

**Diseño de un plan de mantenimiento para una planta de tratamiento de lixiviados
aplicando la metodología del RCM**

Edwin Alberto Baena Velásquez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2022

**Diseño de un plan de mantenimiento para una planta de tratamiento de lixiviados
aplicando la metodología del RCM**

Edwin Alberto Baena Velásquez

Monografía de grado presentado como requisito para optar por el título de especialista en
gerencia de mantenimiento

Director:

Daniel Ortiz Plata

Magister en Gerencia de Mantenimiento

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2022

Dedicatoria y agradecimientos

A Dios por darme la fuerza y esperanza todos los días de mi vida

A mi padre Juan y a mi madre Luz por su amor, apoyo y paciencia

A mis hermanos Jhonatan, Anyela y Faber por su compañía

A mi sobrino Juan Sebastián por ser mi motivo de inspiración

Muchas gracias a la empresa C-deg S.A.S. E.S.P por brindarme la confianza y el apoyo para realizar esta especialización. A todos mis jefes y compañeros de trabajo agradezco por el apoyo y sus aportes realizados para la culminación de este documento.

Gracias a la Universidad Industrial de Santander, a mis compañeros de especialización, profesores y personal administrativo por todo lo que aprendí de ellos y por haber hecho parte de esta etapa tan importante de mi vida. Especial agradecimiento al ingeniero Daniel Ortiz Plata por su tiempo, dedicación, apoyo y sugerencias para la culminación de esta monografía.

Tabla de contenido

<i>Introducción</i>	10
1. Planteamiento del problema	11
2. Objetivos	12
2.1. Objetivos Generales:	12
2.2. Objetivos Específicos:	12
3. Justificación	13
4. Marco teórico y estado del arte	14
4.1. Estado del arte	14
4.2. Marco conceptual	14
4.2.1. Tratamientos de lixiviados mediante ósmosis inversa	14
4.2.2. Análisis de criticidad	15
4.2.3. Mantenimiento y RCM	16
5. Planta de tratamiento de lixiviados y aguas residuales C-deg	18
5.1. Descripción del proceso	18
5.2. Sistemas y componentes de la planta de tratamiento	22
5.2.1. Sistema de captación de lixiviado	22
5.2.2. Sistema de pretratamiento del lixiviado	24
5.2.3. Sistema de filtración de ósmosis inversa fase 1	28
5.2.4. Sistema de filtración de ósmosis inversa fase 2	31
5.2.5. Sistema Cleaning in place (CIP)	34
5.2.6. Sistema de acondicionamiento de aire	36
5.2.7. Sistema de control y potencia	38
5.2.8. Equipo de bombeo auxiliar	39
6. Metodología	40
7. Resultados	42
7.1. Sistemas y equipos de la planta de tratamiento	42
7.2. Análisis de criticidad	43
7.3. Equipos y sistemas para la aplicación de la metodología RCM	48
7.4. Características técnicas y condiciones operativas y ambientales	49
7.4.1. Bomba sumergible	49
7.4.2. Bomba de alta presión	49
7.4.3. Bomba de pre-presión	50
7.4.4. Bomba de segunda fase	51

7.4.5.	Bomba dosificadora de ácido de salida _____	51
7.5.	Aplicación del modelo de RCM _____	52
7.5.1.	Análisis RCM bomba de sumergible _____	53
7.5.2.	Análisis RCM bomba de alta presión _____	55
7.5.3.	Análisis RCM bomba de pre-presión _____	58
7.5.4.	Análisis RCM bomba de segunda fase _____	60
7.5.5.	Análisis RCM bomba dosificadora ácido de salida _____	62
8.	<i>Plan de mantenimiento general</i> _____	65
9.	<i>Stock de repuestos y rediseños</i> _____	72
10.	<i>Conclusiones</i> _____	74
11.	<i>Recomendaciones</i> _____	74
	<i>Referencias bibliográficas</i> _____	75

Lista de figuras

Figura 1.	Esquema operacional planta de tratamiento _____	20
Figura 2.	Exterior planta de tratamiento de lixiviados _____	21
Figura 3.	Interior planta de tratamiento de lixiviados _____	21
Figura 4.	Tanque se lixiviado, filtro de entrada, medidor de flujo y válvula de entrada _____	23
Figura 5.	Bomba sumergible multietapas _____	24
Figura 6.	Extractor de gases del tanque de lixiviados _____	24
Figura 7.	Bomba de pre-presión del sistema de pretratamiento _____	26
Figura 8.	Filtros de grava del sistema de pretratamiento _____	27
Figura 9.	Equipos housing del sistema de pretratamiento _____	27
Figura 10.	Bomba dosificadora de anti-incrustante del sistema de pretratamiento _____	27
Figura 11.	Bomba dosificadora de ácido de entrada _____	28
Figura 12.	Bomba de alta presión _____	30
Figura 13.	Sistema de bloques de membrana fase 1 _____	30
Figura 14.	Sistema de bombas de recirculación _____	31
Figura 15.	Válvula reguladora de rechazo fase 1 _____	31
Figura 16.	Bomba de segunda fase _____	33
Figura 17.	Sistema de bloques de segunda fase _____	33
Figura 18.	Válvula reguladora de rechazo de segunda fase _____	34
Figura 19.	Bomba dosificadora de ácido de salida _____	34
Figura 20.	Tanque de almacenamiento del sistema CIP _____	35
Figura 21.	Extractor de la sala de máquinas _____	37
Figura 22.	Extractor gabinete eléctrico de la sala de control _____	37
Figura 23.	Unidad interior sistema de aire acondicionado sala de máquinas _____	37
Figura 24.	Gabinete eléctrico sala de máquinas _____	38
Figura 25.	Bomba de drenaje sala de máquinas _____	39
Figura 26.	Bomba centrífuga externa _____	40
Figura 27.	Bomba de tambor para sustancias ácidas y alcalinas _____	40
Figura 28.	Matriz de valoración de riesgos _____	46
Figura 29.	Distribución de la criticidad de los equipos y sistema de la planta de tratamiento _____	48
Figura 30.	Accesorio antirremolino para tanque de permeado del CIP _____	73
Figura 31.	Reubicación de la bomba dosificadora en cabina _____	73

Lista de tablas

<i>Tabla 1</i>	<i>Componentes del sistema de captación de lixiviado</i>	23
<i>Tabla 2</i>	<i>Componentes del sistema de pretratamiento</i>	25
<i>Tabla 3</i>	<i>Componentes del sistema de filtración de ósmosis inversa fase 1</i>	29
<i>Tabla 4</i>	<i>Sistema de filtración de ósmosis inversa fase 2</i>	32
<i>Tabla 5</i>	<i>Componentes del sistema Cleaning in place</i>	35
<i>Tabla 6</i>	<i>Componentes del sistema de acondicionamiento de aire</i>	36
<i>Tabla 7</i>	<i>Componentes del sistema de control y potencia</i>	38
<i>Tabla 8</i>	<i>Componentes del sistema de bombeo auxiliar</i>	39
<i>Tabla 9</i>	<i>Lista de equipos y sistemas de la planta de tratamiento</i>	42
<i>Tabla 10</i>	<i>Factores ponderados para la jerarquización de las consecuencias</i>	44
<i>Tabla 11</i>	<i>Análisis de criticidad de los sistemas y equipos de la planta</i>	45
<i>Tabla 12</i>	<i>Aplicación de la matriz de valoración de riesgos al análisis de criticidad</i>	47
<i>Tabla 13</i>	<i>Características técnicas, condiciones operativas y ambientales bomba sumergible</i>	49
<i>Tabla 14</i>	<i>Características técnicas, condiciones operativas y ambientales bomba alta presión</i>	50
<i>Tabla 15</i>	<i>Características técnicas, condiciones operativas y ambientales bomba de pre-presión</i>	50
<i>Tabla 16</i>	<i>Características técnicas, condiciones operativas y ambientales bomba fase 2</i>	51
<i>Tabla 17</i>	<i>Características técnicas, condiciones operativas y ambientales bomba dosificadora ácido de salida</i>	52
<i>Tabla 18</i>	<i>Resumen hoja RCM bomba sumergible</i>	53
<i>Tabla 19</i>	<i>Resumen hoja de RCM bomba de pre-presión</i>	58
<i>Tabla 20</i>	<i>Resumen hoja de RCM bomba de segunda fase</i>	60
<i>Tabla 21</i>	<i>Resumen hoja RCM bomba dosificadora de ácido de salida</i>	62
<i>Tabla 22</i>	<i>Plan de mantenimiento general planta de tratamiento</i>	65
<i>Tabla 23</i>	<i>Stock de repuestos seleccionados del análisis de RCM y opcionales</i>	72

Resumen

Título: Diseño de un plan de mantenimiento para una planta de tratamiento de lixiviados aplicando la metodología del RCM

Autor: Edwin Alberto Baena Velásquez

Palabras claves: Planta de tratamiento, lixiviado, aguas residuales, análisis de criticidad, RCM

Descripción: El presente trabajo propone un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para las plantas móviles de tratamiento de lixiviados y aguas residuales construidas por el fabricante alemán C-deg GmbH. Se utiliza la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) como estrategia en el proceso de elaboración del plan, aplicándola específicamente en los equipos establecidos como críticos durante un análisis de criticidad efectuado previamente. Al final se entrega un plan general de mantenimiento con todas las frecuencias y actividades correctivas, preventivas y predictivas que se deben aplicar tanto a los equipos críticos como a aquellos que no representan un nivel alto de riesgo para la continuidad de la operación.

Abstract

Title: Diseño de un plan de mantenimiento para una planta de tratamiento de lixiviados aplicando la metodología del RCM

Author: Edwin Alberto Baena Velásquez

Key words: Treatment plant, wastewater, criticality analysis, RCM

Description: In the present work, it proposes a reliability-focused maintenance plan for mobile plants for leachate and wastewater treatment built by the German manufacturer C-deg GmbH. The Reliability-Based Maintenance (RCM) methodology is used as a strategy in the plan development process, applying it specifically to the equipment established as critical during a previously performed criticality analysis. At the end, a general maintenance plan is delivered with all the frequencies and corrective, preventive and predictive activities that must be applied to both critical equipment and those that do not represent a high risk level for the continuity of the operation.

Introducción

C-deg es un fabricante alemán de sistemas y equipos destinados al aprovechamiento de gases no convencionales y al tratamiento de aguas residuales, y en Colombia tiene presencia desde el año 2014 a través de C-deg S.A.S. E.S.P. Una de sus principales líneas de negocio la constituye la venta de sistemas de tratamiento de lixiviados para rellenos sanitarios municipales y departamentales. Además de la venta de plantas, el modelo de negocio de la empresa también contempla la prestación de servicios de tratamiento usando equipos propios y también contratos de operación con clientes cuando estos poseen equipos de la marca. La tecnología empleada para dichos procesos es la filtración de membranas por ósmosis inversa, la cual viene instalada dentro de contenedores de 40 pies de largo, el cual a su vez puede ser montado sobre un tráiler para permitir un fácil transporte a los lugares donde sea requerida su operación.

