

**DISEÑO DE UN PLAN PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO
CENTRADO EN CONFIABILIDAD DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUA RESIDUAL DE LA EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE AGUAZUL
CASANARE**

CÉSAR ALDRÚAL GALLEGO ALFONSO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2023**

**DISEÑO DE UN PLAN PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO
CENTRADO EN CONFIABILIDAD DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUA RESIDUAL DE LA EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE AGUAZUL
CASANARE**

CÉSAR ALDRÚAL GALLEGO ALFONSO

Director:

Elías Hernán Cruz Salamanca

Especialista en Gerencia de Mantenimiento

**Trabajo presentado como requisito parcial para obtener el título de Especialista en
Gerencia de Mantenimiento**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2023**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D. C., junio de 2023.

AGRADECIMIENTOS:

En este momento significativo al finalizar mi especialización y presentar esta monografía, quiero tomar un momento para expresar mi más sincero a toda mi familia. Han sido una parte integral de este viaje académico y su apoyo ha sido invaluable para el éxito de esta investigación.

A mis mentores, quiero agradecerles por su guía experta y dedicación a mi crecimiento académico. Su experiencia y conocimientos compartidos han sido fundamentales para el desarrollo de esta monografía. Sus comentarios y sugerencias han enriquecido mi trabajo y han contribuido a su calidad. Estoy enormemente agradecido por su tiempo y compromiso en ayudarme a alcanzar mis metas académicas.

DEDICATORIA:

A mi esposa e hijos, gracias por su apoyo incondicional durante este tiempo. Su aliento, palabras de ánimo y comprensión han sido fundamentales para mantenerme motivado en los momentos de cansancio y duda. Su fe en mí ha sido un faro de luz que me ha impulsado a seguir adelante.

A mi madre, su amor, sacrificio y constante apoyo han sido el motor de mi perseverancia. Gracias por creer en mí y por ser mi mayor fuente de inspiración. Este logro es también suyo, y quiero expresar mi gratitud eterna por todo lo que ha hecho por mí.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	12
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
1.4. OBJETIVOS.....	17
1.4.1. Objetivo general.....	17
1.4.2. Objetivos específicos.....	17
2. MARCO TEÓRICO.....	19
2.1. MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM).....	19
2.2. AGUAS RESIDUALES.....	21
2.3. TRATAMIENTO FÍSICO QUÍMICO DEL AGUA.....	22
2.4. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	24
3. DISEÑO METODOLÓGICO.....	29
4. EQUIPOS CRÍTICOS DE LA PTAR DE ACUERDO CON LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS POR LA METODOLOGÍA DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD.....	32
5. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS DE LA PLANTA OBJETO DE ESTUDIO.....	36
6. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD PARA LOS EQUIPOS CRÍTICOS DE LA PTAR.....	44
6.1. SOPLADORES ELÉCTRICOS.....	44
6.2. DECANTADORES DE AGUA SUPERFICIAL.....	46
6.3. BOMBAS DE EXTRACCIÓN DE LODOS.....	51
6.4. SISTEMA DE CONTROL PLC.....	56
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	63
7.1. CONCLUSIONES.....	63
7.2. RECOMENDACIONES.....	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
ANEXOS.....	68
Puesta en marcha de los sopladores.....	68
Funcionamiento de los sopladores.....	70
Desconexión de los sopladores.....	71
Funcionamiento de los sopladores en velocidad reducida.....	71

Operación en alternativa a velocidad baja o alta.....	72
Puesta en marcha de las bombas de lodos.....	74

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Fases del mantenimiento centrado en la confiabilidad.....	20
Tabla 2. Etapas de tratamiento de aguas residuales.....	28
Tabla 3. Inventario de equipos de la PTAR.....	32
Tabla 4. Códigos asignados a las ubicaciones.....	34
Tabla 5. Clasificación de los equipos	35
Tabla 6. Histórico de fallas de los equipos.....	36
Tabla 7. Criterios para la ponderación de las fallas de los equipos.....	38
Tabla 8. Clasificación de los equipos según la criticidad de las fallas.....	40
Tabla 9. Equipos críticos de la PTAR de Aguazul.....	42
Tabla 10. Especificaciones de los sopladores.....	44
Tabla 11. Ficha técnica del decantador	48
Tabla 12. Ficha técnica del sistema de bombeo	52
Tabla 13. Operaciones de mantenimiento de las bombas de lodos	54
Tabla 14 Indicaciones para la inspección.....	54
Tabla 15 Plan de mantenimiento optimizado PTAR	60
Tabla 15 Plan de mantenimiento optimizado PTAR (Continuación).....	61
Tabla 15 Plan de mantenimiento optimizado PTAR (Continuación).....	62
Tabla 15 Plan de mantenimiento optimizado PTAR (Continuación).....	62

