considerado como crítico según su nivel de valorización, por el contrario, la Herramienta de espuma tiene un nivel de riesgo muy despreciable, también se realizó un estudio de beneficios y costos de cada una de ellas, las cuales están equiparadas. Sin embargo, MEL decidió que además de este estudio se considerará el análisis hidráulico, que indique el estado actual de la tubería en términos de pérdida de carga.

La frecuencia de limpieza de “Pigs”, va a depender de los valores obtenidos de las pérdidas de carga los cuales son evaluados cada seis meses, con este estudio se podrá determinar la pérdida de eficiencia energética asociada al aumento de la pérdida de carga del sistema, y llevar estos datos a pérdidas económicas para establecer la prioridad de este tema como compañía, si las pérdidas crecen muy rápidamente puede indicar que el fluido tiene potencial de corroer la superficie interna de la tubería, y el operador debe determinar la naturaleza de la corrosión que puede ocurrir, generalmente surge por retención de agua o deposición de

sedimentos. Los operadores deben tomar medidas para mitigarla para que el agua sea impulsada de manera efectiva y segura.

Uno de los pasos recomendados por las Normas API 1160 y ASME B31.4 para la mitigación de la corrosión son la limpieza con “Pig” de manera frecuente, ayudan a la remoción de sedimentos, retención de agua, depósitos de impurezas semisólidas adheridos a la superficie interior del ducto acumulados durante un periodo de tiempo.

Según los resultados obtenidos de la evolución de pérdidas de carga en todos los tramos de las tuberías (apartado 4.1.4), con los datos operacionales y la documentación de ingeniería revisada indican que las pérdidas más grandes ocurren entre las estaciones HPPS1-HPPS2 en la Línea B con un aumento de pérdidas del 2,38 % con un aumento de costos de 8427,93 USD anual, el cual se considera despreciable y no es recomendable realizar actividades de limpieza. El tramo más afectado es entre las Estaciones HPPS4-Reservorio, las pérdidas aumentaron un 4,869% para la Línea A y 4,75% para la Línea B, el costo anual asociado a estos aumentos es igual a 43063,5 USD y 40982,6 USD respectivamente.

En resumen, de las evaluaciones actuales no es necesario realizar limpieza interna debido a que los costos no son muy altos, sin embargo, es necesario mantener protocolizado los procedimientos e instalaciones de limpieza para previo uso al momento de requerirse.

Se recomienda evaluar con más detalle el tramo HPPS4-Reservorio en ambas líneas, aplicando otras técnicas que pueda determinar las condiciones internas de la tubería como análisis de los filtros de succión de la estación, video inspección, analizadores de corrosión, etc… A pesar de que los costos no son elevados pero las pérdidas en estos tramos son casi cinco veces en comparación a los demás por lo que se requiere determinar la naturaleza y tomar medidas para mitigar este efecto y evaluar la posibilidad de enviar por primera vez un “Pig” de limpieza en los Acueductos de 42”.

Resumen plan de mantenimiento revestimiento interno, ANEXO 2

4.2 INSPECCIÓN Y PLAN DE MANTENIMIENTO REVESTIMIENTO EXTERNO

Para el control de corrosión del revestimiento externo, se utilizan las metodologías descritas por NACE SP 502-2010, a través de ECDA (External Corrosión Direct Assessment), el cual incluye técnicas para la evaluación y mejora de la integridad del sistema de tubería enterrado, este método busca prevenir la corrosión bajo estudios entendiendo la causa con la cual se

puede controlar la corrosión, se realizan inspecciones indirectas y directas para localizar la existencia de este fenómeno o daños de recubrimiento [37].

Los tipos de inspecciones utilizadas son las siguientes:

Inspecciones Indirectas: Está se encarga de identificar y definir la severidad de los fallos de recubrimiento y localidad donde la corrosión se podría presentar, y se utilizan las siguientes técnicas:

a. Técnica CIPS ("Close Interval Potential Survey")
b. Técnica DCVG ("Direct Current Voltage Gradient")

Inspecciones Directas: Esta técnica incluye el estudio de los datos obtenidos de la inspección indirecta, para la selección de los sitios de excavaciones y evaluaciones de la superficie de la tubería, luego de la excavación se deberá realizar las siguientes inspecciones

a. Inspección Visual
b. Prueba de adherencia "Holiday Detector"

Para una correcta evaluación se deberá combinar los datos de la inspección directa e indirecta para identificar el impacto de la corrosión externa de la tubería, y evaluar si es que el tramo de tubería inspeccionado requiere reparación.

Algunas de las inspecciones descritas anteriormente se realizaron por primera vez en diciembre de 2017, se determinó el estado de los sistemas de protección contra la corrosión externa en ambas tuberías de 42" y 178 kilómetros cada una (Escondida Water Supply - EWS). Para esto se utilizan las metodologías principales denominadas CIPS y DCVG.

<u>Trabajo realizado</u>

Para inspeccionar detalladamente los niveles de protección catódica en las tuberías subterráneas se utilizó la técnica CIPS descrita en el apartado 3.4.3, se encargó de registrar los potenciales a lo largo de las tuberías con la corriente encendida (potenciales "ON") y con la corriente apagada (potenciales "off"), para la desconexión del sistema se utilizó temporizadores cíclicos en todas las fuentes de protección catódica. El operador que realiza el recorrido del ducto desde el poste más cercano, registra los datos con "Colector de datos ALLEGRO CX BASS TRIGON".

El análisis de la información relevada Mediante la utilización del software se obtiene un perfil eléctrico de la totalidad de ambas Líneas inspeccionadas (A y B) está representado por medio

de un gráfico de fácil interpretación de potenciales eléctricos en función de la distancia recorrida, se puede observar a continuación [38]:

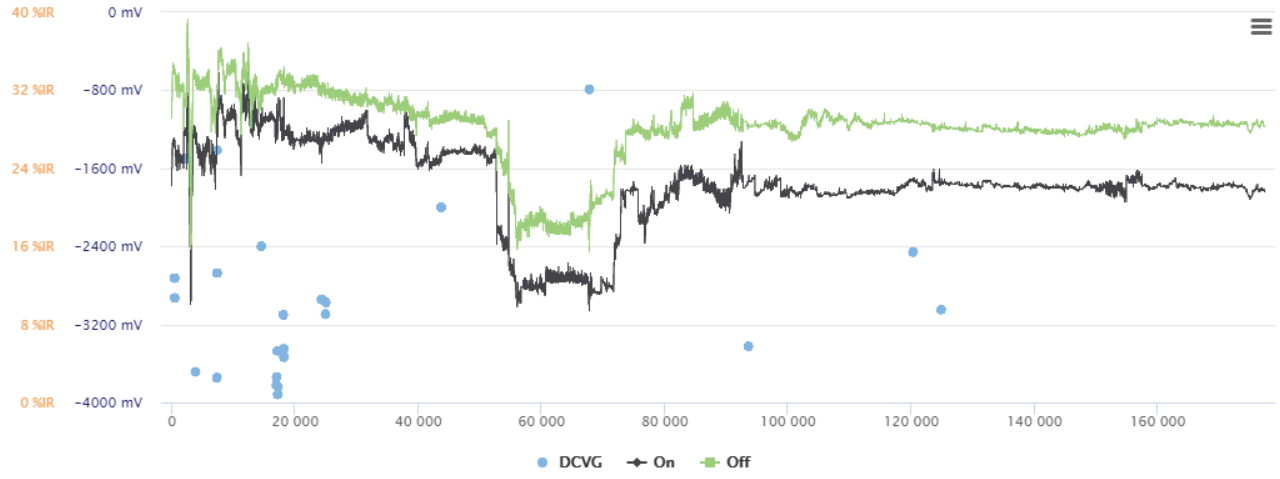

Figura 26 Gráfico Resumen de re levantamiento CIPS Línea A, EWS, Fuente: Morken.

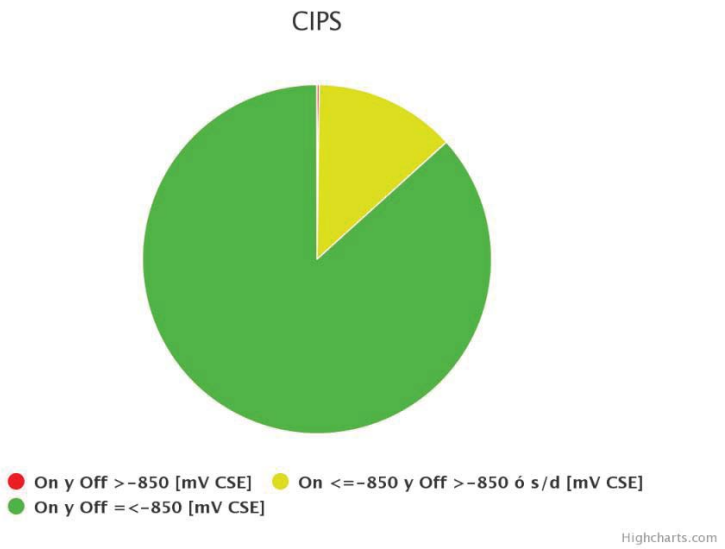

Figura 27 Gráfico de re levantamiento línea A, EWS referido a la norma NACE RP0169-2013, Fuente: Morken

Durante el relevamiento del acueducto EWS-A se pudo observar que el 86.3% de la estructura se encuentra con potenciales On y Off más electronegativos que -850mV, el 13.1% de la misma se encuentra con potenciales Off menos electronegativos que -850mV y solo y el 0.6% se encuentra con potenciales On y Off menos electronegativos que -850mV.