El alto grado de automatización y confiabilidad de la planta posibilita el funcionamiento continuo de la planta, requiriendo solamente una sola persona que se encarga de labores tales como monitoreo y abastecimiento de productos químicos usados en la operación. Sin embargo, esta modalidad de operación tiene algunas limitantes y desventajas cuando se presentan complicaciones principalmente relacionadas con la falla en equipos. Entre dichas limitaciones y desventajas se tiene la ubicación distante de los centros urbanos, la poca cantidad de repuestos disponibles en sitio y la incapacidad del operador de la planta para realizar trabajos de alta complejidad. Esta situación genera que en ocasiones los tiempos de parada sobrepasen las 48 horas, debido al tiempo que toma el proceso de enviar un repuesto o de desplazar un técnico especializado a sitio. Ante ello, resulta imprescindible asegurar el buen funcionamiento de los equipos y reducir los riesgos de falla durante la operación, con el fin de asegurar la eficiencia, rentabilidad y competitividad de

negocio de los propietarios de las plantas marca C-deg. A partir de una estrategia de mantenimiento bien enfocada hacia el alcance de un alto nivel de confiabilidad y eficiencia en la utilización de los recursos de personal y de capital, es posible lograr los niveles de desempeño que exige la estrategia de negocio tanto de la compañía como la de sus clientes.

1. Planteamiento del problema

En la actualidad el fabricante de plantas industriales C-deg no cuenta en su estrategia de negocio con un programa de mantenimiento efectivo que asegure una alta disponibilidad y confiabilidad en sus plantas de tratamiento de aguas residuales. El plan de mantenimiento que se entrega a los compradores de las plantas solo se limita a instrucciones básicas de lubricación, inspección y monitoreo de variables, pero no al aseguramiento de la reducción de las fallas y sus efectos sobre la producción. Esta situación limita la capacidad de alcanzar los altos niveles de desempeño requeridos en el plan de negocio tanto de la compañía como la de sus clientes, y desperdicia el potencial que tiene la marca para obtener mayores niveles de confiabilidad en sus equipos, adicionales a los que ya posee por su calidad de diseño y construcción.

2. Objetivos

2.1. Objetivos Generales:

Diseñar un plan de mantenimiento para una planta de ósmosis inversa de tratamiento de lixiviados, aplicando la metodología del RCM para el mejoramiento de la disponibilidad y confiabilidad de los equipos

2.2. Objetivos Específicos:

- Determinar los equipos y sistemas críticos de la planta de tratamiento a través de un análisis de criticidad, con el fin de determinar prioridades de la aplicación del RCM.
- Definir las actividades proactivas que se desarrollarán a los equipos seleccionados para aplicarles la metodología del RCM.
- Definir los criterios para el plan de mantenimiento de los equipos de la planta que no fueron objeto de RCM.

3. Justificación

El modelo de negocio de C-deg, específicamente en Colombia, consiste en la venta de plantas, prestación de servicio de tratamiento o contratos de operación con algunos de los clientes que adquieren equipos de la marca. En cualquiera de las modalidades, las metas de producción, calidad, seguridad y medio ambiente tanto de C-deg como de sus clientes se consiguen asegurando un alto grado de disponibilidad y confiabilidad en las unidades de tratamiento.

En contratos de prestación de servicio o de operación, la compañía recibe sus ingresos de acuerdo con al número de metros cúbicos de lixiviado tratado de manera mensual y es por ello que una de las principales políticas de la empresa es garantizar la continuidad en sus procesos de producción. En la modalidad de venta de plantas, C-deg ha construido en el mercado una imagen de equipos confiables y eficientes. Sin embargo, aún existe el potencial para incrementar dicha imagen por medio de una buena estrategia de mantenimiento que consolide aún más los niveles de disponibilidad y confiabilidad que ya de por sí tienen las plantas, lo cual ayudará sin duda con consolidarse y asegurar su participación a futuro en el mercado de los sistemas de tratamiento de lixiviados y aguas residuales.

En la actualidad C-deg no posee un plan de mantenimiento que se adapte a dichas necesidades y es por ello que esta monografía propone un plan de mantenimiento utilizando la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, ya que sus características y ventajas se ajustan bastante al modelo de negocio y requerimientos operacionales de C-deg y sus clientes.

4. Marco teórico y estado del arte

4.1. Estado del arte

La aplicación de la metodología del RCM a planes de mantenimiento para tratamiento de agua es extensa y se encuentra muy soportada. La gran mayoría de los documentos consultados sobre mantenimiento basado en RCM se enfocan en proyectos de desalinización, tratamiento de agua potable y para la industria de los alimentos. Romero (2011) presenta en su trabajo las técnicas de mantenimiento predictivas aplicadas a una estación de desalación de agua de mar que usa la tecnología de ósmosis inversa. Quezada (2014) aplica la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad a plantas de tratamiento de agua potable. Por otro lado, González y Quevedo (2016) aplica la misma estrategia a sistemas de ósmosis inversa en la industria de las bebidas gaseosas. Ninguno de los trabajos consultados relaciona planes de mantenimiento basados en RCM aplicados a plantas de tratamiento de lixiviados mediante la tecnología de ósmosis inversa. Aunque el enfoque es similar, el tratamiento de lixiviados es un proceso mucho más complejo donde los equipos trabajan con líquidos altamente corrosivos y en lugares con condiciones climáticas adversas. Este trabajo pretende servir de guía para futuras implementaciones en plantas similares.

4.2. Marco conceptual

4.2.1. Tratamientos de lixiviados mediante ósmosis inversa

La generación de lixiviados es un punto crítico en la operación de cualquier relleno sanitario, ya que su manejo inadecuado puede causar contaminación de suelos y de fuentes de agua tanto superficiales como subterráneas. La producción de estos residuos depende tanto de las frecuencias de las lluvias, como del volumen y calidad de los residuos depositados en las instalaciones. Los

lixiviados generalmente poseen una alta carga contaminante y esto hace que se imposibilite su vertimiento directo al medio ambiente. Debido a esto, dicho fluido debe ser recogido en piscinas artificiales para su posterior tratamiento mediante procesos biológicos y fisicoquímicos antes de su vertimiento. De este último destaca el proceso de filtración por ósmosis inversa el cual produce un efluente de elevada calidad. El rendimiento de los sistemas de ósmosis es muy elevado, pues permite la remoción hasta del 99% (García et al., 2008) de parámetros como la DQO, amonio y conductividad. Actualmente esta tecnología es usada de la mano con otros procesos de pretratamientos con los que se consiguen excelentes resultados.

4.2.2. Análisis de criticidad

Dentro de un proceso productivo, no todos los equipos tienen el mismo impacto sobre los planes del negocio. Por todos es bien sabido que hay equipos más imprescindibles que otros. Debido a que generalmente el presupuesto asignado a las labores de mantenimiento es limitado, se hace necesario destinar la mayor parte de los recursos a los equipos que se consideran más importantes por las consecuencias que puede tener una parada imprevista o pérdida de la función. Sólo un pequeño porcentaje de los recursos se destina a cubrir aquellos equipos que no tiene gran influencia en los objetivos del negocio. Alcanzar esta diferenciación solo se logra a través de un análisis de criticidad. En él, se define qué equipos son altamente críticos, cuáles son solamente críticos, los importantes y los prescindibles. Esta clasificación se hace teniendo en cuenta la influencia de una posible anomalía en aspectos como producción, calidad, mantenimiento y medio ambiente.

Durante el análisis, la categoría final de un equipo corresponderá al nivel más alto que haya obtenido en la evaluación de los aspectos anteriormente señalados. De acuerdo con dichos resultados, se establece el modelo de mantenimiento que mejor se adapte a las necesidades de cada equipo. García (2003) presenta el desarrollo de todos los criterios necesarios para la selección del modelo de mantenimiento para cada equipo de acuerdo con los resultados del análisis de criticidad.

4.2.3. *Mantenimiento y RCM*

El concepto de mantenimiento normalmente es descrito como el conjunto de técnicas destinadas a la preservación de los equipos y sistemas de una organización el mayor tiempo posible, siempre en búsqueda de la máxima disponibilidad y obteniendo el mayor rendimiento. Históricamente, el proceso de mantenimiento ha pasado por diferentes etapas. Durante el inicio de la revolución industrial, los operarios eran los encargados de las reparaciones de los equipos. A medida que fue aumentando la tecnología, la complejidad de las actividades de mantenimiento se hicieron más evidentes y esto creó la necesidad de crear departamentos de mantenimientos. Las tareas de mantenimiento en estas primeras etapas se centraban fundamentalmente en tareas de carácter correctivo y buscaban solucionar fallas que se producían en la operación. Después de la segunda guerra mundial, empieza a implementarse el concepto de confiabilidad. Ya las actividades de mantenimiento no solo se enfocaban a la búsqueda de fallas, sino también a la prevención de estas, para que no se vuelvan a producir. En ese momento aparecen las diferentes clases de mantenimiento, entre ellos el preventivo, predictivo, proactivo, mantenimiento asistido por computador y metodologías como el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

De manera general se puede decir que el RCM es una metodología de mantenimiento utilizada para asegurar el cumplimiento de las funciones de un activo bajo un determinado contexto operacional. Su intención final es construir o modificar el plan de mantenimiento de una empresa

para aumentar la disponibilidad y confiabilidad en los equipos al menor costo posible. Ortiz (2016) describe todas las ventajas para una organización la aplicación del RCM. Moubray (2004) en su libro RCM II hace una completa descripción del proceso que se debe llevar a cabo para la elaboración de un plan de mantenimiento basado en RCM. En la actualidad existen organismos internacionales que presentan guías de aplicación para la implementación de procesos de RCM en una organización tales como la IEC-60300-3-11 (2009) y la SAE JA1012 (2011).

Vale la pena resaltar que el RCM no es la única metodología que se puede usar para construir un plan de mantenimiento. Existen estrategias tales como el TPM, el PMO o el RBI. La ventaja que tiene el RCM es que se puede integrar con varias de estas, siendo la más común la combinación TPM-RCM. A diferencia del RCM, el TPM (Total Productive Maintenance) se considera como una estrategia a nivel de toda la empresa y no estrictamente como un sistema para la mantención de equipos, ya que también se centra en la eliminación de las deficiencias en los sistemas productivos. Sin embargo, el TPM reconoce la importancia del RCM en la reducción de fallos en los procesos. Suzuki (1994) recomienda usar el enfoque del RCM como ayuda a la determinación del sistema de mantenimiento que se ajusta más a las necesidades de cada equipo. A manera de conclusión se puede decir que “el RCM es una herramienta que ayuda a definir el cómo hacer de la mejor manera lo que el TPM dice que debe hacerse” (Paredes, 2008, sección de Conclusión, párr.2). Al ser el RCM una herramienta, indica que no es el único factor que aporta confiabilidad al proceso productivo. Existen otros factores que generan apreciablemente una reducción en la confiabilidad de las plantas tales como el factor humano, una mala operación y un incorrecto proceso de adquisición y montaje de equipos.

5. Planta de tratamiento de lixiviados y aguas residuales C-deg

5.1. Descripción del proceso

Para la descripción del proceso se usará el esquema mostrado en la figura 1, es cual corresponde panel de control de la planta C-deg 19 propiedad de la compañía. El proceso de tratamiento de lixiviado comienza cuando la bomba sumergible (1) succiona el lixiviado de una piscina ubicada en la parte exterior de la planta. Dicho fluido es conducido hacia un filtro (que no aparece en el esquema) y luego hacia el tanque de almacenamiento (2). Sobre el tanque está ubicado un extractor (3) para la evacuación de los gases generados por el movimiento del líquido en el recipiente. Al sistema anteriormente descrito se le denomina “sistema de captación de lixiviado”.

En el siguiente paso, una bomba multietapas (4) conduce el lixiviado del tanque hacia dos filtros de grava (5) ubicados en paralelo. La función de este filtro es retener algunos sólidos suspendidos y partículas grandes generadas en el tanque de lixiviados. A su salida de los filtros, se ubica una bomba dosificadora de ácido (6), la cual solo se activa durante las purgas programadas que realiza el sistema de forma automática o cuando el proceso requiere la dosificación de ácido en la entrada. Luego de ese punto, el fluido pasa por dos housing (7) que poseen cartuchos de 10 micras, con el que se hace una filtración eficaz de los sólidos suspendidos. Al final de esta última filtración, existe una bomba dosificadora de anti-incrustante (8) que ayuda a la prevención de sedimentación en el proceso posterior. Hasta este punto este sistema recibe el nombre de “sistema de pretratamiento”.

El siguiente sistema se denomina “sistema de filtración de ósmosis inversa fase 1” y es donde se hace la remoción de la mayoría de los sólidos disueltos del lixiviado. El sistema se

compone de una bomba triplex de alta presión (9), la cual eleva altamente la presión del fluido para pasarlo por las membranas (10), (11), (12), (13) y (14) y que se dé de esta manera el proceso de separación. Existe un sistema de bombas de recirculación (15), (16), (17), (18), (19) y (20) que impulsan el fluido hacia el siguiente bloque en serie, pero que al mismo tiempo ayuda a que el lixiviado a que de un nuevo paso hacia su bloque de origen. Este proceso se repite en los 4 bloques restantes. El proceso genera dos efluentes, uno de permeado y otro de rechazo, cuya regulación se lleva a cabo mediante una válvula de regulación automática tipo campana (20), luego de la cual sale hacia la parte exterior de la planta. Por su parte, el permeado es dirigido hacia el siguiente sistema de filtración denominado “sistema de filtración de ósmosis inversa fase 2”. Dicho sistema tiene la función de remover los contaminantes que no hayan sido posibles de remover en el primer paso. Se conforma por una bomba multietapas (21) la cual eleva la presión del fluido para conducirlo a través de un bloque de membranas (22). Al igual que en el sistema de fase 1, en la fase 2 existe una válvula de regulación de rechazo (23), pero a diferencia de la primera, el rechazo producido en la fase 2 se vierte en el tanque de lixiviado, por tratarse de un líquido con una calidad superior a lixiviado de entrada y que de alguna manera ayuda en la dilución de la carga de sólidos de entrada. Luego de su salida del bloque, una bomba dosificadora de ácido (24) se encarga de la regulación del pH antes de enviarlo hacia cualquier tipo de vertimiento.

Las plantas vienen incorporadas con el sistema “Cleaning in place” o CIP, lo cual permite la realización de purgas automáticas y lavados químicos cada que el sistema alcanza niveles de saturación por ensuciamiento en sus membranas. Cuando se activa el sistema CIP, se suspende la entrada de lixiviado y el sistema comienza a alimentarse del permeado contenido en el tanque (25), previamente llenado con el permeado producido en la fase 1. Dicho tanque incorpora en su interior una bomba sumergible (26) para realizar mezclas de detergentes durante los lavados químicos. El

Figura 2.

Exterior planta de tratamiento de lixiviados



Figura 3.

Interior planta de tratamiento de lixiviados



5.2.Sistemas y componentes de la planta de tratamiento

5.2.1. Sistema de captación de lixiviado

El sistema de captación de lixiviado es el encargo de llevar el lixiviado desde la piscina de alimentación externa hacia el interior de la planta. Está compuesto por una bomba sumergible de 3 etapas (figura 5), un filtro de tipo malla de 100 micras y un tanque de polietileno con capacidad de 1000 litros para el almacenamiento de los lixiviados tal como se muestra en la figura 4. El tanque de almacenamiento posee en parte superior la tubería de entrada principal de lixiviado, tuberías auxiliares para la entrada de permeado de primera fase (by-pass) y concentrado de segunda fase. Adicionalmente posee un tubo para la extracción de gases, impulsado por un extractor (figura 6). El control de encendido y apagado de la bomba sumergible se realiza mediante la señal de lectura de un sensor de nivel ubicado dentro del tanque y una válvula eléctrica de entrada. El flujo de la bomba de muestra al sistema mediante un medidor de flujo ubicado antes del filtro de entrada.

Una de las principales fallas en el sistema de captación es la falla en el motor de la bomba sumergible por infiltraciones de líquido o recalentamiento del bobinado. Otra causa muy común de paradas es debida a la obstrucción paulatina de la malla instalada en la succión de la bomba sumergible por acumulación de biología y elementos extraños. Cuando esto ocurre, el operador debe detener la planta, sacar la bomba de la piscina y limpiar la malla de manera manual. Otro problema común, son las calcificaciones que se generan dentro del tanque de lixiviado después de cierto tiempo de operación. Dichas calcificaciones afectan la lectura del sensor de nivel y causa paradas de planta ya sea por máximo o mínimo nivel. Estas calcificaciones también afectan el rendimiento de la bomba de pre-presión y saturan de manera drástica los filtros de grava, lo cuales requieren el lavado químico en dicho caso. Los componentes principales del sistema de captación de lixiviado de detallan en la tabla 1.

Tabla 1
Componentes del sistema de captación de lixiviado

Área	Equipo	Componentes
Sistema de captación de lixiviado	Bomba sumergible Grundfos SP 17-3	Motor eléctrico
		Bomba
		Válvula eléctrica de entrada
		Sensor de nivel
		Medidor de flujo
		Sistema eléctrico
		Tubería
	Filtro de entrada Sunmicron HTWB23-304	Cuerpo del filtro
		Filtro de malla
		Válvula manual de entrada
		Válvula de venteo
		Tubería
	Tanque almacenamiento de lixiviado DEHOUST 1100 DF	Cuerpo del tanque
		Detector de nivel
		Sensor de nivel
		Tubería
Extractor de gases Motori Bonora 3CR71F/2	Extractor	
	Motor eléctrico	
	Sistema eléctrico	
	Tubería	

Figura 4.

Tanque se lixiviado, filtro de entrada, medidor de flujo y válvula de entrada



Figura 5.

Bomba sumergible multietapas



Nota: figura tomada de <https://www.grundfos.com/>

Figura 6.

Extractor de gases del tanque de lixiviados



5.2.2. Sistema de pretratamiento del lixiviado

La función del sistema de pretratamiento consiste principalmente en la remoción de las partículas grandes y algunos sólidos suspendidos del lixiviado antes de su llegada sistema de ósmosis de primera fase. Está compuesto por una bomba vertical multietapas llamada como “bomba de pre-presión” el cual incorpora directamente en su estructura un variador de frecuencia

(figura 7). Una de las principales causas de parada de esta bomba en la succión de calcificaciones procedente del tanque del lixiviado y en algunas ocasiones, la entrada de aire a través del tanque CIP durante una purga o lavado. El plan de mantenimiento dado por el fabricante requiere el reemplazo periódico de rodamientos del motor eléctrico y el cambio de piezas de desgaste de la bomba. No obstante, actualmente no tiene un plan de mantenimiento y por ello, todas las actividades sobre ella son de carácter correctivo. También dentro de este sistema se encuentran dos unidades de filtro de grava funcionando en paralelo y dos housing para el uso cartuchos de 10 micras, ubicados de la misma forma. a todos ellos ubicados en paralelo como se muestra en la figura 8 y 9. El mantenimiento de los housing consiste simplemente en el cambio de los cartuchos una vez alcanza niveles de saturación alto, pero el de los filtros de grava incluyen lavados químicos y cambio de arena. Sin embargo, esta última actividad no está incluida en un programa de mantenimiento preventivo.

Dentro del sistema también se incluyen dos bombas digitales para la dosificación, una para ácido y otro para anti-incrustante. La primera está fijada en una de las paredes de la planta y la segunda está ubicada dentro de cabina de acero inoxidable, tal y como se muestran en las figuras 10 y 11. El mantenimiento regular de estas bombas incluyen el cambio de membranas y el reemplazo de válvulas, pero actualmente se dichas actividades se ejecutan Los componentes del sistema de pretratamiento se enlistan tabla 2 de a continuación:

Tabla 2
Componentes del sistema de pretratamiento

Área	Equipo	Componentes
Sistema de pretratamiento de lixiviado	Bomba de pre-presión Grundfos CRNE15-03	Motor eléctrico
		Bomba
		Válvula eléctrica de entrada
		Medidor de presión
		Válvula eléctrica de salida
		Variador de frecuencia
		Sistema eléctrico
		Tubería
	Filtros de grava	Válvula eléctrica salida 1
		Cuerpo del filtro

Área	Equipo	Componentes
	Aqua Management 24x38	Tubería
	Housing filtro de cartuchos Model 1033502	Válvula manual de entrada
		Cartucho
		Carcasa
		Válvula de venteo
		Válvula manual de salida
		Tubería
	Bomba dosificadora ácido de entrada Grundfos DDA 30-4	Motor eléctrico
		Bomba
		Mangueras
		Detector de nivel
		Sistema electrónico
		Sistema eléctrico
	Bomba dosificadora anti- incrustante Grundfos DDA 30-4	Motor eléctrico
		Bomba
		Mangueras
		Sistema electrónico
		Sistema eléctrico
		Tanque de almacenamiento

Figura 7.

Bomba de pre-presión del sistema de pretratamiento



Figura 8.

Filtros de grava del sistema de pretratamiento



Figura 9.

Equipos housing del sistema de pretratamiento



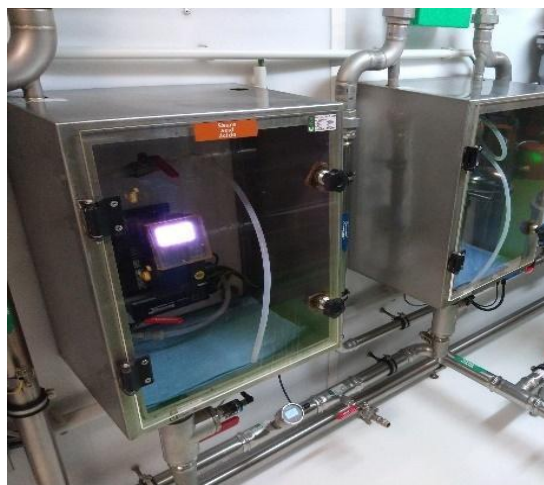
Figura 10.

Bomba dosificadora de anti-incrustante del sistema de pretratamiento



Figura 11.

Bomba dosificadora de ácido de entrada



5.2.3. Sistema de filtración de ósmosis inversa fase 1

El sistema de filtración de ósmosis inversa fase 1, se compone de una bomba triplex denominada “bomba de alta presión” la cual a su vez es impulsada por un motor eléctrico a través de un sistema de transmisión por correas (figura 12). El flujo de la bomba se controla por medio de un variador de frecuencia ubicado en el gabinete eléctrico de la sala de control. El mantenimiento actual de esta bomba incluye la lubricación semanal de pistones y anual de los rodamientos del motor; también el cambio correctivo de válvulas, retenedores de aceite y sellos de líquido. Los 5 bloques de membranas (figura 13) ubicados después de la bomba de alta presión son casi libres de mantenimiento, y debido a ello, solo es necesario el reemplazo de las membranas de filtración basadas en su condición. Las bombas de recirculación que acompañan a cada bloque, por recomendación del fabricante, requieren el mantenimiento de la parte de impulsión haciendo el cambio de las piezas de desgaste, pero los motores son libres de mantenimiento y las actividades sobre estos se limitan al monitoreo de variables eléctricas. Dichas bombas se interconectan mediante las válvulas eléctricas mostradas en la figura 14.

La regulación del rechazo del sistema de filtración de ósmosis fase 1 se realiza mediante el estrangulamiento del flujo que realiza una válvula tipo campana con la que se ven en la figura 15. Dicha válvula es accionada por un actuador eléctrico. La actividad principal de mantenimiento de

esta válvula consiste en inspecciones de funcionamiento y revisión de posibles fugas. La regulación de la presión de fluido de salida se regula mediante la válvula tipo resorte.