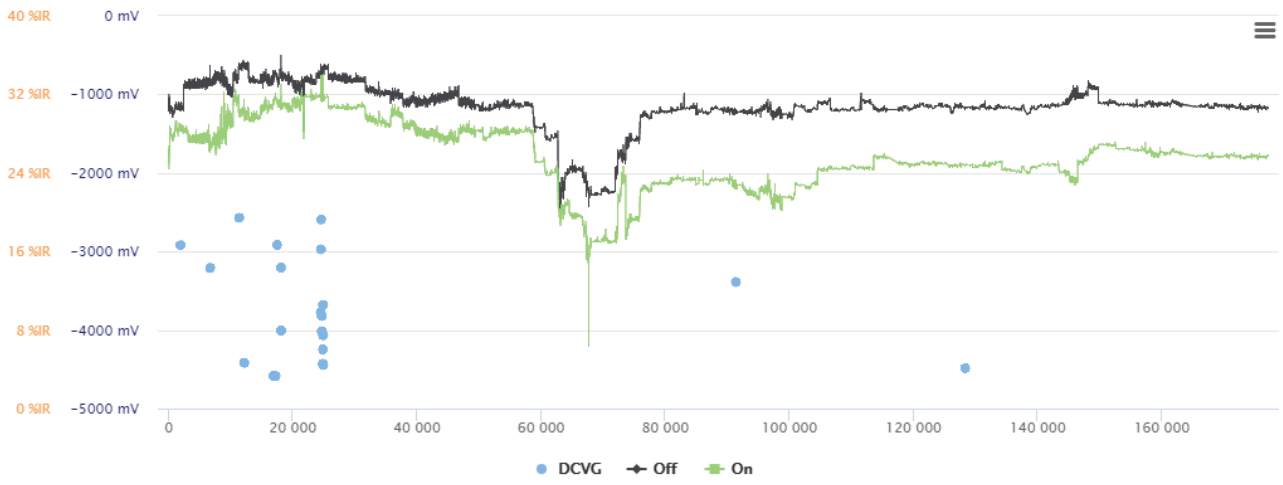

Figura 28 Gráfico Resumen de re levantamiento CIPS Línea B, EWS, Fuente: Morken.

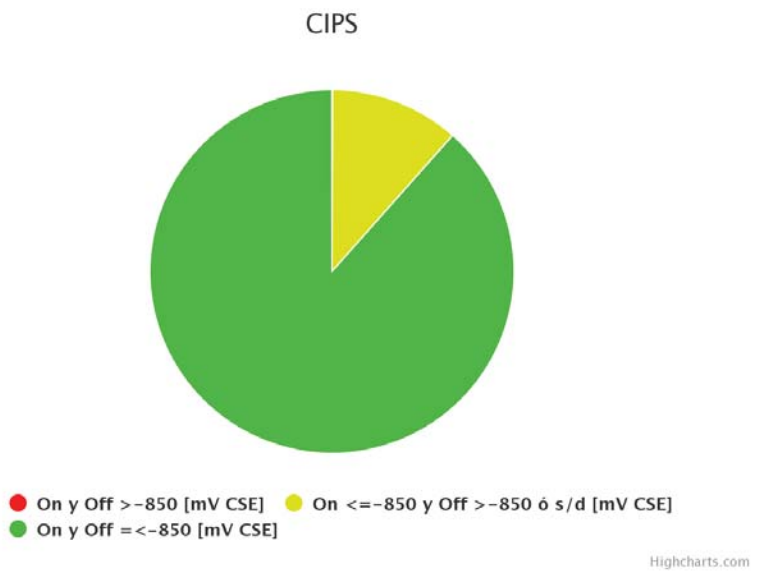

Figura 29 Gráfico de re levantamiento línea A, EWS referido a la norma NACE RP0169-2013, Fuente: Morken.

Durante el relevamiento del acueducto EWS-B se observó que el 88.5% de la estructura se encuentra con potenciales On y Off más electronegativos que -850mV y el 11.5% de la misma se encuentra con potenciales Off menos electronegativos que -850mV.

Los valores obtenidos confirman que ambas estructuras cumplen en forma parcial con el criterio de -850mV vs CSE sugerido por NACE en la RP0169-2013, descritos en el apartado 3.4.1.

Para la definición de frecuencias y tareas a realizar se considerarán las observaciones encontradas en el estudio descrito anteriormente, recomendaciones del personal que realizó la primera inspección y las Normas NACE RP 502-2010, NACE RP 0169-2013 y ASME B31.11 "Slurry Transportation Piping Systems", el cual se describirá a continuación:

4.2.1 PLAN DE INSPECCIÓN, TÉCNICA CIPS ("Close Interval Potential Survey")

El proceso de inspección CIPS se conforma de las siguientes etapas:

1) **Análisis de la ubicación y diseño de la cañería a inspeccionar;**
   Descripción Tarea

- Ubicar e Identificar la Caja de medición permanente, equipos rectificadores, válvulas, derivaciones, cruces de ruta, etc.

2) **Señalización de la traza de la cañería**
   Descripción Tarea

- Se debe proceder a señalizar la traza de la cañería con estacas ubicadas cada 30 m de distancia utilizando un detector de cañerías.

3) Intervención de los equipos rectificadores

Descripción Tarea

- En esta etapa se realiza la instalación de los interruptores sincronizados por satélite (temporizadores) sobre los equipos rectificadores que afecten la zona a inspeccionar. Los ciclos de interrupción de los temporizadores conforman una relación determinada de encendido/apagado para evitar la despolarización significante de la cañería durante el transcurso de los estudios.

4) Relevamiento de potenciales ON-OFF

Descripción Tarea

Medir el potencial tubería-suelo de EWS con corriente de protección catódica interrumpida, por medio de interruptores sincronizados satelitalmente de forma que todos los equipos rectificadores mantengan la misma frecuencia (ON-OFF), utilizando un equipo de almacenamiento de datos, A continuación, se describen los pasos comprendidos durante el relevamiento de potenciales:

- ✓ En aquellos casos donde la zona de trabajo posee terrenos secos, se procederá a humectar el punto de contacto entre los electrodos (Cu-CuSO4) y el suelo.
- ✓ Todas las mediciones relevadas serán caja de medición permanente (CMP) u otros puntos de referencias considerados por la empresa.
- ✓ En el caso de obtener lecturas de los potenciales Off más positivas que -850 mV, o se identifiquen zonas con caídas significativas en el sentido menos negativo; se tomará una medición de potenciales a la derecha y/o izquierda de la cañería.
- ✓ Antes de conectar el equipo a un nuevo poste de medición (CMP), se registrarán datos de conexión cercana y caída de IR.
- ✓ se deberán exportar los datos desde el registrador de datos al software destinado al análisis de la información.

Frecuencia: Trianual

Se utilizó el método DCVG (apartado x) para localizar fallas del revestimiento y determinar el tamaño relativo de las mismas. Esta técnica se desarrolla mediante la aplicación de corriente pulsante con una frecuencia de 1 Hz, utilizando un aparato "PCS 2000".

Permite localizar solo las fallas del revestimiento de la tubería enterrada. Esta técnica está incluida en el Método de Ensayo normalizado de NACE TM0109 "Aboveground Survey Techniques for the Evaluation of Underground Pipeline Coating Condition", describe el cálculo de %IR para la determinación del tamaño relativo de las indicaciones y remite a la Norma NACE SP0502-2002 para la clasificación de las mismas, el cual fue utilizado para el dimensionamiento de gravedad de la falla, el cual ayuda a determinar la cantidad de puntos que deberán ser inspeccionado mediante estudio mecánicos para determinar si existe perdida de material.
En el siguiente gráfico se puede observar los porcentajes %IR, los cuales según su valor representa el tamaño del defecto (se clasifican en cuatro categorías), se determinó midiendo la pérdida de potencial entre el epicentro del defecto y tierra remota, el cual veremos a continuación [38]:

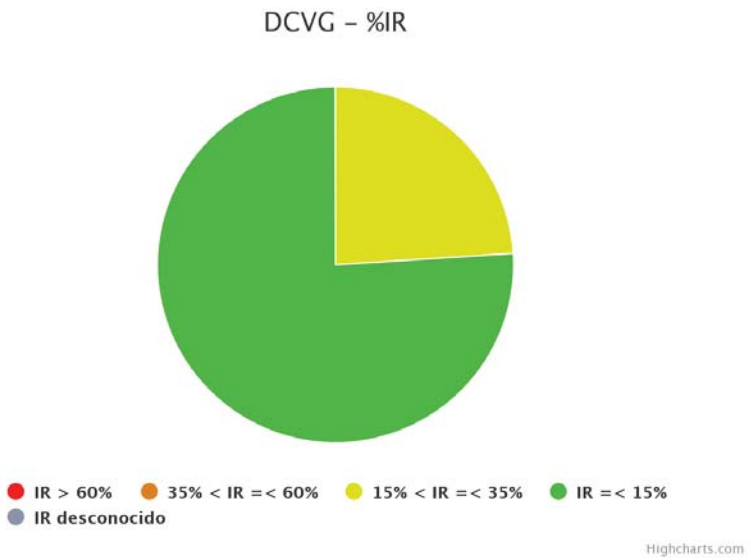

Figura 30 Gráfico re levantamiento DCVG EWS-Línea A, Fuente: Morken.

En el relevamiento DCVG efectuado en el acueducto EWS – A, sobre un total de 25 indicaciones detectadas, se evidencia que seis de ellas se encuentran con una caída de potencial entre 15% y 35% mientras que los 16 restantes tienen una caída de potencial menor al 15%. La totalidad de las indicaciones tienen un comportamiento On Catódico – Off Catódico.