El sistema en la parte de instrumentación consta de un sensor de pH, uno de temperatura y uno de conductividad, medidores de flujo tipo magnético para el caudal principal y caudal rechazo y también medidores de flujo tipo másico-térmico para la lectura de los flujos de permeado a la salida de cada uno de los 5 bloques. Las actividades de mantenimiento para todos estos dispositivos se enfocan en labores de limpieza y calibración. Ante una eventual falla, la planta queda inoperativa hasta que se haga la gestión y entrega del respectivo repuesto en sitio. Los componentes del sistema de filtración OR fase 1 se detallan de manera más clara en la tabla 3.

Tabla 3

Componentes del sistema de filtración de ósmosis inversa fase 1

Área	Equipo	Componentes
Sistema de filtración OR fase 1	Bomba de alta presión CAT 67102-WEG W22	Sensor de pH
		Sensor de conductividad
		Sensor de temperatura
		Motor eléctrico
		Bomba triplex
		Sistema de transmisión de poleas
		Variador de frecuencia
		Válvula de alivio
		Compensador de pulsaciones
		Medidor de presión
		Medidor de flujo
		Sistema eléctrico
		Tubería y mangueras
	Bloque de membranas 1,2,3,4 y 5 Phoenix 1000 PSI 40°C	Medidor de presión
		Medidor de flujo
		Cuerpo del bloque
		Membrana
		Válvula manual de entrada
	Válvula manual de salida	
Bomba de recirculación 1,2,3,4 y 5 Grundfos BM17-5-NE	Motor eléctrico	
	Bomba	
	Camisa del conjunto	
	Sistema eléctrico	
	Válvula eléctrica de entrada	
	Tubería	

Área	Equipo	Componentes
	Válvula reguladora de rechaza fase 1 Schischek InMax -50.75-Y	Válvula de regulación
		Actuador eléctrico
		By-pass
		Medidor de flujo
		Válvula reguladora de presión
		Tubería

Figura 12.

Bomba de alta presión



Figura 13.

Sistema de bloques de membrana fase 1



Figura 14.

Sistema de bombas de recirculación

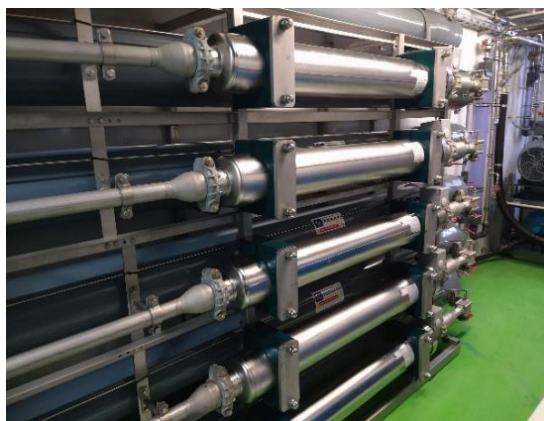


Figura 15.

Válvula reguladora de rechazo fase 1



5.2.4. Sistema de filtración de ósmosis inversa fase 2

El sistema de filtración de ósmosis inversa de fase 2 en el encargado de realizar el filtrado final al permeado proveniente del sistema de filtración de fase 1, lo cual asegura un cumplimiento de todos los parámetros de remoción estipulados en la norma. Dicho sistema está compuesto por una bomba vertical multietapas llamadas “bomba de segunda fase” (figura 16) y la cual es la que se encarga de ejercer la presión necesaria para que se dé el proceso de ósmosis. La bomba requiere para su mantenimiento la sustitución periódica de las piezas de desgaste y la sustitución de rodamientos del motor eléctrico. A diferencia del sistema de filtración de fase 1, éste consta de

solo un bloque de membranas (figura 17), y su mantenimiento consiste básicamente en el reemplazo de las membranas de filtración una vez estas han cumplido su vida útil.

La regulación del rechazo del flujo de rechazo del sistema de filtración se lleva a cabo mediante una válvula reguladora (figura 18) tipo campana, la cual es accionada por un actuador eléctrico. El mantenimiento de esta válvula engloba actividades como revisión de funcionamiento, inspecciones de fugas y revisiones periódicas de sus partes internas.

Al final del proceso hay una bomba dosificadora de ácido de salida (figura 19), cuya función principal es hacer la regulación del pH del permeado que sale de la planta de tratamiento. También en este mismo punto se ubican instrumentos de medición de variables tales como temperatura, conductividad, flujo y pH. El mantenimiento de la bomba dosificadora consiste en el cambio periódico de membranas y válvulas de admisión y descarga. El mantenimiento de los instrumentos se basa en limpiezas y calibraciones y cambio de partes dañadas. En la tabla 4 se muestra de manera más detallada los componentes del sistema de filtración.

Tabla 4
Sistema de filtración de ósmosis inversa fase 2

Área	Equipo	Componentes
Sistema de filtración OR fase 2	Bomba de segunda fase Grundfos CRN 10-22	Motor eléctrico
		Bomba
		Válvula purga de aire permeado fase 1
		Válvula reguladora sobrepresión permeado fase 1
		Medidor de conductividad permeado fase 1
		Válvula eléctrica de entrada
		Medidor de presión succión
		Medidor de presión descarga
		Variador de frecuencia
		Sistema eléctrico
		Tubería
	Bloque de membranas fase 2 Phoenix 1000 PSI 40°C	Válvula eléctrica de salida
		Medidor de flujo de salida
		Sensor de conductividad de permeado
		Sensor de temperatura
		Cuerpo del bloque
		Membrana
Tubería		

Área	Equipo	Componentes
	Bomba dosificadora de ácido de salida Grundfos DDA 30-4	Detector de nivel
		Sistema eléctrico
		Sistema electrónico
		Sensor de pH
		Sensor de conductividad
		Sensor de temperatura
		Medidor de flujo
		Mangueras
		Válvulas manuales de control
		Válvula antirretorno en tubería
	Válvula reguladora de rechazo fase 2 Schischek InMax-15.30-Y	Válvula de regulación
		Actuador eléctrico
		Medidor de flujo
		Sensor de pH
		Sensor de temperatura
		Tubería

Figura 16.

Bomba de segunda fase



Figura 17.

Sistema de bloques de segunda fase



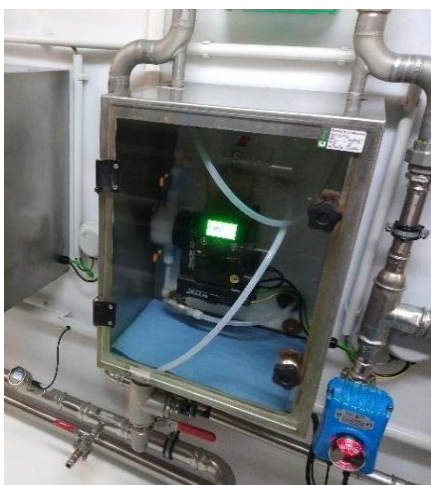
Figura 18.

Válvula reguladora de rechazo de segunda fase



Figura 19.

Bomba dosificadora de ácido de salida



5.2.5. Sistema Cleaning in place (CIP)

El sistema de limpieza in situ permite realizar limpieza programadas automáticas y lavados químicos. Está compuesto principalmente por un tanque de almacenamiento polietileno de 2000 litros de capacidad (figura 20), en el cual se almacena permeado de proveniente de la primera fase. En su interior posee una bomba sumergible destinadas para la mezcla de soluciones durante los lavados de membranas. Debido al poco uso que posee esta bomba (1 horas por semana) y baja criticidad, no existen actividades de mantenimiento programadas sobre este equipo. También

cuenta un con un sensor de nivel que muestra en todo momento el porcentaje del tanque ocupado y con un detector de nivel para proteger a la planta de un eventual desbordamiento de líquido por la tapa del tanque. Respecto al tanque de almacenamiento, las labores se centran en inspecciones en búsqueda de daños sobre la superficie. En la tabla 5 se muestran los componentes.

Tabla 5
Componentes del sistema Cleaning in place

Área	Equipo	Componentes
Sistema de cleaning in place (CIP)	Tanque de almacenamiento de permeado DEHOUST 2500 DF	Sensor de nivel
		Detector de nivel
		Bomba sumergible
		Válvula de entrada de permeado
		Válvula de entrada recirculación
		Válvula salida tanque
		Cuerpo del tanque
	Bomba para mezclas Grundfos Unilift KP	Bomba
		Motor eléctrico
		Sistema eléctrico

Figura 20.

Tanque de almacenamiento del sistema CIP



5.2.6. Sistema de acondicionamiento de aire

El sistema de acondicionamiento de aire cumple la función de mantener las condiciones de temperatura adecuadas para el correcto funcionamiento de los equipos tanto dentro de la sala de máquinas como dentro de la sala de control. Está compuesto por un extractor de aire de techo (figura 21), colocado en la parte superior de la planta uno de los extremos. Sobre este equipo la labor de mantenimiento principalmente se basa en limpieza del equipo, filtro de aire, revisión de conexiones eléctricas y cambio de rodamientos al motor eléctrico periódicamente. El siguiente equipo es el extractor de aire del gabinete eléctrico (figura 22); este equipo es casi libre de mantenimiento y las tareas solo se limitan a labores de limpieza e inspección de partes y funcionamiento. Por último, está el equipo de aire acondicionado tipo mini Split (figura 23). Dicho equipo requiere la limpieza periódica de sus filtros, unidad interior y exterior y la revisión periódica de la presión del refrigerante.

En la tabla 6 se detalla de mejor manera los componentes del sistema:

Tabla 6
Componentes del sistema de acondicionamiento de aire

Área	Equipo	Componentes
Sistema de acondicionamiento de aire	Sistema de extracción sala de máquinas Helios RDD 315/4	Motor eléctrico
		Extractor
		Sensor de temperatura
		Sistema eléctrico
	Sistema de extracción gabinetes eléctricos ebm-papst K2E200-AH20-05	Motor eléctrico
		Extractor
		Sensor de temperatura
		Sistema eléctrico
	Sistema de aire acondicionado Haceb 12000 BTU inverter	Sensor de temperatura
		Unidad interior
Unidad exterior		
	Sistema eléctrico	

Figura 21.

Extractor de la sala de máquinas



Figura 22.

Extractor gabinete eléctrico de la sala de control



Figura 23.

Unidad interior sistema de aire acondicionado sala de máquinas



5.2.7. Sistema de control y potencia

El sistema de control y potencia es el encargado de ejecutar las ordenes detalladas en el modelo de programación de la planta de tratamiento. La mayor parte de los componentes de encuentran ubicados en los gabinetes de la sala de control (figura 24), pero también otra parte pequeña de ellos se ubican en gabinetes cerrados de acero inoxidable en la sala de máquina. El sistema de control requiera limpieza periódica de todos sus componentes, revisión del estado y apriete de las conexiones eléctricas. El sistema de control y potencia se divide de la siguiente manera:

Tabla 7
Componentes del sistema de control y potencia

Área	Equipo	Componentes
Sistema de control y potencia	Sistema de control	PLC Siemens Simatic S7
		Computador Simatic Nanobox PC
		Pantalla táctil
		Sensor de H2S Compur statoc 505
	Sistema de comunicaciones	Cableado, router
		Módulo de conexión a internet
	Sistema eléctrico 440	Guardamotor
	Sistema eléctrico 220	Contactador
Sistema DC	Breaker	

Figura 24.

Gabinete eléctrico sala de máquinas



5.2.8. Equipo de bombeo auxiliar

El equipo de bombeo auxiliar no desempeña un papel crucial en el desarrollo de las operaciones. Un ejemplo de ellos es la bomba de drenaje de sala de máquinas (figura 25). Otros equipos como la bomba centrífuga (figura 26) y bomba de tambor (27) no forma parte de la configuración de diseño de la planta, Sin embargo, son requeridos durante los lavados y reenvase de químicos respectivamente. Estos componentes no reciben ninguna clase de mantenimiento y por ello, su modelo de mantenimiento es correctivo.

Tabla 8

Componentes del sistema de bombeo auxiliar

Área	Equipo	Componentes
Equipo de bombeo auxiliar	Bomba de drenaje Grundfos Unilift KP	Motor
		Sistema eléctrico
	Bomba centrífuga externa Pedrollo Cpm 620 1 hp	Bomba
		Motor eléctrico
		Sistema eléctrico
	Bomba de tambor Standard Pumps-centrifugal drump pump	Bomba
		Motor eléctrico
		Sistema eléctrico

Figura 25.

Bomba de drenaje sala de máquinas



Figura 26.

Bomba centrífuga externa



Nota: tomado de <https://www.pedrollo.com.co>

Figura 27.

Bomba de tambor para sustancias ácidas y alcalinas



Nota: tomada de <http://standard-europe.eu/>

6. Metodología

La obtención de los objetivos planteados en el presente trabajo requiere el desarrollo de una metodología basada en 10 pasos secuenciales que permitirán la estructuración del plan de mantenimiento general de la planta de tratamiento. El primer paso consiste en construir una lista de todos los equipos y sistemas que intervienen en el proceso de tratamiento de la planta de ósmosis inversa. Luego de ello, se realiza un análisis de criticidad a dicha lista, con el objetivo de generar una clasificación y seleccionar los equipos que son más sensibles para el proceso, es decir, aquellos que cuenten con un mayor grado de criticidad. A éstos se les aplicará la metodología del RCM

para la generación de las tareas del plan de mantenimiento; para los equipos con una criticidad de menor rango, se les aplicará una estrategia basada en recomendaciones del fabricante y experiencia del personal de mantenimiento de la empresa. Siguiendo el orden secuencial, el próximo paso consiste en identificar las características técnicas y condiciones operativas y ambientales de los equipos seleccionados para el RCM. Luego usando una hoja de cálculo para el registro documental, se establecen las funciones de los equipos, las fallas funcionales y modos de fallas de cada equipo, para posteriormente realizar un análisis de los riesgos asociados a cada modo de falla y con esto establecer las actividades o tareas de mantenimiento que dan solución o que por lo menos minimizan las consecuencias o las probabilidades de los modos de falla. En la parte final se establecen las tareas de mantenimiento para los equipos a los cuales no se les aplicó la metodología del RCM. Por último, se elabora el plan de mantenimiento general de la planta de tratamiento.

En el análisis de criticidad fue necesario el diseño de una matriz de valoración de riesgos debido a que la compañía no cuenta en la actualidad con una que se adapte los procesos de operación y mantenimiento. La metodología se resume en los siguientes pasos:

- 1- Realizar una lista de sistemas y equipos
- 2- Llevar a cabo un análisis de criticidad
- 3- Definir los equipos a los cuales se les aplicará el RCM
- 4- Identificar características técnicas y condiciones operativas y ambientales
- 5- Establecer las funciones de los equipos
- 6- Identificar las fallas funcionales y los modos de falla
- 7- Analizar los riesgos de cada modo de falla
- 8- Definir las actividades de mantenimiento para cada modo de falla
- 9- Definir el plan de mantenimiento a los equipos que no se les aplicó el RCM.
- 10- Elaboración del plan de mantenimiento de la planta

7. Resultados

7.1. Sistemas y equipos de la planta de tratamiento

La planta de tratamiento se compone de una gran variedad de equipos y componentes, entre los que destacan bombas, equipos de medición y control de flujo, entre otros. Se hará una lista de los equipos el orden del proceso de filtración, es decir, desde el proceso de captación de lixiviado, hasta la salida de permeado y rechazo hacia el exterior de la unidad. La lista de equipos puede observarse en la tabla 9:

Tabla 9

Lista de equipos y sistemas de la planta de tratamiento

Ítem	Equipo	Ítem	Equipo
1	Bomba sumergible	19	Bomba de recirculación 3
2	Filtro de entrada	20	Bomba de recirculación 4
3	Tanque de almacenamiento de lixiviados	21	Bomba de recirculación 5
4	Bomba de pre-presión	22	Válvula reguladora de rechazo fase 1
5	Filtro de grava 1	23	Bomba de segunda fase
6	Filtro de grava 2	24	Bloque de membranas fase 2
7	Bomba dosificadora de ácido de entrada	25	Bomba dosificación de salida
8	Housing 1	26	Válvula reguladora de rechazo fase 2
9	Housing 2	27	Tanque de almacenamiento de permeado
10	Bomba dosificadora de anti-incrustante	28	Bomba de mezcla
11	Bomba de alta presión	29	Sistema de extracción sala de máquinas
12	Bloque de membranas fase 1	30	Extractor gabinete eléctrico
13	Bloque de membranas fase 2	31	Sistema de aire acondicionado
14	Bloque de membranas fase 3	32	Sistema de control
15	Bloque de membranas fase 4	33	Sistema de comunicaciones
16	Bloque de membranas fase 5	34	Bomba de tambor
17	Bomba de recirculación 1	35	Bomba centrifuga externa
18	Bomba de recirculación 2	36	Bomba de drenaje sala de máquinas

Establecida la lista de todos los equipos y sistemas que conforman la planta, el paso siguiente consiste determinar cuáles son los equipos a los cuales se les aplicará la metodología del RCM y a cuáles se les aplicará una estrategia de mantenimiento regular para la elaboración de sus estrategia de mantenimiento. Para ello se usa un análisis de criticidad en el cual se define la jerarquía de todos los equipos bajo aspectos tales como seguridad, medio ambiente, producción y calidad.

7.2. Análisis de criticidad

El análisis de criticidad desarrollado en este trabajo utiliza el modelo semicuantitativo denominado “Criticidad Total Por Riesgo” desarrollado por Parra y Crespo (2012) debido al amplio uso que ha tenido por su carácter sencillo y práctico. Este modelo trabaja con el concepto de riesgo, el cual resulta de multiplicar la frecuencia de los fallos por severidad de las consecuencias.

$$TR = FF \times C$$

CTR= Criticidad Total Por Riesgo

FF= Frecuencia de fallas

C= Consecuencias de la falla

Para dicho análisis se evaluaron factores tales como seguridad, medioambiente, calidad, e impacto en la producción mediante el uso de factores ponderados para la jerarquización de sus consecuencias. Dichos factores ponderados fueron diseñados mediante consultas y entrevista con personal propio de C-deg involucrados en los procesos de operación y mantenimiento. Por otro lado, debido a que la empresa actualmente no cuenta con un registro de fallas, se optó por establecer un criterio de fallas para el cálculo de la frecuencia de fallas. Dicho criterio se basa en

el número de falla ocurridas durante diez años de operación y para la simplificación de los cálculos, también se hará una ponderación de dichas frecuencias, tal como se muestran en la tabla 10.

Tabla 10

Factores ponderados para la jerarquización de las consecuencias

	Seguridad	Medio ambiente	Calidad	Producción	Frecuencia de falla
5	Muerte o incapacidad	Daños irreversibles	Impacta directamente y genera una “no conformidad”	Pérdidas mayores al 75% por día	Más de 5 fallas en 10 años
4	Incapacidad total o permanente	Daños severos	Impacta medianamente y genera una “no conformidad”	Pérdidas entre el 50% y 75% por día	4 fallas en 10 años
3	Daños o enfermedades severas	Daños medios	Impacta medianamente y se mantiene dentro de la conformidad	Pérdidas entre el 25% y 49% por día	3 fallas en 10 años
2	Daños leves	Daños mínimos	Impacta de manera mínima y se mantiene dentro de la conformidad	Pérdidas entre el 10% y el 24% por día	2 fallas en 10 años
1	Sin impacto en la seguridad	Sin impacto ambiental	Sin impacto en la calidad	Pérdidas de menos del 10% por día	1 Falla en 10 años

Después de que cada equipo y sistema sea sometido a la evaluación de cada uno de los factores presente en la tabla 10, se realiza la multiplicación dicho valor por el valor ponderado obtenido en la casilla de “frecuencia de falla” y este resultado se llamará “Valoración total” o como se muestra de manera más específica en la tabla 11, “V”. Por ejemplo, “VS” significa valoración total en seguridad, VM significa valoración total en medio ambiente, “VP” representa valoración total en producción y “VC” es la valoración total en calidad. La valoración final de cada equipo corresponderá a la puntuación más alta obtenida en alguna de los valores de la valoración total. evaluación de cualquiera de los factores anteriormente mencionados. Los resultados del análisis de criticidad se muestran en la tabla 11.

Para la evaluación del riesgo es necesario utilizar una matriz de valoración de riesgo. Normalmente cada organización define sus propios criterios para la valoración del nivel de riesgo en aspecto como seguridad, medio ambiente o producción. En el caso de C-deg, solo existe una matriz para la evaluación del peligro en trabajos de campo, algo que se queda corto para la evaluación de aspectos como medio ambiente, calidad y producción. Debido a esto, fue necesario el diseño y elaboración de una nueva matriz de riesgo enfocada a los factores mencionados anteriormente. Su elaboración se hizo a partir de los resultados del análisis de criticidad, observando la distribución de los equipos y las características comunes que vinculaban alguno de ellos. Finalmente se obtuvo una matriz de valoración de riesgo enfocada a criterios más propios de la operación y mantenimiento, siendo evaluada y aprobada por personal de C-deg S.A.S. E.S.P. La matriz se muestra en la figura 28.

Figura 28.

Matriz de valoración de riesgos

Frecuencia	5	M	A	MAC	MAC	MAC
	4	M	A	A	MAC	MAC
	3	M	M	A	A	MAC
	2	B	M	M	A	A
	1	B	B	M	M	M
		1	2	3	4	5
		Consecuencias				

Muy alta criticidad	MAC
Alta criticidad	A
Media criticidad	M
Baja criticidad	B

La aplicación de la anterior matriz a los resultados de la tabla 11 se explica con el siguiente ejemplo: la bomba sumergible tuvo el mayor valor en el ítem VP (valoración total de producción) con un valor final de 20. El valor respectivo de producción dio 5 (consecuencia) y el de frecuencia de falla (frecuencia) 4. Ubicando estos valores dentro de la matriz de la figura 28, se tiene que la valoración del riesgo para la bomba sumergible es de MAC (muy alta criticidad). Realizando el mismo procedimiento al resto de componentes, se obtiene la tabla 12 donde se muestra cuáles son

los equipos y sistemas que se consideran de muy alta criticidad, media criticidad y de baja criticidad.