Se adjunta a continuación el resumen de fallas correspondiente:

Linea	Pk Inicio (mojón+m)	Inicio (m)	IR %	Comportamiento On	Comportamiento Off	Latitud	Longitud
EWS-A	TP0_120+344.918	441.421	12.75	Catódico	Catódico	-23.7609995	-70.4675524
EWS-A	TP0_120+358.753	455.256	10.71	Catódico	Catódico	-23.7610452	-70.467414
EWS-A	TP2_132+401.028	2289.447	25.01	Catódico	Catódico	-23.7634312	-70.4510305
EWS-A	TP3_380+670.765	3785.268	3.14	Catódico	Catódico	-23.7672165	-70.4375943
EWS-A	TP6_500+906.549	7279.431	2.55	Catódico	Catódico	-23.7898275	-70.4153119
EWS-A	TP6_500+944.075	7316.957	25.85	Catódico	Catódico	-23.7897236	-70.4149657
EWS-A	TP6_500+977.965	7350.847	13.27	Catódico	Catódico	-23.7896573	-70.4146397
EWS-A	TP13_067+1669.144	14508.718	16.01	Catódico	Catódico	-23.7825471	-70.348204
EWS-A	TP17_076+116.086	16925.949	1.75	Catódico	Catódico	-23.7768849	-70.3275917
EWS-A	TP17_076+168.615	16978.478	2.58	Catódico	Catódico	-23.7764375	-70.3273923
EWS-A	TP17_076+178.708	16988.571	2.57	Catódico	Catódico	-23.7763528	-70.3273564
EWS-A	TP17_076+297.181	17107.044	5.29	Catódico	Catódico	-23.775312	-70.3271651
EWS-A	TP17_076+341.518	17151.381	0.82	Catódico	Catódico	-23.7748959	-70.3269528
EWS-A	TP17_076+400.087	17209.95	1.61	Catódico	Catódico	-23.7746779	-70.3264288
EWS-A	TP18_050+242.958	18044.6	8.98	Catódico	Catódico	-23.7725161	-70.3185736
EWS-A	TP18_050+304.385	18106.027	5.49	Catódico	Catódico	-23.7724276	-70.3179777
EWS-A	TP18_050+354.696	18156.338	4.65	Catódico	Catódico	-23.7723587	-70.3174891
EWS-A	TP24_500+27.195	24251.762	10.55	Catódico	Catódico	-23.7594786	-70.2609202
EWS-A	TP24_900+288.769	24910.827	9.07	Catódico	Catódico	-23.7575315	-70.2548039
EWS-A	TP24_900+331.492	24953.55	10.25	Catódico	Catódico	-23.7574128	-70.2544046
EWS-A	TP42_000+1992.885	43701.618	19.99	Catódico	Catódico	-23.7614673	-70.0752539
EWS-A	TP68_000+146.12	67749.394	32.09	Catódico	Catódico	-23.8554533	-69.8671188
EWS-A	TP92_750+892.554	93556.637	5.76	Catódico	Catódico	-23.986098	-69.6628188
EWS-A	TP120_329+1.395	120296.079	15.41	Catódico	Catódico	-24.1127679	-69.4416297
EWS-A	TP123_814+1413.165	124842.309	9.51	Catódico	Catódico	-24.1278138	-69.4001079

Figura 31 Tabla de indicaciones de la Línea A, Fuente: Morken.

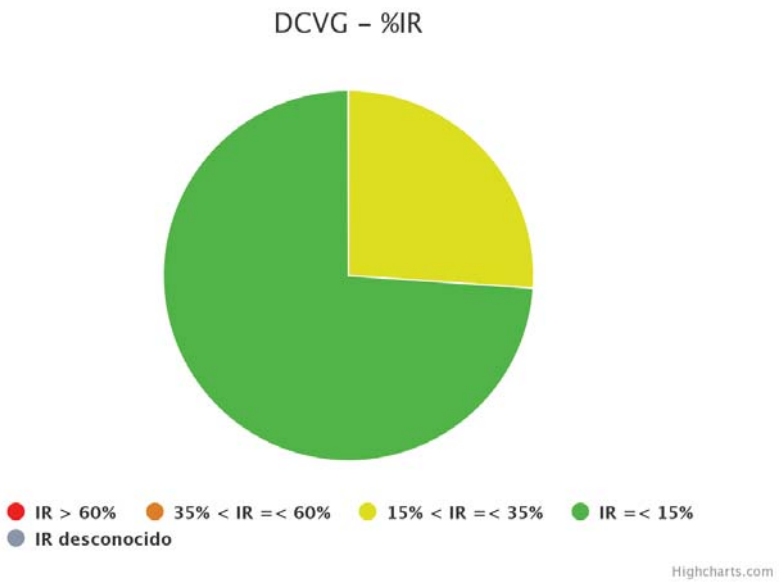

Figura 32 Gráfico re levantamiento DCVG EWS-Línea B, Fuente: Morken.

En el relevamiento DCVG efectuado en el acueducto EWS – B, sobre un total de 23 indicaciones detectadas, se evidencia que seis de ellas se encuentran con una caída de potencial entre 15% y 35% mientras que los 17 restantes tienen una caída de potencial menor al 15%. La totalidad de ellas tienen un comportamiento On Catódico – Off Catódico.

Se adjunta a continuación el resumen de fallas correspondiente:

Linea	Pk Inicio (mojón+m)	Inicio (m)	IR %	Comportamiento On	Comportamiento Off	Latitud	Longitud
EWS-B	TP2_132+1.653	1899.33	16.64	Catódico	Catódico	-23.76137079	-70.4542006
EWS-B	TP6_910+50.235	6669.679	14.33	Catódico	Catódico	-23.78615076	-70.4194409
EWS-B	TP11_510+24.786	11367.559	19.43	Catódico	Catódico	-23.78371651	-70.3773453
EWS-B	TP12_255+65.87	12159.625	4.66	Catódico	Catódico	-23.78176507	-70.3700253
EWS-B	TP17_076+77.907	16891.043	3.33	Catódico	Catódico	-23.77719472	-70.3276378
EWS-B	TP17_076+381.053	17194.189	3.33	Catódico	Catódico	-23.77481213	-70.3266027
EWS-B	TP17_076+550.365	17363.501	3.33	Catódico	Catódico	-23.77428896	-70.3250406
EWS-B	TP17_076+628.778	17441.914	16.67	Catódico	Catódico	-23.77404268	-70.3243186
EWS-B	TP18_050+256.57	18065.75	14.35	Catódico	Catódico	-23.77255224	-70.3184199
EWS-B	TP18_050+279.68	18088.86	7.94	Catódico	Catódico	-23.77251661	-70.3181961
EWS-B	TP24_500+261.524	24492.895	9.79	Catódico	Catódico	-23.75883991	-70.2587148
EWS-B	TP24_500+285.822	24517.193	16.21	Catódico	Catódico	-23.75877615	-70.2584862
EWS-B	TP24_500+312.056	24543.427	16.11	Catódico	Catódico	-23.75869541	-70.2582439
EWS-B	TP24_500+326.474	24557.845	19.26	Catódico	Catódico	-23.75865589	-70.2581089
EWS-B	TP24_900+9.309	24638.999	7.87	Catódico	Catódico	-23.75841605	-70.2573558
EWS-B	TP24_900+20.417	24650.107	9.42	Catódico	Catódico	-23.75837758	-70.2572552
EWS-B	TP24_900+162.407	24792.097	4.56	Catódico	Catódico	-23.75795777	-70.2559376
EWS-B	TP24_900+187.297	24816.987	10.57	Catódico	Catódico	-23.75789038	-70.255704
EWS-B	TP24_900+206.192	24835.882	6.02	Catódico	Catódico	-23.75783557	-70.2555283
EWS-B	TP24_900+237.083	24866.773	7.47	Catódico	Catódico	-23.75774279	-70.2552422
EWS-B	TP24_900+264.495	24894.185	4.45	Catódico	Catódico	-23.7576599	-70.2549885
EWS-B	TP91_000+1040.506	91361.315	12.9	Catódico	Catódico	-23.98006999	-69.6822509
EWS-B	TP128_228+547.687	128305.742	4.11	Catódico	Catódico	-24.1433682	-69.3702532

Figura 33 Tabla de indicaciones de la Línea B, Fuente: Morken.

La siguiente tabla Resumen proporciona indicaciones clasificada por categorías según el tamaño de su defecto, estas fueron mencionadas anteriormente con su IR% respectivo de ambas tuberías:

Categoría	Descripción	Numero de Indicaciones A	Número de Indicaciones B
51-100%IR	Los defectos se consideran críticos y se recomienda su reparación a corto plazo.	–	–
36-50%IR	Para los defectos se recomienda la reparación a mediano plazo, pudiendo establecerse un programa progresivo de restablecimiento del revestimiento dañado.	–	–
16-35%IR	Los defectos se recomiendan para reparación a largo/mediano plazo según los criterios del operador de los ductos.	6	6
0-15%IR	Pequeñas falla de recubrimiento, no requieren reparación si el sistema CP esté funcionando correctamente.	19	17

Tabla 19 Clasificación de los defectos del recubrimiento mediante la técnica DCVG, Línea A y Línea B

Se puede apreciar que existe la mayoría de las indicaciones pertenecen al grupo de pequeñas fallas de recubrimiento (Categoría IV), diecinueve para Línea A y diecisiete para la Línea B para las que generalmente no requieren reparación si el CP esté funcionando correctamente y no existan fallas pequeñas de recubrimiento es sus proximidades.

En ambas tuberías se encontraron seis indicaciones que corresponden a la Categoría III, la cuales se recomienda reparación, pero no de caracteres inmediato. Estas fallas en el recubrimiento necesitan ser excavadas, inspeccionadas y reparadas, a mediano plazo, estableciendo una fecha para su atención.

Luego de este análisis el personal especializado debe establecer una fecha para el inicio de las excavaciones según los puntos seleccionados por las empresas que deben ser inspeccionados, luego que el tramo de tuberías se encuentre descubierta se deberá realizar una inspección visual para observar el estado de la tubería, pero para aumentar la confiabilidad si la tubería requiere reparación de revestimiento se desea implementar un nuevo actividades de inspección la cual mide la adherencia entre la pintura y la estructura, a esta herramienta se le llama “Holiday Detector”, el cual será descrito más adelante, tanto su función como la propuesta del plan.

Para la definición de frecuencias y tareas a realizar se considerarán las observaciones encontradas en el estudio descrito anteriormente, recomendaciones del personal que realizó la primera inspección y las Normas NACE RP 502-2010, NACE RP 0169-2013, NACE TM0109 “Aboveground Survey Techniques for the Evaluation of Underground Pipeline Coating Condition” y ASME B31.11 “Slurry Transportation Piping Systems”, los cuales serán descritos a continuación:

4.2.2 TÉCNICA "DCVG"

Inspección de recubrimiento anticorrosivo del gradiente de voltaje de corriente directa ("DCVG") Detección de fallas de cobertura en zonas enterradas [31].