Tabla 12

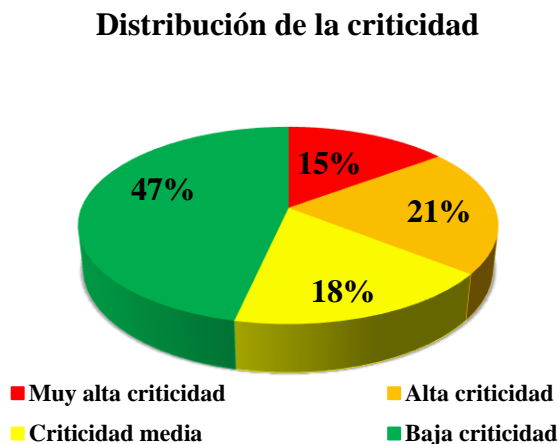
Aplicación de la matriz de valoración de riesgos al análisis de criticidad

Ítem	Equipo	Valor final	Nivel de riesgo	Ítem	Equipo	Valor final	Nivel de riesgo
1	Bomba sumergible	20	MUY ALTA CRITICIDAD	19	Bomba de anti-incrustante	6	BAJA CRITICIDAD
2	Bomba de alta presión	20		20	Bomba recirculación 1	6	
3	Bomba de pre-presión	15		21	Bomba recirculación 2	6	
4	Bomba de segunda fase	15		22	Bomba recirculación 3	6	
5	Bomba ácido de salida	15		23	Bomba recirculación 4	6	
6	Bloque membranas 1	12	ALTA CRITICIDAD	24	Bomba recirculación 5	6	
7	Bloque membranas 2	12		25	Bomba de tambor	6	
8	Bloque membranas 3	12		26	Tanque de lixiviados	5	
9	Bloque membranas 4	12		27	Filtro de entrada	3	
10	Bloque membranas 5	12		28	Microfiltración 1	3	
11	Bloque de membranas fase 2	10	MEDIA CRITICIDAD	29	Microfiltración 2	3	
12	Sistema de control	10		30	Extractor sala máquinas	3	
13	Sistema comunicaciones	10		31	Sistema de A.A.	3	
14	Bomba ácido de entrada	9		32	Extractor gabinete eléct.	2	
15	Válvula reguladora fase 1	8		33	Bomba centrifuga externa	1	
16	Válvula reguladora fase 2	8		34	Tanque CIP	1	
17	Filtro de grava 1	6	35	Bomba de drenaje	1		
18	Filtro de grava 2	6	36	Bomba para mezclas	1		

En la figura 29 se puede apreciar de una mejor manera resultados de la distribución de criticidad mostrados en la tabla 12.

Figura 29.

Distribución de la criticidad de los equipos y sistema de la planta de tratamiento



7.3. Equipos y sistemas para la aplicación de la metodología RCM

El análisis de criticidad dio como resultados los siguientes equipos:

1. Bomba sumergible Grundfos SP 17-3
2. Bomba de alta presión CAT 67102
3. Bomba de pre-presión Grundfos CRNE 15-3
4. Bomba de segunda fase Grundfos CRN 10-22
5. Bomba dosificación de salida Grundfos DDA-30-4

Estos equipos afectan sensiblemente la capacidad de producción de la planta ante una eventual falla y a la vez son de difícil mantenibilidad debido al alta complejidad de los procesos de mantenimiento y la logística de gestión de repuestos.

7.4. Características técnicas y condiciones operativas y ambientales

7.4.1. Bomba sumergible

La bomba sumergible normalmente se encuentra suspendida mediante flotadores sobre piscinas de lixiviado o aguas residuales. La tabla 13 muestra en detalle dicha información.

Tabla 13

Características técnicas, condiciones operativas y ambientales bomba sumergible

Características técnicas	Condiciones operativas	Condiciones ambientales
Caudal máx. 17 m ³ /h	Bombeo de lixiviados y aguas residuales	Temperaturas 15°C-35 °C
Altura máx. 24 m	Flujo de 17 m ³ /h	Ambientes ácidos (min 6 pH)
Acero inoxidable EN 1.4301 (AISI 304)		Succión de lodos y arenas
Potencia: 2.2 kW		
Tensión nominal: 3x380-400-415 V		
Intensidad nominal: 5.50-5.50-5.70 A		
Frecuencia de red: 50 Hz		
Velocidad nominal: 2850-2860-2870 rpm		

7.4.2. Bomba de alta presión

La bomba de alta presión está ubicada dentro de la sala de máquinas y por ellos muchas de las condiciones ambientales están medianamente controladas. Sin embargo, dentro de dicho compartimiento está presente el tanque de lixiviado y ese produce trazas de gases como el ácido sulfhídrico, metano y también vapores producidos por el ácido nítrico que ese usa en las bombas dosificadoras. La tabla 14 muestra las condiciones de funcionamiento de la bomba de alta presión.

Tabla 14

Características técnicas, condiciones operativas y ambientales bomba alta presión

Características técnicas	Condiciones operativas	Condiciones ambientales
Potencia del motor: 30 kW	Rango de flujo: hasta 14 m ³ /h	Pequeñas concentraciones de ácido sulfhídrico
Tensión nominal: 3x 400/690 V	Rango de presión: hasta 59 bar	Pequeñas concentraciones de ácido nítrico
Intensidad nominal: 56,0/32,5 A	Presión válvula de alivio: 70 bar	Vapores ácido nítrico
Frecuencia de red: 25-50 Hz	Relación del compensador: 8:1	Temperaturas 15°C-38 °C
Velocidad del motor 490-980 rpm	Bombeo lixiviados, aguas residuales, soluciones ácidas y bases fuertes.	
Velocidad de la bomba: 218-435 rpm		
Presión máx: 59 bar		
Flujo: 121-242 l/min		
Válvula de seguridad calibrada a : 70 bar		

7.4.3. Bomba de pre-presión

La bomba de pre-presión se está posicionada dentro de la sala de máquinas cerca la tanque de lixiviado y debido a ellos algunos de las condiciones medio ambientales están medianamente controladas. Al igual que la bomba de alta presión, esta está expuesta con concentraciones menores de metano, ácido sulfhídrico y vapor de ácido nítrico y esto se muestra en la tabla 15.

Tabla 15

Características técnicas, condiciones operativas y ambientales bomba de pre-presión

Características técnicas	Condiciones operativas	Condiciones ambientales
Potencia: 4 kW	Rango de flujo: hasta 14 m ³ /h	Concentraciones de H ₂ S
Tensión nominal: 3x 415 V	Rango de presión: hasta 10 bar	Concentraciones de CH ₄
Corriente nominal: 6.3 A	Bombeo lixiviados, aguas residuales, soluciones ácidas y bases fuertes	Vapores ácido nítrico
Frecuencia: 50/60 Hz		Temperaturas 15°C-38 °C
Velocidad nominal: 3520 rpm		
Factor de potencia: 0.82		
Caudal máx. 20.5 m ³ /h a 47,9 m		
Altura máxima: 61.5 M		
Temperatura máxima: 120 °C		
Presión máxima: 25 bar		
3 etapas-3 impulsores		
Material acero inoxidable AISI 316		

7.4.4. *Bomba de segunda fase*

La bomba de segunda fase se encuentra ubicada dentro de la sala de máquinas al lado del tanque CIP. Por esas más cerca de la entrada a la salida de máquinas está un poco más expuesta a la acumulación de polvo. Por estar al lado del tanque CIP también se expone a ambientes ácidos o alcalino durante los procesos de lavado de membranas. Al igual que la bomba de pre-presión y la bomba de segunda fase, esta está expuesta con concentraciones menores de metano, ácido sulfhídrico y vapor de ácido nítrico. La tabla 16 muestra las condiciones de funcionamiento de la bomba de pre-presión.

Tabla 16

Características técnicas, condiciones operativas y ambientales bomba fase 2

Características técnicas	Condiciones operativas	Condiciones ambientales
Potencia nominal: 7,5 kW	Rango de flujo: hasta 10 m ³ /h	Pequeñas concentraciones de ácido sulfhídrico
Tensión nominal: 3x 380-415D/660-690Y V	Rango de presión: hasta 25 bar	Pequeñas concentraciones de ácido nítrico
Intensidad nominal: 14,4-14,0/8,30-8,10 A	Bombeo permeado de fase 1, soluciones ácidas y bases fuertes	Vapores ácido nítrico
Frecuencia de red: 50 Hz		Temperaturas 15°C-38 °C
Factor de potencia: 0.88-0.82		
Velocidad nominal: 2910-2920 rpm		
Caudal máx. 10 m ³ /h a 180.6 m		
Altura máx. 225 m		
22 etapas- 22 impulsores		
Material base EN 1.4408 (AISI 316)		
Material de los impulsores EN 1.4401 (AISI 316)		
Presión de trabajo máxima: 25 bar		
Temperatura de trabajo máxima y mínima a 25 bar: 120°C/-20°C		

7.4.5. *Bomba dosificadora de ácido de salida*

La bomba dosificadora de ácido de salida está posicionada entre un gabinete de ácido inoxidable. Este gabinete no posee ventilación y es por ello es inevitable que con el paso del tiempo

dentro del gabinete se cree una atmósfera ácida por el constante bombe de ácido nítrico. Esta situación genera que se sulfaten muchas veces las conexiones, especialmente las de señal y de control. Además de esto la bomba también está expuesto dentro de la sala de máquinas a los otros componentes anteriormente mencionados. La tabla 17 resume las condiciones operativas.

Tabla 17

Características técnicas, condiciones operativas y ambientales bomba dosificadora ácido de salida

Características técnicas	Condiciones operativas	Condiciones ambientales
Potencia: 24 W	Flujo: 30 l/h	Pequeñas concentraciones de ácido sulfhídrico
Frecuencia de red: 50/60 Hz	Presión: 4 bar	Pequeñas concentraciones de ácido nítrico
Tensión nominal: 1x 100-240 V	Bombeo soluciones básicas y ácidas	Vapores ácido nítrico
Corriente irrupción: 2,5A a 230 V desde 2ms		Temperaturas 15°C-38 °C
Entrada y salida analógica: 0/4-20 mA		
Caudal máx: 30 l/h y min. 30 ml/h		
Altura máxima de aspiración 6 m		
Presión de trabajo máxima: 4 bar		
Temperatura máxima/mínima: 45 °C/-10°C		
Material del cabezal de dosificación: Polifluoruro de vinilideno (PVDF). Bola de válvula en cerámica		

7.5. Aplicación del modelo de RCM

Para la implementación de la metodología de RCM para los equipos establecidos como de “muy alta criticidad” se usará como base una hoja de cálculo construida con el fin de documentar las respuestas a las siete preguntas que plantea el método. Se establecen las funciones, fallas funcionales, modos de falla y el riesgo asociado a dichas fallas. Por último, se establecen las actividades de mantenimiento basado en la SAE JA1012 (2011). En las siguientes tablas se hace en resumen de los resultados de la hoja de RCM de cada equipo.

7.5.1. Análisis RCM bomba de sumergible

Tabla 18

Resumen hoja RCM bomba sumergible

Función	Modo de falla	Nivel del riesgo	Tipo tareas	Descripción tarea	Tipo de variable	Valor	Recursos
Bombear aguas residuales y lixiviados con un flujo de 17 m ³ /h	Motor dañado por pérdida de aislamiento en bobinas	Alto	Correr a falla				
	Motor dañado por falla en el sello	Medio	Correr a falla				
	Motor quemado por pérdida de hermeticidad en cable de alimentación	Muy alto	Monitorizar	Monitorizar el estado del cable y su conexión al motor eléctrico.	Mes	1	Operador de planta y hta
	Impeler bloqueado por elemento extraño	Alto	Monitorizar	Monitorizar el estado de la malla protectora e impulsores de entrada	Mes	1	Operador de planta
	Contactos de los accionamientos flojos o sulfatados	Bajo	Reacondicionamiento	Revisar y ajustar todos contactos y conexiones	Mes	6	Operador de planta y hta
	Guardamotor activado por sobre corrientes debido a rodamientos	Bajo	Correr a falla				
	Cable de alimentación dañado por factores externos	Bajo	Correr a falla				
	Sensor de nivel del tanque de lixiviados dañado	Medio	Correr a falla				
	Sistema de control y/o comunicación en falla o dañado	Medio	Correr a falla				
	Válvula de admisión obstruida por sedimentos	Medio	Reacondicionamiento	Limpiar de la válvula de admisión	Mes	6	Operador plantas y hta

Función	Modo de falla	Nivel del riesgo	Tipo tareas	Descripción tarea	Tipo de variable	Valor	Recursos
	Sistema de válvulas de control apagado por falla en PLC	Bajo	Correr a falla				
	Accionamientos dañados por falla en sus mecanismos	Medio	Correr a falla				
	Impulsores de la bomba desgastados por erosión	Alto	Correr a falla				
	Piezas de recambio de la bomba desgastados por uso	Alto	Correr a falla				
	Motor con bobinas parcialmente dañadas por pérdida de aislamiento	Medio	Correr a falla				
	Malla de la bomba obstruida de forma parcial por sedimentos	Medio	Monitorizar	Monitorizar la variación del flujo de la bomba	Dia	1	Operador de planta
	Tubería obstruida de manera parcial por sedimentos	Medio	Correr a falla				
	Sensor de nivel del tanque de lixiviados desajustado por ensuciamiento	Medio	Reacondicionamiento	Limpiar del sensor de nivel del tanque de lixiviados	Mes	6	Operador de planta, hta y ácido nítrico
	Filtro de entrada obstruido de manera parcial por sedimentos	Bajo	Monitorizar	Monitorizar la variación del flujo de la bomba	Dia	1	Operador de planta
Contener los fluidos herméticamente	Tubería rota	Bajo	Correr a falla				
	Accesorios y acoples entre tubería y bomba rotos	Bajo	Correr a falla				
Enviar señales sistema de control	Contactos auxiliares del contactor dañados	Medio	Correr a falla				
	Contactos auxiliares del contactor sueltos por vibración	Bajo	Reacondicionamiento	Revisar y ajustar todos contactos y conexión	Mes	6	Operador de planta y hta
	Modulo del PLC dañado por corto-circuito	Medio	Correr a falla				

7.5.2. Análisis RCM bomba de alta presión

Tabla 1

Hoja RCM bomba de alta presión

Función	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tareas	Descripción tarea	Tipo variable	Valor	Recursos
Bombear aguas residuales, lixiviados y soluciones ácidas y alcalinas hasta los 14 m ³ /h y presiones de hasta 59 bar	Correa de Transmisión partida por desgaste.	Alto	Cambio	Cambio de juego de correas	Año	2	Operador de plana y hta
	Motor quemado por pérdida de aislamiento de los devanados	Medio	Monitorizar	Monitorizar la resistencia de aislamiento del motor	Mes	6	Operador de planta y megóhmetro
	Guardamotor activado por sobre-corrientes debido a rodamientos	Medio	Reacondicionamiento	Lubricar los rodamientos del motor eléctrico	Año	2	Operador de planta, grasa y pistola para grasa
	Variador de frecuencia dañado por acumulación de polvo o humedad	Medio	Monitorizar	Monitorizar el estado de limpieza del variador frecuencia	Año	1	Operador de planta y hta
	Accionamientos de la bomba dañados por falla en sus mecanismos	Medio	Correr a falla				
	Contactos de accionamientos flojos o sulfatados	Bajo	Reacondicionamiento	Revisar y ajustar todos contactos y conexiones	Mes	6	Operador de planta y hta
	Transmisor de flujo dañado por cortocircuito	Alto	Correr a falla				
	Sistema válvulas de control apagado por falla de PLC	Bajo	Correr a falla				
	Sistema de control y/o comunicación en falla o dañado	Medio	Correr a falla				

Función	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tareas	Descripción tarea	Tipo variable	Valor	Recursos
	Mecanismos de transmisión de la bomba trabados por degradación del lubricante	Medio	Cambio	Cambiar aceite lubricante	Año	1	Operador de planta, aceite lubricante
	Mecanismos de transmisión de la bomba trabados por falta de nivel del lubricante	Medio	Monitorizar	Monitorizar la presencia posibles fugas de aceite	Día	1	Operador de planta
	Correa de transmisión con superficie desgastada por uso	Medio	Monitorizar	Monitorizar el estado correa de transmisión	Mes	6	Operador de planta, y hta
	Mecanismos internos de bomba con exceso de fricción por falta de lubricante	Bajo	Monitorizar	Monitorizar el nivel de aceite de la bomba	Día	7	Operador de planta
	Bobina del motor eléctrico dañada por pérdida de aislamiento	Medio	Monitorizar	Monitorizar la resistencia de aislamiento del motor	Año	1	Operador de planta y megóhmetro
	Válvula de admisión y/o descarga desgastada por uso	Muy alto	Correr a falla				
Contener fluidos herméticamente	Retenedores de aceite con rotura por desgaste	Alto	Correr a falla				
	Colector con fuga en sus empaques	Bajo	Correr a falla				
	Retenedores de líquido con rotura por desgaste	Alto	Correr a falla				
	Compensador de pulsaciones roto por falla en membrana	Muy alto	Correr a falla				
	Manguera de admisión o descarga rota	Medio	Correr a falla				
	Empaques de válvula de alivio deteriorados o rotos	Bajo	Correr a falla				

Función	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tareas	Descripción tarea	Tipo variable	Valor	Recursos
Mantener niveles de vibración dentro de límites	Compensador de pulsaciones roto por falla en membrana	Medio	Monitorizar	Monitorizar las condiciones de carga	Día	1	Operador de planta
	Sistema de fijación de la bomba de alta presión desajustado por vibración	Bajo	Monitorizar	Monitorizar las condiciones de carga	Día	1	Operador de planta
	Sistema de transmisión desbalanceado y desalineado por uso	Medio	Monitorizar	Monitorizar mediante un análisis de vibraciones	Año	6	Proveedor externo
Permitir selección de flujo hasta 14 m3/h	Panel de control dañado	Bajo	Correr a falla				
Liberar fluidos cuando presión sobrepase 70 bar	Resorte de la válvula desgastado por uso	Medio	Búsqueda de fallas	Revisar funcionamiento válvula alivio	Año	1	Operador de planta
Enviar señales de salida al sistema de control	Transmisor de presión de admisión dañado por falla en su tarjeta electrónica	Medio	Correr a falla				
	Transmisor de presión de descarga dañado por falla en su tarjeta electrónica	Medio	Correr a falla				
	Transmisor de flujo dañado por cortocircuito	Medio	Correr a falla				
	Variador frecuencia dañado	Medio	Correr a falla				
	Modulo del PLC dañado por cortocircuito	Medio	Correr a falla				
	Cables de contacto auxiliar sueltos por vibración	Bajo	Reacondicionamiento	Revisar y ajustar todos contactos y conexiones	Mes	6	Operador de planta y hta
	Contactos auxiliares del contactor dañados por falla en sus mecanismos	Medio	Correr a falla				

Función	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tarea	Descripción tarea	Tipo de variable	Valor	Recursos
	Sistema de válvulas de control apagado por falla en PLC	Bajo	Correr a falla				
	Válvula de admisión obstruida por sedimentos	Medio	Reacondicionamiento	Limpiar los mecanismos de la válvula	Mes	6	Operador de planta y hta
	Accionamientos dañados por falla en sus mecanismos	Medio	Correr a falla				
	Impulsores de la bomba desgastados por cavitación	Medio	Correr a falla				
	Piezas de recambio de la bomba desgastados por uso	Muy alto	Cambio	Cambiar kit de piezas de desgaste	Año	2	Operador de planta, herramientas y kit de desgaste
	Sello mecánico desgastado por uso	Alto	Cambio	Cambiar kit de piezas de desgaste	Año	2	Operador de planta, herramientas y kit piezas de desgaste
	Bobina del motor eléctrico dañada por pérdida de aislamiento	Alto	Monitorizar	Monitorizar la resistencia de aislamiento del motor	Mes	6	Operador de planta, megaóhmetro
	Succión de la bomba obstruida de forma parcial por sedimentos	Alto	Reacondicionamiento	Limpiar el tanque de lixiviados e impulsores de la bomba	Mes	6	Operador de planta y elementos de limpieza
Contener fluidos herméticamente	Sello mecánico desgastado por uso	Alto	Cambio	Cambiar el kit de piezas de desgaste	Año	2	Operador de planta, hta y kit piezas de desgaste
	Tubería de admisión y/o descarga con fuga	Bajo	Correr a falla				
	Empaque de sistema de válvulas de control roto	Bajo	Correr a falla				
Enviar señales a sistema de control	Transmisor de presión dañado por falla en su tarjeta electrónica	Medio	Correr a falla				
	Variador de frecuencia dañado	Medio	Correr a falla				
	Módulo del PLC dañado por cortocircuito	Medio	Correr a falla				

Función	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tarea	Descripción tarea	Tipo de variable	Valor	Recursos
	Contactos auxiliares del contactor sueltos por vibración	Bajo	Reacondicionamiento	Revisar y ajustar contactos y conexiones	Mes	6	Operador de planta y hta
Mantener niveles de vibración	Motor desbalanceado por alineación defectuosa	Medio	Monitorizar	Monitorizar a través de un análisis de vibraciones	Año	1	Proveedor externo

7.5.4. Análisis RCM bomba de segunda fase

Tabla 20

Resumen hoja de RCM bomba de segunda fase

Función	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tarea	Descripción tarea	Tipo variable	Valor	Recursos
Bombear permeado de primera fase, soluciones ácidas y básicas en flujos de hasta 10 m ³ /h y presiones de hasta 25 bar	Motor con bobinas dañadas por pérdida aislamiento	Muy alto	Monitorizar	Monitorizar la resistencia de aislamiento del motor	Año	1	Operador de planta y megóhmetro
	Conjunto de impulsores bloqueados por elementos extraños	Bajo	Rediseño	Instalar un filtro en la descarga del tanque CIP			
	Guardamotor activado por sobrecorrientes debido a rodamientos	Medio	Cambio	Cambiar los rodamientos del motor	Mes	18	Operador de planta, hta y rodamiento
	Variador de frecuencia dañado por acumulación de polvo o humedad	Medio	Correr a falla				

Función	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tarea	Descripción tarea	Tipo variable	Valor	Recursos
	Transmisor de presión de descarga o succión dañado por falla en su tarjeta	Medio	Correr a falla				
	Contactos de los accionamientos flojos o sulfatados	Bajo	Reacondicionamiento	Revisar y ajustar contactos y conexiones	Mes	6	Operador de planta y hta
	Sistema de control y/o comunicación en falla o dañado	Medio	Correr a falla				
	Sistema de válvulas de control apagado por falla en PLC	Medio	Correr a falla				
	Accionamientos dañados por falla en sus mecanismos	Medio	Correr a falla				
	Impulsores de la bomba desgastados por cavitación	Medio	Monitorizar	Monitorizar estado de los impulsores	Año	2	Operador de planta y hta
	Piezas de recambio de la bomba desgastados por uso	Muy alto	Cambio	Cambiar kit de piezas de desgaste	Año	2	Operador de planta y hta
	Sello mecánico desgastado por uso	Alto	Cambio	Cambiar kit de piezas de desgaste	Año	2	Operador de planta y hta
	Bobina del motor eléctrico dañada por pérdida de aislamiento	Alto	Monitorizar	Monitorizar la resistencia de aisla.	Año	1	Operador de planta y megóhmetro
Contener los fluidos del sistema en forma hermética	Sello mecánico desgastado por uso	Alto	Cambio	Cambiar kit de piezas de desgaste	Año	2	Operador de planta y hta
	Tubería de admisión y/o descarga con fuga	Bajo	Correr a falla				
	Empaque de sistema de válvulas de control roto	Bajo	Correr a falla				
Enviar señales de salida al	Transmisor de presión dañado por falla en su tarjeta electrónica	Medio	Correr a falla				
	Variador de frecuencia dañado	Medio	Correr a falla				
Sistema de control	Módulo del PLC dañado por cortocircuito	Medio	Correr a falla				