El proceso de inspección DCVG se conforma de las siguientes etapas:

1) **Análisis de la ubicación y diseño de la cañería a inspeccionar;**

   Descripción Tarea

- Identificación de Caja de medición permanente, equipos rectificadores, válvulas, derivaciones, cruces de ruta, etc.

2) **Señalización de la traza de la cañería**
   Descripción Tarea

- Se debe proceder a señalizar la traza de la cañería con estacas ubicadas cada 30 m de distancia utilizando un detector de cañerías.

3) Intervención de los equipos rectificadores

   Descripción Tarea

- En esta etapa se realiza la instalación de los interruptores sincronizados por satélite (temporizadores) sobre los equipos rectificadores que afecten la zona a inspeccionar. Los ciclos de interrupción de los temporizadores conforman una relación determinada de encendido/apagado para evitar la despolarización significante de la cañería durante el transcurso de los estudios.

4) **Inspección DCVG**
   Descripción Tarea

- Se procede a inspeccionar la cañería utilizando el Medidor de Gradientes de Potencial DCVG. El empleo de dicho instrumento permite obtener la siguiente información:

✓ Localización del epicentro de defectos en el revestimiento.
✓ Determinación del tamaño, forma y severidad de cada defecto.

- ✓ Clasificación de cada defecto según el comportamiento de la corrosión, posibilitando la identificación de aquellos defectos que no poseen suficiente protección catódica y pueden derivar en la pérdida de metal.
- ✓ Identificación de zonas con presencia de interferencias eléctricas a través de aquellos defectos que están recibiendo o descargando corriente continua.
- ✓ La ubicación de cada defecto queda establecida mediante sus coordenadas geográficas, distancia progresiva parcial (desde CMP), progresiva total y profundidad. Además, se procede a colocar una estaca sobre el punto de ubicación de cada defecto para facilitar la identificación al momento de realizar la reparación.
- ✓ Al finalizar la jornada de trabajo de campo, se deberán exportar los datos al software destinado al análisis de la información

Frecuencia: Trianual

4.2.3 HOLIDAY DETECTOR

Esta técnica aún no se ha probado en las tuberías de EWS, se requiere implementar para inspeccionar la existencia de fallas en el revestimiento, si es que existen problemas de adherencia entre el revestimiento y la estructura luego de haber realizado la prueba "DCVG", la cual como fue descrita en el apartado 3.6.3, está encargada de analizar los posibles defectos de los revestimientos en tuberías subterráneas, y se divide en cuatro categorías según su nivel de criticidad (I, II, III y IV), el "Holiday Detector" estará encargado de inspeccionar las últimas dos categorías (I y II) las cuales corresponden a fallas más probables o daños mayores, y con esta herramienta se puede identificar la ubicación de zonas con falla que no fueron visibles por inspección visual, y que necesitan reparación inmediata para evitar inconvenientes futuros.

Figura 34 Holiday detector junto a una tubería de acero semi-descubierta, Fuente: Flick.

El plan de inspección, actividades y frecuencias asociadas a este análisis se realizaron a partir de las recomendaciones del personal especializado y según la periodicidad de la técnica "DCVG" que se determinó a partir de Normas, este se menciona a continuación:

1) **Inspección de fallas de recubrimiento Externo con "Holiday Detector"**

Descripción Tarea

- Excavación en los puntos críticos de la tubería, identificados por DCVG e indicados por el personal.
- Inspección visual del estado de recubrimiento
- Inspeccionar el estado de adherencia del recubrimiento mediante el detector de fallas "HOLIDAY"
- Si las condiciones del revestimiento son desfavorables, se deberá realizar un trabajo de mantenimiento correctivo:
  - ✓ Retirar recubrimiento dañado
  - ✓ Reparar recubrimiento
  - ✓ Inspeccionar nuevo recubrimiento

Frecuencia: Trianual

Resumen plan de mantenimiento revestimiento interno, ANEXO 1

4.2.4 SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Actualmente no hay plan de mantenimiento para el sistema de protección catódica, por lo que se deberán establecer los procedimientos necesarios para su mantenimiento e inspección ya que es considerado como uno de los métodos más eficaz para controlar la corrosión en estructuras enterradas, por lo que se debe asegurar que toda la tubería este protegida por este sistema como también que los elementos que la componen funcionen correctamente para que el sistema de distribución funcione correctamente. Las condiciones que afectan al sistema pueden ir variando en el tiempo por lo que se debe realizar monitoreo y mediciones eléctricas periódicamente.

Para asegurar que la tubería que está protegida correctamente se deberá medir el potencial a lo largo de la tubería y verificar si los valores obtenidos cumplen con los criterios sugeridos por NACE en la RP0169-2013 (descritos en el apartado 3.5.2), para este monitoreo se deberá medir los potenciales con re levantamientos "ON" (corriente de protección aplicada) y re levantamiento "ON-OFF" (corriente interrumpida, desconectando los equipos en forma sincronizada con temporizadores cíclicos). Esta inspección se realizó por primera vez en diciembre de 2017, en la cual se midieron los potenciales "ON" y "ON-OFF" utilizando la técnica "CIPS" (Close Interval Potencial Survey), la cual consiste en la medición continua de los potenciales de la cañería con respecto al electrodo de referencia, registrado por un operador que recorre el ducto extendiendo un alambre de fino calibre desde el poste de prueba más cercano [38].

Otro factor importante son el monitoreo y mantenimiento de los elementos de corriente impresa y aislaciones eléctricas, estos no se aplican actualmente, son de suma importancia para el funcionamiento del sistema, se debe realizar un programa de mantenimiento preventivo para reducir las fallas de servicio en el caso de la CI se deberá medir la tensión y corriente de salida del rectificador cada cierto tiempo como también realizar pruebas de cortocircuito, conexiones a tierra, entre otros para todos los elementos protectores del sistema. Para el monitoreo de aislaciones eléctricas se deberán realizar inspecciones en el lugar y también por evaluación de los datos de prueba de corrosión

El plan de mantenimiento e inspección necesario para el sistema de protección catódica serán formulado a partir de los registros de potenciales, recomendaciones del personal en terreno y según las normas establecidas con las cuales se podrá identificar la frecuencia del plan y los elementos fundamentales para la protección, las normas son las siguientes:

1. NACE Standard RP0169-2013 “Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems”, es utilizada para establecer las bases del correcto funcionamiento del sistema de protección catódica a través de criterios con respecto a la “polarización” necesaria para la tubería enterrada.

2. ASME B31.11 “Pipeline Transportation Systems for liquid Hydrocarbons and other liquids”, Es utilizada para establecer frecuencias de inspección y mantenimiento para los elementos del sistema de protección catódica.

3. ASME B31.4 “Slurry Transportation Piping Systems”, en conjunto a ASME 31.11 se utilizada para establecer frecuencias de inspección y mantenimiento para los elementos del sistema de protección catódica.

4. ASME B31.8 “Gas Transmission and Distribution Piping Systems”, Es utilizada para definir los requerimientos necesario para la integridad externa de la tubería y del sistema de la protección catódica.

Los cuales son descritos a continuación con su actividad, tarea y frecuencia respectiva:

1) Inspección de rectificadores y fuentes externas de corriente del Sistema de Protección Catódica

Descripción Tarea

- Mida y registre el voltaje del rectificador y la salida de corriente de cada rectificador, verificar el normal funcionamiento de los instrumentos (voltímetro y amperímetro) con que cuenta el equipo.
- Medir el potencial tubo/suelo en el punto de conexión del equipo a la tubería.
- Si se necesita alguna modificación en la regulación del equipo rectificador, se registra en las ordenes de trabajo.

Frecuencia: Mensual

2) Medición de Potenciales en todos los test point de las tuberías con el Sistema de Protección Catódica intervenido (ON)

Descripción Tarea

- Medir el potencial tubería-suelo de EWS con la corriente de protección catódica aplicada (ON).

Frecuencia: Mensual

3) **Medición de Potenciales en todos los test point de las tuberías con el Sistema de Protección Catódica intervenido (ON-OFF)**

Descripción Tarea

- Medir el potencial tubería-suelo de EWS con corriente de protección catódica interrumpida, por medio de interruptores sincronizados satelitalmente de forma que todos los equipos rectificadores mantengan la misma frecuencia (ON-OFF)

Frecuencia: Anual

4) **Medición del Perfil de Resistividades y pH del Terreno**

Descripción Tarea

- Medición de la resistividad del suelo por medio del instrumento de medición de cuatro puntas (electrodo) Wenner Array, de toda la traza cada 250 m.
- Medición del pH del suelo por medio de electrodo de antimonio, de toda la traza cada 250 m.

Frecuencia: cada 10 años

5) **Revisión cuesta a tierra de mitigación**

Descripción Tarea

Para este monitoreo se debe realizar una inspección de los electrodos de zinc (rejillas o mallas de control de gradiente de cinta de zinc), se deben seguir los siguientes pasos:

1. Verificar conexionado de las terminales.
2. Medir el potencial a circuito cerrado.
3. Desconectar puesta a tierra y medir el potencial de la malla o ánodo a circuito abierto.
4. Medir la resistencia de la malla o ánodo (con el circuito abierto).
5. Conectar Nuevamente

Frecuencia: Mensual

6) **Mantenimiento del rectificador y de los elementos protectores del sistema de corriente impresa.**

Descripción Tarea

1.-Para la mantención del Rectificador se deben seguir los siguientes pasos:

1.1 Limpieza Rectificador

1.2 Nivel de Aceite

1.3 Verificar el funcionamiento del rectificador: debe medir voltaje y salida de corriente.

2.-Elementos protectores

Se deben hacer pruebas que incluyan la verificación de cortocircuitos, conexiones a tierra, exactitud de los instrumentos, eficiencia y resistencia del circuito y sulfatación de contactos eléctricos. Los equipos para inspección son los siguientes:

2.1 Protectores de Sobretensión (OVP)

2.2 Electrodos de referencia permanente

2.3 Estaciones de prueba

2.4 Caja de conexiones

2.5 Aislamiento eléctrico

Frecuencia: Semestral

7) **Inspección y Mantenimiento de las camas anódicas de los equipos rectificadores de las tuberías y tanques con Sistema de Protección Catódica.**

Descripción Tarea

- Evaluar el Nivel de desgaste de los Ánodo de sacrificio (dispersor) de la protección catódica las tuberías de 42” (EWS A y EWS B) y de tanques. Medir la resistencia del dispersor y dimensionar el desgaste.