Función	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tarea	Descripción tarea	Tipo variable	Valor	Recursos
	Contactos auxiliares del contactor sueltos por vibración	Bajo	Reacondicionamiento	Revisar y ajustar contactos y conexiones	Mes	6	Operador de planta y hta
Mantener nivel de vibración	Motor desbalanceado por alineación defectuosa	Medio	Monitorizar	Monitorizar mediante un análisis de vibración	Año	1	Proveedor externo

7.5.5. Análisis RCM bomba dosificadora ácido de salida

Tabla 21

Resumen hoja RCM bomba dosificadora de ácido de salida

Función	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tarea	Descripción tarea	Tipo variable	Valor	Recursos
Bombear sustancias ácidas o alcalinas en estado líquido hasta los 30 l/h y 4 bar	Motor quemado por deterioro del aislamiento	Alto	Rediseño	Diseñar una nueva disposición del gabinete			
	Tarjeta electrónica dañada por cortocircuito	Alto	Correr a falla				
	Tubería de admisión con presencia de aire por válvulas defectuosas	Medio	Cambio	Cambiar de válvulas de admisión y descarga	Año	2	Operador de planta, hta y kit de válvulas
	Accionamientos de la bomba dañados por falla en sus mecanismos	Medio	Correr a falla				

Función	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tarea	Descripción tarea	Tipo variable	Valor	Recursos
	Contactos de los accionamientos flojos o sulfatados	Bajo	Reacondicionamiento	Revisar y ajustar contactos y conexión de la bomba	Mes	6	Operador de planta y hta
	Cables de señal de la bomba dañados por corrosión	Muy alto	Rediseño	Diseñar una nueva disposición del gabinete			
	Puertos de salida de la bomba daños por corrosión	Muy alto	Rediseño	Diseñar una nueva disposición del gabinete			
	Sistema de conexión BUS dañado por cortocircuito	Alto	Correr a falla				
	Membrana desgastada por uso	Medio	Cambio	Cambiar kit de la bomba	Año	2	Operador de planta, hta y kit de válvulas
	Mecanismos internos de la bomba trabados por desgaste	Bajo	Correr a falla				
	Válvulas de admisión y de descarga defectuosas por uso	Medio	Cambio	Cambiar kit de la bomba	Año	2	Operador de planta, hta y kit de válvulas
Contener los fluidos herméticamente	Piezas y accesorios flojos por vibración	Alto	Monitorizar	Monitorizar posibles fugas en conexiones	Día	1	Operador de planta
	Membrana rota por desgaste	Medio	Cambio	Cambiar kit de la bomba	Año	2	Operador de planta, hta y kit de válvulas
Detener planta cuando haya presencia de ácido	Detector de nivel dañado por cortocircuito	Alto	Búsqueda de fallas	Realizar prueba de funcionamiento	Mes	6	Operador de planta
Enviar señales al sistema de control	Sistema de comunicación BUS dañado por cortocircuito	Alto	Correr a falla				

	Modo de falla	Nivel riesgo	Tipo tarea	Descripción tarea	Tipo variable	Valor	Recursos
	Contactos auxiliares del contactor dañados por falla en sus mecanismos	Medio	Correr a falla				
	Puertos de salida dañados por corrosión	Alto	Rediseño	Diseñar una nueva disposición del gabinete			
	Cables de salida dañados por corrosión	Alto	Rediseño	Diseñar una nueva disposición del gabinete			
Mantener el pH del permeado entre 6 y 9	Medidor de pH dañado por uso	Muy alto	Correr a falla				
	Medidor de pH descalibrado por uso	Medio	Reacondicionamiento	Calibrar el sensor de pH	Mes	1	Operador de planta y soluciones de calibración
	Bomba con presencia de aire en la tubería de succión por válvulas defectuosas	Medio	Cambio	Cambiar de válvulas	Año	2	Operador de planta, hta y kit de válvulas

ítem	Equipo	Actividad de mantenimiento	Diario	7 días	30 días	3 meses	6 meses	1 año	2 años	Monitoreo condición
22	Bomba de desagüe	Revisión de las condiciones de funcionamiento de la bomba	X							
		Inspección posibles fugas, ruidos, vibraciones y excesiva temperatura	X							
		Revisión de la posición y estado de la malla de la bomba		X						
		Revisión y ajuste de todos contactos de los accionamientos y conexión de la bomba						X		
23	Gabinete eléctrico	Revisión termográfica de los gabinetes eléctricos y componentes				X				
		Limpieza de polvo en los equipos								X
24	Bomba de mezclas	Revisión de las condiciones de funcionamiento de la bomba		X						
		Inspección posibles fugas, ruidos, vibraciones y excesiva temperatura		X						
		Revisión y ajuste de todos contactos de los accionamientos y conexión de la bomba						X		

9. Stock de repuestos y rediseños

Durante el desarrollo del RCM para los equipos críticos, muchas tareas resultaron en el ítem “correr a falla” y otros en “rediseño. Esto significa que en algunos casos es mejor tener el equipo o repuesto disponibles en planta y en otros es necesario adicionar mejoras. A continuación, en la tabla 24 se muestra una lista de los repuestos y equipos que son necesarios mantener en cada planta de tratamiento para minimizar las consecuencias de las fallas.

Tabla 23

Stock de repuestos seleccionados del análisis de RCM y opcionales

Ítem	Descripción	Cantidad	Tiempo
1	Motor eléctrico bomba sumergible	1	Inicio de operaciones
2	Mangueras para conducción de ácidos y accesorios	1	
3	Juego de válvulas bomba de alta presión	1	
4	Juego de retenedores de aceite	1	
5	Juego de retenedores de líquido	1	
6	Sensor pH	1	
7	O-ring para conector de tapa	10	
8	Kit de accesorios PVC-U	20	
9	Soluciones de calibración	3	
10	Compensador de pulsaciones	1	
11	Kit de empaques válvula reguladora de presión	2	
12	Juego de correas bomba de alta presión	4	
13	Kit de desgaste bomba de pre-presión	1	
14	Kit de desgaste bomba de segunda fase	1	
15	Kit de desgaste bomba dosificadora	3	
16	Kit de desgaste bomba de recirculación	5	
17	Rodamientos bomba de pre-presión	2	
18	Rodamientos bomba de segunda fase	2	
19	Rodamientos extractor de sala de máquinas	2	
20	Rodamientos extractor tanque de lixiviados	2	
21	Arena filtros de grava	2	Opcionales
21	Juego de tapas bloque de membranas fase 1	1	
23	Juego de tapas bloque de membranas fase 2	2	
24	Actuador eléctrico para válvulas de control	1	
24	Sensor de nivel tanque lixiviado y CIP	2	

Ítem	Descripción	Cantidad	Tiempo
25	Transmisor de presión 100 bar	1	
26	Transmisor de presión 16 bar	1	
27	Sensor de conductividad	1	

En cuanto a los rediseños, las dos mejoras propuestas tienen que ver con la reconfiguración de la instalación de la parte electrónica de las bombas de ácido por fuera de la cabina de acero inoxidable, tal como se ve en la figura 31 y con la instalación de un accesorio antirremolino como se muestra en la figura 30. En el caso de la bomba dosificadora, paralelamente al desarrollo de este trabajo, el fabricante C-deg en su cada matriz en Alemania empezó a realizar dichos cambios y por ello que se presenta a manera de información.

Figura 30.

Accesorio antirremolino para tanque de permeado del CIP



Nota: tomado de <https://www.andreuhnos.com.ar/productos/tomas-de-agua-antirremolino-302>

Figura 31.

Reubicación de la bomba dosificadora en cabina



10. Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo permitió la generación de un plan de mantenimiento para todos los equipos que forman parte de las plantas de tratamiento de lixiviado y aguas residuales del fabricante C-deg GmbH. Dicho plan priorizó la estrategia del RCM sobre aquellos equipos establecidos como críticos, los cuales corresponden principalmente a dispositivos de movimiento rotativo sin respaldo y equipos de manejo de productos químicos peligrosos. Muchas de las nuevas tareas de mantenimiento generadas están enfocadas al cambio preventivo de partes y en el establecimiento de un stock mínimo de equipos y repuesto para minimizar las consecuencias de las fallas. Del mismo modo, se establecieron actividades predictivas tales como el análisis de vibraciones, termografía y la revisión de la resistencia de aislamiento de algunos equipos. Adicionalmente se propusieron modificaciones en algunos elementos tales como la configuración de ubicación de las bombas dosificadoras de ácidos y en la succión del tanque del sistema CIP. El plan de mantenimiento desarrollado en esta monografía representa una base sólida para la consecución de los objetivos de confiabilidad y disponibilidad requeridos en el plan de negocio de cada organización que sea propietaria de una de las plantas de C-deg.

11. Recomendaciones

El carácter dinámico de la metodología del RCM supone la necesidad de una constante retroalimentación ante los nuevos cambios y hallazgos en los procesos de operación y mantenimiento que permitan su mejoramiento continuo. Lograr poner en marcha el plan de mantenimiento presentado en este documento, implica la necesidad de conformación de un equipo de trabajo con el suficiente entrenamiento para su implementación y sostenimiento. Se debe tener en cuenta que los cambios y beneficios que trae los procesos de RCM a cualquier organización no son inmediatos y por ello requiere el esfuerzo y compromiso de todo el personal involucrado.

Referencias bibliográficas

García, J., Ferrer, C. y Albarrán, F. (2008). Tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU por procesos de membranas. Redisa 2008. Conferencia llevada a cabo en el I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Castellón, España.

García, S. (2003). Organización y gestión integral del mantenimiento. Díaz de Santos.

González, G. y Quevedo, R. (2016). Modelo de mantenimiento preventivo para planta de embotellado Aje Colombia con prueba piloto en sistema de ósmosis inversa de la línea 03 centrado en confiabilidad (tesis de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

International Electrotechnical Commission (2009). Application guide - Reliability centred maintenance. (IEC-60300-3-11).

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2015). Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Resolución 631 de 2015.

Moubray, J. (2004). Mantenimiento Centrado en confiabilidad RCM II. Aladon Ltd.

Ortiz, D. (2017). Mantenimiento centrado en confiabilidad-guía práctica. Ortiz Ruiz.

Ortiz, D. (2021). Modelo de trabajo hoja de RCM en Excel. Clase de mantenimiento centro en confiabilidad. Cohorte XII. Barranquilla

- Paredes, F. (2008, septiembre). ¿TPM, RCM o ambos?. LM center. <http://www.imc-peru.com/articulos/RCMyTPM.pdf>.
- Parra, C. y Crespo, A. (2012). Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos. Ingeman.
- Quezada, M. (2014). Plan para la implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en plantas de tratamientos de agua potable (tesis de pregrado). Universidad Estatal de Milagro, Milagro, Ecuador.
- Romero, E. (2011). Plan de mantenimiento de las instalaciones IDAS El Atabal (Málaga) (tesis de pregrado). Universidad de Málaga. Málaga, España.
- Suzuki, T. (ed.). (1997). TPM en industrias de proceso. Productivity press
- The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space (2011). A Guide To The Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard (SAE JA1012).