Frecuencia: Semestral

8) Mantenimiento de la caja de conexiones y aislamiento eléctrico

Descripción Tarea

- Verificar la estanquidad y la conectividad de las terminaciones del cable de corriente continua en todos los equipos del sistema de protección catódica.
- Limpiar la caja de conexiones.
- Verificar el estado de las juntas dieléctricas de las tuberías de 42”

Nota (1): **Inspección en el lugar y evaluación de los datos de pruebas de corrosión**

Frecuencia: Semestral

Resumen plan de mantenimiento revestimiento interno, ANEXO 3

4.2.5 MEDICIÓN DE ESPESOR UT

Este plan está incluido dentro de la actividad de mantenimiento de EWS, semestralmente se deben medir los espesores de las líneas de admisión y descarga del circuito externo de cada estación de bombas por la técnica UT (Ensayo no destructivo), aplicando la técnica de pulso eco (descrito en el apartado 3.4.2 para la medición de espesor puntual y la calibración del equipo, se debe identificar los puntos en los cuales se realiza la medición como en los tramos de tubería, cambios de sección y uniones soldadas en el circuito, por lo que existen distintos espesores y Diámetros, las cuales están identificadas con el detalle que a continuación se indica [39]:

1. Tuberías de 42”
2. Manifold en la admisión y descarga de 54”
3. Líneas de recirculación de 20”
4. Bypass de 36

Figura 35 Ubicación de zona de medición y fotografías Vista frontal lado Norte HPPS2, Fuente: MCM

A continuación, se identifican los pasos a seguir para la medición de espesores en los distintos puntos del sistema de tubería para las estaciones de bombas de EWS [40]:

Trabajo a Realizar

- El primer paso es realizar una apreciación general del estado de la protección anticorrosiva de la tubería para revisar si existe alguna falla de revestimiento en las zonas donde se va a medir, Posteriormente se deberán localizar los puntos, tramos, o zonas de riesgo a lo largo del tramo de la tubería para la inspección.

- Se procederá a realizar las actividades de calibración. El técnico contará con el auxilio de un pequeño bloque de calibración estándar. Las calibraciones que se deben realizar son las siguientes:

  - ✓ Calibración del cero (Haz longitudinal)

  - ✓ Calibración de velocidad

- El siguiente paso será comprobar si el componente a inspeccionar está en óptimas condiciones, Si al componente a inspeccionar se le ha realizado granallado (técnica de tratamiento superficial por impacto para limpieza de tubería), se deberán tomar las siguientes precauciones:

  I. Se comprobará que antes de la inspección la tubería o elemento a inspeccionar esté aterrizada con barra puesta tierra, de acuerdo al estándar operativo de MEL.

  II. Se deberá verificar que el componente esté libre de energía residual, la cual es obtenida después del granallado

  III. Si se comprueba que los puntos A o B no se cumplen, no se realizará la inspección y se esperarán 24 hrs para volver a comenzar todo el proceso.

- Para llevar a cabo la inspección, el técnico utilizará en pequeño aparato de inspección de UT, el cual se conecta a un transductor por medio de un cable. Se debe aplicar un acoplante (agua) sobre la superficie a inspeccionar antes de realizar la medición.

- Terminado el proceso de inspección se guarda el aparato de UT, se toman fotografías del área y se confecciona un Informe técnico.

NOTA: **Todas las condiciones de operación, como son el acabado superficial, la frecuencia del palpador, la calibración del sistema tipo de palpador y el acoplante empleado, deben ser constantes durante la calibración y la inspección.**

A continuación, se identifican las zonas que son inspeccionadas de manera en cada estación de bombeo, según el plan de inspección de EWS que tienen actualmente:

Descripción de Tarea

Medición de espesores por ultrasonido en las líneas de admisión y descarga, analizando los puntos en los cuales se producen cambios de sección y uniones soldadas en el circuito externo de las Estaciones de Bombas de EWS:

1) Estación de Bombas N°1, HPPS1:

- Línea Descarga 42” A.
- Línea Descarga 42” B.
- Línea Descarga 36” A.
- Línea Descarga 54” B.

2) Estación de Bombas N°2, HPPS2:

- Línea Descarga 36” A y B.
- Línea Admisión 54” A Y B.
- Línea Descarga 54” del TK.
- Línea Admisión y Descarga 42” A y B.
- Línea Recirculación 20” A y B.

3) Estación de Bombas N°3, HPPS3:

- Línea de Descarga desde TK de 54".
- Línea de Admisión A y B de 54".

4) Estación de Bombas N°4, HPPS4:

- Línea de Admisión A y B de 54”.
- Línea de Descarga A y B de 42”
- Línea de Descarga A y B de 36”.
- Línea de Descarga desde TK de 54”.

Frecuencia: Semestral

Nota 1: **Se recomienda mantener la ubicación de los puntos marcados en terreno, objeto obtener trazabilidad en las mediciones posteriores.**

Nota 2: **Para el resto de los tramos según la norma ASME B31.4-2016, el espesor mínimo es 80% del espesor nominal (diseño), por lo que, si el área inspeccionada indica que la corrosión general ha reducido el espesor de pared nominal de la tubería con una profundidad mayor al 20%, el tramo deberá ser remplazado o reparado.**

4.3 VÁLVULAS DE VENTEO

Para esta válvula solo existe un plan de monitoreo de las condiciones externas de la válvula, este será modificado ya que las válvulas de venteo requieren una inspección completa tanto interna como externa al igual que un plan de mantenimiento para el correcto funcionamiento del sistema, estas válvulas cumplen son un elemento muy importante para el paso continuo del fluido y liberaciones de altas presiones en los puntos más elevados de la tubería. Actualmente no existe un plan de mantención, el cual será establecido en base al análisis del tipo de válvula utilizado, se considerarán las recomendaciones del personal en terreno y de personal especialista en este tipo de mantenimiento. La conservación de integridad de esta válvula al igual que la disminución de la cantidad de aire transportada por las tuberías es recomendada por la Norma API 1160, "Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines" [43].

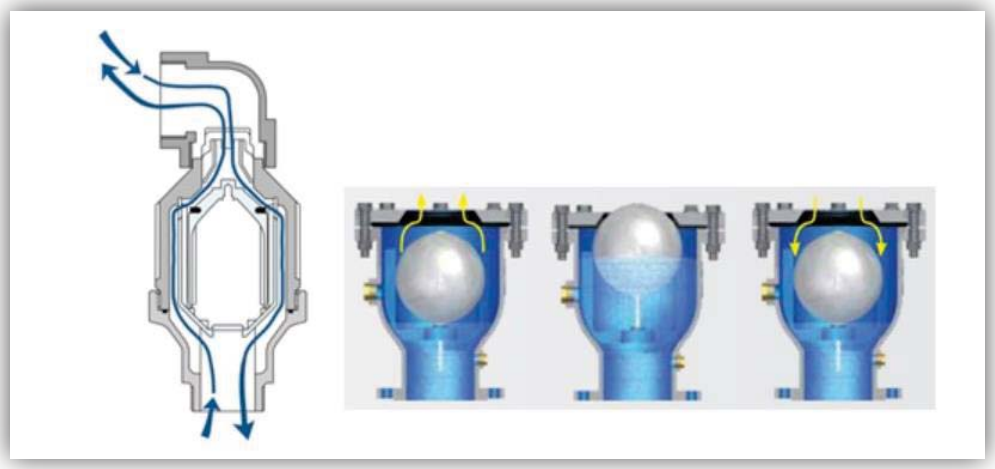

Figura 36 Funcionamiento de una ventosa de expulsión y admisión, Fuente: Iagua.

El plan de mantenimiento y la frecuencia establecida se hicieron a partir de recomendaciones del personal especializado en esta área, también se tomó en consideración las sugerencias del fabricante, las actividades de mantenimiento se definieron según el diseño de la válvula a

utilizar la cual es de efecto cinético, las cuales permiten la expulsión y admisión de aire (Figura 36), el plan y actividades asociadas se describe a continuación [22]:

1) **Mantenimiento de Válvulas de Venteo de los Acueducto 42" (EWS A Y EWS B)**
   Descripción Tarea

   Primero se deben cerrar las válvulas de corte de aguas bajo la ventosa, para luego realizar las siguientes limpiezas:

- Limpieza interior del Cuerpo Automático y Cinético:
  - ✓ Interior Cuerpo Válvula
  - ✓ Flotador
  - ✓ Sellos rodantes
  - ✓ Revisión O 'ring

- Limpieza Cuerpo Cinético:
  - ✓ Interior Cuerpo Válvula
  - ✓ Flotador
  - ✓ Sellos y Asiento
  - ✓ Revisión O 'ring

- Limpieza Exterior válvula de venteo:
  - ✓ Cuerpo Válvula
  - ✓ Cubierta Válvula

Frecuencia: Semestral.

3.4 MITIGACIÓN DESASTRES NATURALES

4.4.1 VULNERABILIDAD DE LLUVIA SEVERAS

Según el sector que se encuentra instalado EWS y además de ser una tubería enterrada, el desastre natural que más puede afectar a la integridad de la tubería son las lluvias severas por lo que desde el punto de vista de la planificación de emergencias y desastres es importante la variación de las lluvias en el tiempo o determinación de los períodos de mayor incidencia de lluvias y por consiguiente de mayores riesgos. Los patrones de lluvia,

combinados con otros factores como características de los suelos, condiciones topográficas y geológicas, áreas de la cuenca, determinan la cantidad de lluvia que formará un escurrimiento de corriente de agua.

La evaluación de la amenaza consiste en determinar las áreas de inundación y los cauces afectados con sus parámetros de caracterización como: tiempo de duración del fenómeno, escurrimiento y niveles máximos probables. Esta información se debe verter sobre mapas del área para elaborar el mapa de riesgos a inundaciones, que indicaran las estructuras propensas a ser afectadas, los posibles daños que el exceso de lluvia puede causar en las cañerías e instalaciones [41]:

1.- Erosionar los suelos y, por ende, desenterrar, desplazar e incluso llevarse, tramos de tuberías.

2.- Hacer subir el nivel del agua subterránea y, debido al empuje, hacer flotar tuberías y cámaras,
sacándolas de sus ubicaciones originales. Esto puede producir, además, rupturas diversas en las instalaciones.

3.-Arrastre y pérdida total de tramos de tubería.

Evaluación de Vulnerabilidad Instalaciones MEL por Lluvias Severas, II Región, Chile.

En septiembre de 2019 se realizó un análisis de vulnerabilidad por lluvias severas, para establecer los puntos o zonas del trazado de ambas líneas que podrían ser afectadas estructuralmente por este fenómeno natural. La intensidad o grado de peligro está asociada a las características observadas en terreno y el grado de exposición de la infraestructura, tubería o estación [42].

Determinación de grado de criticidad

<u>Intensidad de los procesos naturales</u>

Fuerte: zonas con evidencia de procesos erosivos (flujos de detritos, socavación y zonas de acumulación o aporte de sedimentos).

Mediana: zonas con evidencia de procesos tipo flujo o crecidas, sin evidencia de erosión.

Débil: zonas ubicadas en sectores potenciales de ser afectados por flujos y/o crecidas, pero sin identificación de eventos recientes.

<u>Exposición de la infraestructura</u>

A la vista: infraestructura actualmente expuesta en superficie o enterradas a profundidad menor a 30 cm

Semi-enterrada: infraestructura enterrada a la profundidad entre 30 cm y 1 m
Enterrada: infraestructura enterrada a más de 1 m

En la siguiente tabla se puede observar una matriz para determinar el grado de criticidad de las zonas recorridas para la identificación del impacto del fenómeno:

Intensidad de los procesos	Exposición de la infraestructura		
	A la vista	Semi enterrada	Enterrada
Fuerte	Muy Alto	Alto	Medio
Mediana	Alto	Medio	Bajo
Débil	Medio	Bajo	Bajo

Figura 37 Tabla matriz del grado de criticidad lluvias severas, Fuente: GHD

Para la identificación de zonas críticas, se tuvo que hacer un recorrido en el terreno desde el puerto coloso hasta MEL, donde se realizó un levantamiento topográfico y de mecánica de suelo con los que se pudieron realizar estudios hidrológicos y geológicos, para una mayor visualización de los problemas que puede causar este fenómeno climático se realizó una modelación hidráulica con la cual se puede simular la cantidad y velocidad del flujo según la geometría del sector, de esta forma se proponen soluciones para diseñar obras que mitiguen la posibilidad de daños al sistema de tuberías.
De los puntos que se visitaron en terreno, se determinaron tres puntos a estudiar de criticidad alta y muy alta, los cuales corresponden a los siguientes:

1. Kilómetro 120 oriente ruta 5
2. Kilómetro 49 al oriente ruta 5
3. Kilómetro 13 al poniente ruta 5

A continuación, se describirán los problemas y soluciones propuestas del estudio de los puntos críticos de EWS:

<u>Km 120 al oriente Ruta 5</u>

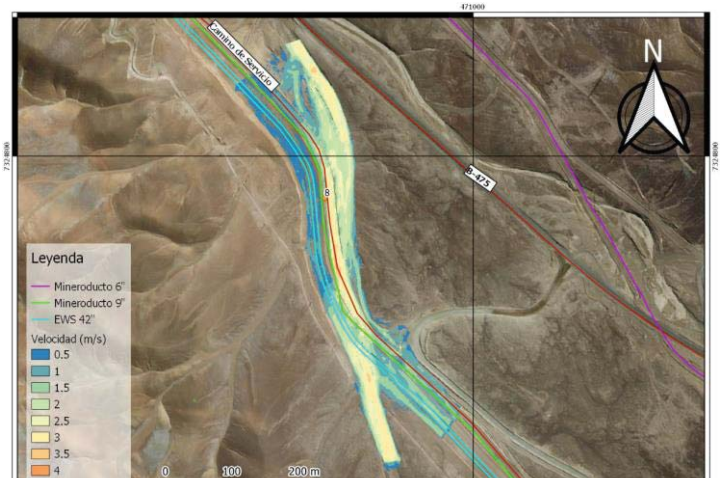

Figura 38 Km 120 al oriente R5, Fuente: GHD.

Problema: Mineroducto 9” y Acueducto EWS cruzan quebrada al sur de la ruta B-475.
Existe un enroscado de protección para el acueducto: en buen estado lateral, fondo destruido y desordenado. La obra no está encauzada, parte del flujo escurriría por los costados, su matriz de criticidad es el siguiente:

1. Intensidad procesos naturales: Fuerte
2. Exposición infraestructura: Semi enterrada
3. Grado de Criticidad: Alto

Solución: Enrocado y protección estructural en cruce de tuberías, y conducción del flujo hacia cauce original de la quebrada adaptando el camino (badén), por el noreste de las tuberías.

<u>Km 49 al oriente Ruta 5</u>

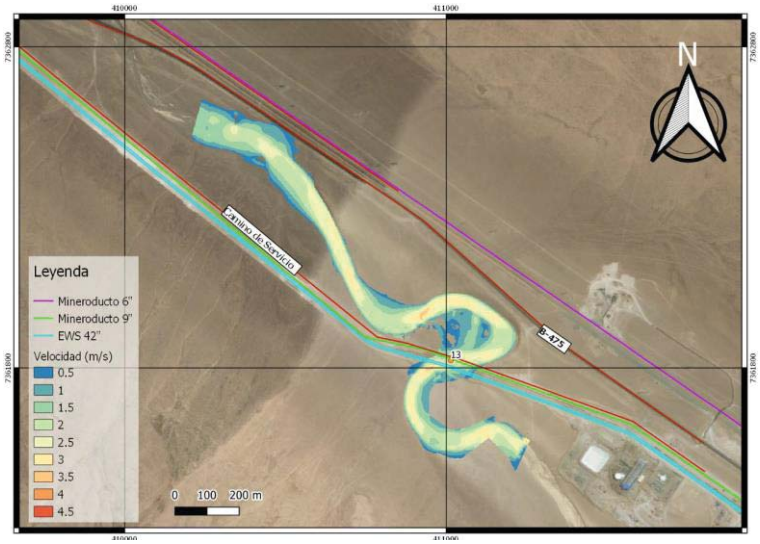

Figura 39 Km 49 oriente Ruta 5, Fuente: GHD.

Problema: Mineroducto 9” y acueducto EWS cruzan quebrada al sur de la ruta B-475.
Existe un enroscado de protección en acueducto, el cual está parcialmente destruido y desordenado, su matriz de criticidad es el siguiente:

1. Intensidad procesos naturales: Fuerte
2. Exposición infraestructura: Semi enterrada
3. Grado de criticidad: Alto

Solución: Instalación de enrocado y solución estructural en el cruce de Mineroducto 9” y EWS.

Km 13 al poniente R5

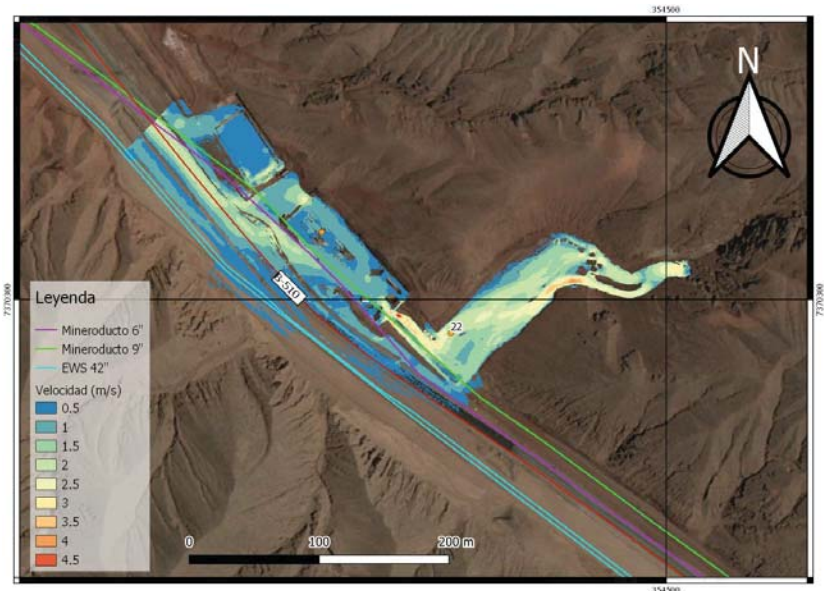

Figura 40 Km 13 al poniente Ruta 5, Fuente: GHD.

Problema: En este sector el aporte detrítico es importante, presentando tamaños predominantes de arena y grava fina a media. Esto se observa en el sector del abanico aluvial, corresponde a una zona de depósito de flujos. Si bien la zona ha presentado crecidas con aporte principalmente de barro, es potencial de presentar flujos de tipo más detríticos.

1. Intensidad procesos naturales: Fuerte.
2. Exposición infraestructura: Semi enterrada.
3. Grado de criticidad: Alta.

Solución: Prolongar terraplén por el contorno de las estructuras vulnerables. Proteger el cruce de los minero ductos con enrocado.

Estas áreas vulnerables que requiere acciones correctivas tendientes a reasignar recursos, para que las medidas de mitigación y los planes de emergencia sean viables, estas soluciones anteriormente mencionada para los tres puntos más críticos de EWS están pensadas con una longevidad de 100 años, por lo que no va a requerir una inspección frecuente.

5. RECOMENDACIONES

1) Se recomienda instalar cupones de corrosión en las Estaciones de bombeo N° 2 y 3, ya que en Estación N°1 existen al igual que en la Estación N°4 pero en esta última el sensor no ha sido habilitado aún, este tipo de analizadores son muy necesarios debido a que entregan un valor real, la medida es sin suposiciones teóricas o aproximaciones, además los cupones no requieren instrumentación sofisticada para obtener resultados, por el contrario de las Probetas LPR (las cuales se encuentran instaladas en todas las estaciones) deben ser mantenidas e inspeccionadas de forma constante debido a que si cualquier elemento eléctrico del sistema falla estarán entregando información errada a la sala de controles, además el método no es tan exacto como para el caso de los cupones ya que entregan una aproximación de las curvas de polarización (rectas en un pequeño entorno del potencial de corrosión y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión), por lo que la habilitación del cupón en la Estación N°4 y la instalación de los dos restantes entregarán una información directa de la pérdida de metal, el cual provee datos que brindan información para hacer predicciones confiables en las aplicaciones de campo, le permite monitorear la corrosividad en función del tiempo de manera más asertiva.

2) Actualmente se realizan mediciones de espesor con UT (*ultrasonido)* en la admisión y descarga de las estaciones de bombeo descrito en el apartado 3.4.2, se recomienda realizar mediciones en los puntos críticos de la tubería, ya sea para tramos que estén enterrados o superficial, considerando el potencial de desgaste del espesor ante cualquier efecto (incluido la corrosión) y la consecuencia de falla de la tubería a inspeccionar, para así evaluar los puntos con mayor probabilidad de erosión y falla de revestimiento, como en cambio de secciones, reducciones en la tubería, puntos de elevación, etc.

   Cuando se trate de puntos enterrados se deberán realizar las excavaciones correspondientes y limpiar la zona próxima a la tubería para efectuar la medición, una vez efectuada, se debe restituir el recubrimiento en caso de que haya sido retirado, rellenar y dejar en las mismas condiciones el área donde se efectuó.

   Puntos sugeridos para realizar esta tarea:

a. En las tuberías que conectan con las válvulas de venteo, cuando se realice mantenimiento de las válvulas de venteo se podría registrar la medición de espesor de dichos puntos para tener información del comportamiento interno entre la Estación N° 1 y 2 y también entre la Estación N° 3 y 4.

b. Por otra parte, se puede medir el espesor en los puntos críticos indicados cuando se aplique la técnica DCVG ("*Direct Current Voltage Gradient*") de inspección de revestimiento externo explicada en el apartado 3.4.4, el cual es un indicador de puntos de falla del revestimiento y según su nivel de criticidad el personal de mantenimiento escoge los puntos críticos para inspeccionar, se realizan excavaciones y además se realiza una inspección visual, cuando esto ocurre se podría verificar también el comportamiento interno de la tubería con la medición de espesor, de esta forma se podrá incluir puntos que no son inspeccionados actualmente y críticos para el sistema

c. En los tramos de la tubería donde no existan válvulas de venteo, ya que esta falta puede inducir a mayores pérdidas por limitación parcial del agua debido a las bolsas de aire formada en esos puntos.

3) Se recomienda evaluar la instalación de válvulas de venteo en los puntos más elevados entre las Estaciones N°2 y Estaciones N°3 ya que actualmente no existen, y son muy importantes para el funcionamiento normal de una instalación ya que las bolsas de aire que viajan dentro de las tuberías se acumulan en las zonas más elevadas y a lo largo de accesorios y derivaciones, por lo que el aire queda atrapado aumentante su volumen y a la ves provocando estrangulamiento al paso del agua, aumentando las pérdidas de eficiencia del sistema, y además alteraciones de presión, por lo que las bolsas de aire deben ser liberadas a través de las válvulas venteo, además por el contrario si la tubería necesite drenaje estás permiten la entrada de aire en el momento del vaciado para que no ocurran supresiones que provoquen que succión y vacío dentro de la misma, pudiendo dañar la estructura física de la tubería y, en casos extremos, provocar su rotura por aplastamiento.

Como se ha mencionado anteriormente las tuberías tienen un largo aproximadamente de 178 km y existe un tramo que no tiene válvulas de venteo (sin consideran las existentes en las estaciones), este se encuentra entre los kilómetros 50 al 137, esta falta se considera peligroso para la integridad de la tubería y a la vez provoca un aumento de pérdidas de carga a lo largo de este tramo. Se recomienda

realizar un análisis de los puntos más críticos para evaluar la implementación de válvulas de venteo entre estos puntos, los cuales podrán aumentar la eficiencia del sistema y además minimizarán la probabilidad de falla del ducto.

4) Entre las estaciones N°2 y N°3 se recomienda evaluar la instalación de válvulas de drenaje, debido a que estas últimas son necesarias en el caso de que la tubería requiera reparación o cambio de tramo, se requiere de estas válvulas de drenaje para que el agua pueda ser drenada entre estaciones. Se recomienda la instalación de por lo menos dos válvulas de drenaje para efecto de seguridad y además en el caso de reparación no requerirá realizar un vaciado completo del tramo para su mantención.

5) Independiente de las necesidades de enviar algún tipo de herramienta de limpieza a través de la tubería debido a: pérdidas de carga, cantidad de sólidos en los filtros de bombas y corrosión se debe realizar el proceso de estandarización de todas las estaciones de EWS con la instalación de lanzadores y receptores de Pigs, se debe desarrollar la ingeniería e instalación de estos, ya que aún se encuentra en procesos de construcción y gestión.
   Esto responde a un estándar básico de la industria a nivel mundial y una técnica recomendada por los Normas dedicadas a la integridad de ductos, para mitigar la corrosión interna de la tubería

6) Las tuberías para agua desalinizada EWS fueron diseñadas bajo la Norma ASME B31.4, con la cual se consideró un sobre espesor por corrosión en las estaciones de 0,205 mm/año, o equivalentemente 5,74 mm para una vida útil del Proyecto de 28 años, el sobre- espesor seleccionado fue de 6 mm. Entonces, se recomienda verificar los registros de las mediciones de espesores lo cuales no deben superar los 0,205 por año, si esto sucede la vida útil disminuye, en el caso de que sea así se debe tomar acción inmediata verificar la causa y realizar un plan de acción para mitigar este incremento.

6. CONCLUSIONES

Se logró estructurar el sistema de gestión de las tuberías de EWS, con actividades y frecuencias establecidas para asegurar la integridad física, tanto de forma interna como externa, lo cuales ayudarán a reducir los riegos de deterioro de las condiciones físicas de la tubería, logrando la estabilidad y eficiencia en el sistema de impulsión. Se establecieron procedimientos a partir de estándares internacionales de integridad de ductos (API 1160 y ASME 31.4), información recopilada de informes de controles ejecutados en EWS y personal especializado.

Se determinaron los controles necesarios y periodicidad de los planes de mantención de las tuberías para garantizar el transporte de agua desalinizada en forma óptima para los años que fue diseñado.

En épocas anteriores los controles se ejecutan por iniciativa del personal de mantenimiento sin existir un procedimiento de integridad de ducto que indique de forma clara los controles y frecuencias requeridos

Las pérdidas de carga fueron evaluadas en todos los tramos de las tuberías de EWS, determinando la pérdida de eficiencia energética y costos operativos asociados a las variaciones generadas los últimos tres años. Pudiendo identificar los tramos con mayores probabilidades de falla debido al necesario incremento de presión en la zona de impulsión para vencer el aumento de pérdida de carga para ese tramo además este fenómeno causa costo adicional por mayor consumo de energía de las bombas debido a la elevación de presión de salida.

En función a las evaluaciones actuales no es necesario realizar una limpieza interna, esto fue determinado a partir de analizar los datos de pérdidas de carga en base a las variaciones económicas según la energía consumida por el sistema de impulsión, con los cuales se pudo establecer que en el corto y mediano plazo no es recomendable realizar la actividad de limpieza interna con herramientas “PIGs”

Los resultados obtenidos de la evaluación hidráulica realizada son despreciables, la variación es menor al 5% con respecto al año 2018, los datos correspondían a tan solo un año de funcionamiento.

Sin embargo, es necesario mantener integrado los procedimiento e instalaciones de limpieza para previo uso al momento de requerirse, se debe habilitar el área para la instalación de lanzadores y receptores de “Pig” en todas las estaciones, para lo cual toma en cuenta las etapas de construcción, Puesta en servicio, operación, término de servicio. Esto responde a un estándar básico de la industria de las tuberías a nivel mundial como mantenimiento preventivo en las líneas.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Bibloteca del Congreso Nacional de Chile, B. (2019). *"Mega sequia actualidad territorial"*

[2] BHP, M. E. (2020). *"Balance de agua mensual, FF08 FY20".*

[3] Minera Escondida, L. (s.f.). *Manual de operación para sistemas de transporte de agua , Escondida Water Supply Project (EWS).*

[4] Research, C. f. (2019). *"La megasequía 2010-2019: Una lección para el futuro".*

[5] País Circular, I. R. (2018). *"Desalación de agua de mar en Chile: ¿Qué tan lejos puede expandirse su uso?".*

[6] es, N. t. (2020). *"Es la desalación futuro del agua".*

[7] Concejo Políticas de Infraestructura, C. (2019). *"Descargas de agua más caliente y más salada al mar, las principales críticas a desaladoras".*

[8] Minería Chilena, M. (2018). *"Escondida inauguró la mayor desaladora de Sudamérica".*

[9] BHP, M.E. (2019). *Taller Performance, Oportunidades y Amenazas, "Equipo Aguas y Relaves".*

[10] RP0775, NACE. (s.f.). *"Preparación, Instalación, Análisis e Interpretación de los Cupones de Corrosión en Operaciones en Campos Petroleros".*

[11] Supply, Y. (2016). "Fundamentos de cupones de corrosión".

[12] Servicios, S. (s.f.). *Monitoreo por Resistencia de Polarización Lineal.* Venezuela.

[13] Emerson, P. M. (2019). *"Roxar Corrosion Monitoring".*

[14] EWS, M. E. (2016). *SWRO Plant Operations & Maintenance Manual.*

[15] LIEMUN, U. C. (2019). *"Análisis de Precipitación de Sedimentos en filtros de bombas de impulsión, EWS".*

[16] BHP, M.E. (2017). *"Manual de Gestión Integral, Planta Desaladora MEL".*

[17] Technology & Engineering Services for Radical Advancement, T. (2017). *"Video-Inspeccióon Acueducto MEL, Estación de bombas N°2".* Antofagasta.

[18] ASISCORP, S. (2017). "Inspección del revestimiento interno de cañería línea B del poryecto EWS".

[19] Bustos, J. (2017). "Análisis de la gestión eficiente de planta de suministro de agua fresca en faena minera de altura".

[20] BHP, M.E. (2019). *Estrategia de Inspección Interna de Tubería EWS.*

[21] Ruiz, M. C. (2007). "Análisis comparatico de evaluación de defectos en ductos etre estudios realizados con equipos instrumentados inteligentes de segunda y tercera generación".

[22] Bermad Fluiod Solutions, D. i. (s.f.). Installation, Operation and Maintenance, Manual for Air Valve D-100.

[23] Iagua. (2017). "El aire en las tuberías, un problema que a veces es parte de la solución".

[24] Veatch, B. &. (2019). Functional Design Specification, wc leak detection systems, EWS Expansion Project.

[25] Gas natural del Perú, C. (2008). Manual de operación y mantenimiento, parte 4, "Control de Corrosión".

[26] Ojeda, V. (2016). "Avances en la medida de la protección catódica de estructuras metálicas enterradas mediante métodos de desconexión cíclica".

[27] NACE SP0169, S. P. (2013). "Control of External Corrosion on Undergrounf of Sumerged Metallic Piping Systems".

[28] Sánchez, P. M. (2015). "Detección de fallas superficiales e internas en tuberías de alta presión para motores estacionarios por el método de ultrasonido".

[29] Distrital, U. (2016). Guía para la calibración de ultrasonido para la medición de espesores bajo el método de Pulso-Eco.

[30] Sucursal, E. E. (2017). "Medición de espesoresen tuberías y tanques/ Thickness meansurement in pipes and tanks".

[31] Protan. (2007). Auditoreia de sistemas de protección catódica y estado de conservación de revestimientos anticorrosivos en gasoductos y oleoductos (Inspecciones CIPS-DCVG).

[32] Elcometer. (2020). "Detector de fallas (Holiday) de CC pulsante Elcomenter 280.

[33] United. (2020). Sistema de tuberías LTDA

[34] Castillo, J. Y. (2011). Análisis de la integridad mecánica de un tramo de oleoducto afectado por un fenómeno geodinámico.

[35] Wikipedia. (2019). "Fenomeno Natural".

[36] Villareal, U. N. (2017). "Procedimiento de evaluación de tramos en riesgo de los ductos de hidrocarburo".

[37] Tenología Total, I. e. (2010). Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology (ECDA), NACE SP 0502.

[38] Morken, S.I. (2017). "Informe revisión sistema de protección catódica".

[39] Rimoldi, C. (s.f.). "Ensayo no destructivo por método de ultrasonido".

[40] MCM. (2019). Medición de espesores estación de bombas N°1-4 EWS, tuberías de admisión, descarga y recirculación.

[41] Salud, O. P. (1998). "Mitigación de desastres naturales en sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario", Guía paara el análisis de vulnearabilidad.

[42]GHD. (2019). Análisis Hidráulico y Geológico, "Evaluación de Vulnerabilidad Instalaciones MEL por lluvias Severas, II Región, Chile".

[43] API 1160. (2019). “Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines”.

[44] ASME B31.11. (1989). "Slurry Transportation Piping Systems".

[45] ASME B31.4. (2016). "Pipeline Transportation Systems fot Liquids and Slurries".

[46] ASME B31.8. (1995). "Gas Transmission and Dustribbution Piping Systems".

[47] NACE TM0109. (2009). "Aboveground Survey Techniques for the Evaluation of Underground Pipeline Coating Condition".

[48] Frank M, W. (2008). *Mecánica de fluidos.* (McGraw-Hill, Ed.)

[49]Reyes, O. R. (2019). "La confiabilidad e integridad mecánica en sistemas de tuberías enterradas, de acero al carbono".

[50] Tixi, G. (2013). "Análisis de integridad física del polieducto libertad-manta de petrocomercial mediante el envío de la herramienta chancho inteligente".

[51] Rayos X, Laboratorio de Difracción. (n.d.).

[52] Salud, I. N. (2017). *"Ventajas y Desventajas del análisis por ICP – MS de metales pesados en muestras biológicas".*

[53] Wikipedia. (2020). *ICP-MS.*

[54] NACE, International the corrosion society. (2004). *Curso de Corrosión.*

[55] Suez. (2017). *Control de Corrosión Planta EWS.*

[56] Agustín, U. N. (2016). *"Recubrimientos en filtros percoladores y su aplicación como inhibidores de corrosión".* Perú.

7. ANEXOS

7.1 ANEXO 1

N°	Actividad	Subactividad	Descripción Tarea	Frecuencia
1	CIPS	Medición Espesores en todos los Test-point	Medir el potencial tubería-suelo con corriente de protección catódica interrumpida, encendido y apagado (ON-OFF)	Trianual
2	DCVG	Medir los gradientes de potencial en la estructura	Detección de fallas de cobertura en zonas enterradas	Trianual
3	"Holiday Detector"	Inspección fallas de recubrimiento Externo	Medir adherencia entre la tubería y recubrimiento externo	Trianual
4	Medición Espesores	Medición espesor pared de tubería	Medición espesor por ultrasonido en la admisión y descarga de las estaciones	Semestral

Tabla 20 Plan de mantenimiento revestimiento externo

7.2 ANEXO 2

N°	Actividad	Subactividad	Descripción Tarea	Frecuencia
1	Inspección Sensores de corrosión	1.Inspección visual externa del estado de los sensores 2.Simulación de la señal de salida a 4-20 mA .	a. Verificación si hay desperfecto de cableado b. Evaluación del Sistema de Montaje c. Inspección visual de la señal de salida de 4-20 mA	Semestral
2	Mantenimiento Sensores de Corrosión	1.Extracción de los sensores de corrosión, verificar el estado componentes	a. Reinstalación o reemplazo, según corresponda.	Anual
3	Limpieza filtros cónicos de succión	1.Limpieza en el filtro cónico de la bomba afectada	a. Análisis de precipitación de sedimentos del filtro cónico de la bomba	Por condición, si : Diferencial de presión de succión de bomba≥ 76 kpa
4	Mantenimiento Válvulas de venteo	1.Cerrar las válvulas de corte de aguas bajo la válvula 2.Limpieza interior del Cuerpo Automático y Cinético 3.Limpieza Cuerpo Cinético 4.Limpieza Exterior válvula de venteo	a. Limpieza interior: interior cuerpo válvula, flotador, sellos rodantes y revisión O 'ring b. Limpieza exterior: cuerpo Válvula y cubierta válvula	Semestral
5	Inspección con robot-video	1.Inspección condiciones internas con robot inteligente	a. Bloqueo válvula de interconexión b. Bloqueo de válvulas a la entrada del Estanque c. Drenaje de agua con el Manifold de descarga a la llegada de cada estación e. Retirar flange ciego, descarga estación f. Introducir Robot-video	Cuatrienal
6	Análisis de pérdida de carga	1.Análizar pérdidas de carga de los tramos de las tuberías	a. Obtener curva del sistema de impulsión de las estaciones b. Evaluar variación de altura de impulsión	Semestral
7	Limpieza Herramienta "Pig"	1.Limpieza interna tramos de las tuberías	a. Introducir "Pig" de limpieza, sector lanzamiento b. Recibir "Pig", sector de recepción	Por condición, si : Costo aumento de potencia ≥ 500.000 USD

Tabla 21 Plan de mantenimiento revestimiento interno

7.3 ANEXO 3

N°	Actividad	Describir Tarea	Frecuencia
1	Inspeccionar Rectificadores y fuentes externas de corriente del Sistema de Protección Catódica	a. Mida y registre el voltaje y la salida de corriente del rectificador b. Medir el potencial tubo/suelo en el punto de conexión del equipo a la tubería.	Mensual
2	Mantenimiento Rectificador y elementos protectores de sistema de corriente impresa	1.Mantenimiento Rectificador: a. Limpieza Rectificador b. Nivel de Aceite c. Verificar el funcionamiento del rectificador(Mida voltaje y salida de corriente) 2.Elementos protectores Equipos para inspección: protectores de Sobretensión electrodos de referencia permanente, estaciones de prueba, caja de conexiones y aislamiento eléctrico	Semestral
3	Medición de Potenciales en todos los Test Point del sistema de protección catódica, encedido (ON)	1.-Medir el potencial tubería-suelo de EWS con la corriente de protección catódica aplicada(ON).	Mensual
4	Medición de Potenciales en todos los Test Point del sistema de protección catódica, encedido-apagado (ON-OFF)	1.-Medir el potencial tubería-suelo con corriente de protección catódica interrumpida, encendido y apagado(ON-OFF)	Anual
5	Inspección y Mantenimiento Camas anódicas de los equipos rectificadores	1.-Inspección del Nivel de desgaste de los Ánodo de sacrificio(dispersor) de la protección catódica, dimensionar el desgaste.	Semestral
7	Mantenimiento Caja de conexiones y Aislamiento eléctrico	1.-Verificar la estanquidad y la conectividad de las terminaciones del cable de corriente continua. 2.-Limpiar caja de conexiones. 3.-Verificar el estado de las Juntas dieléctricas	Semestral
8	Medición Perfil de Resistividades Y pH del terreno	1.-Medicion resistividad del suelo, de toda la traza cada 250 m. 2.-Medición del pH del suelo por medio de electrodo de antimonio, de toda la traza cada 250 m.	Década
9	Revisión Cuesta a Tierra de Mitigación	1.-Inspección de los electrodos de zinc (rejillas o mallas de control de gradiente de cinta de zinc), se debe: a. Verificar conexionado de las terminales. b. Medir el potencial a circuito cerrado. c. Desconectar puesta a tierra y medir el potencial de la malla o ánodo a circuito abierto. d. Medir la resistencia de la malla o ánodo (con el circuito abierto). f. Conectar Nuevamente	Mensual

Tabla 22 Plan de mantenimiento sistema de protección catódica