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización de Aguazul en Casanare y en Colombia.....	15
Figura 2. Fases para aplicación de la metodología.....	30
Figura 3. Equipos con mayores frecuencias de falla	38
Figura 4. Resumen de clasificación de los equipos según su criticidad de falla	42
Figura 5. Dispositivos de control.....	45
Figura 6. Decantador de agua superficial.	47
Figura 7. Componentes del decantador	48
Figura 8. Disposición del sistema de extracción de lodos.....	52
Figura 9. Estructura de la bomba sumergible.....	53
Figura 10. Disposición del sistema de control de la PTAR de Aguazul	57
Figura 11. Esquema general de implementación de RCM.....	59

RESUMEN

En este trabajo se diseña un plan de gestión del mantenimiento centrado en confiabilidad para la planta de tratamiento de aguas residuales de la Empresa de Servicios Públicos de Aguazul, Casanare. Para ello, se identifican los equipos críticos de la PTAR de acuerdo con los criterios establecidos por la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad, se establece la situación actual de los equipos críticos de la planta objeto de estudio y se aplica la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad a los equipos críticos de la PTAR.

El trabajo se encuentra organizado en seis capítulos; en el primero se detalla el problema de investigación, se explican las razones que justifican este trabajo y se especifican los objetivos a desarrollar. En el segundo capítulo se desarrolla el marco teórico que se requirió para poder desarrollar esos objetivos, que fue la base que permitió el diseño metodológico, objeto del tercer capítulo. En el cuarto capítulo se identifican los equipos críticos de la instalación, y en el quinto se describe la situación actual de esos equipos. El mantenimiento que se centra en la confiabilidad se desarrolla en el sexto capítulo, mientras que las conclusiones se resumen en el último capítulo junto con las recomendaciones correspondientes.

Palabras claves: mantenimiento basado en la confiabilidad, tratamiento de aguas residuales, equipos críticos, Aguazul.

ABSTRACT

This work designs a reliability-centered maintenance management plan for the wastewater treatment plant of Aguazul Public Utilities Company in Casanare. To achieve this, the critical equipment of the wastewater treatment plant is identified according to the criteria established by the reliability-centered maintenance methodology. The current situation of the critical equipment in the plant under study is determined, and the reliability-centered maintenance methodology is applied to these critical equipments of the wastewater treatment plant.

The work is organized into six chapters. The first chapter details the research problem, explains the justifications for this work, and specifies the objectives to be developed. The second chapter presents the theoretical framework required to achieve these objectives, which served as the basis for the design of the methodology discussed in the third chapter. In the fourth chapter, the critical equipment of the facility is identified, and the fifth chapter describes the current situation of these equipment. The reliability-centered maintenance is developed in the sixth chapter, while the conclusions are summarized in the last chapter along with the corresponding recommendations.

Keywords: reliability-centered maintenance, wastewater treatment, critical equipment, Aguazul.

INTRODUCCIÓN

La disposición final de los residuos sólidos que el ser humano genera a diario se ha convertido en un problema creciente, en la misma medida en que la población humana también ha aumentado de manera acelerada, especialmente a partir de la segunda mitad del Siglo XX (Pilapanta, 2022). Esta situación ha llevado a que uno de los principales retos que enfrentan los profesionales de la ingeniería, de la salud y de la gestión pública se origina en la diseminación de las excretas vertidas en el sistema de agua y el suelo, que generan riesgos de enfermedades transmisibles (Iyer, et al., 2022). Este asunto es de especial preocupación en los municipios más pobres de países en vía de desarrollo, como sucede en Colombia.

El problema se origina en que las aguas residuales o aguas negras consisten en una combinación de elementos en las que se incluyen sustancias contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica; estos contaminantes pueden encontrarse tanto disueltos como en suspensión dentro del líquido. Un sistema de alcantarillado se encarga de recolectar estas aguas residuales, cuya composición en términos de contaminantes varía dependiendo de su origen. (Rivera, et al., 2021).

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) es una instalación diseñada con el propósito fundamental de eliminar por completo o en parte los elementos contaminantes presentes en el agua. Para lograr esta remoción de sustancias dañinas, se emplean diversos métodos y procedimientos, con el objetivo de cumplir con los requisitos específicos de tratamiento de manera rentable y altamente efectiva.

Los biosólidos son desechos de naturaleza sólida, semisólida o líquida, que son fácilmente depositados en el fondo y tienen la capacidad de fluir. Están compuestos principalmente por materia orgánica y contienen un alto contenido de humedad. Estos residuos se generan como un subproducto en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Dependiendo de su origen y composición, los biosólidos pueden ser utilizados como materias primas en diversas aplicaciones, como la fabricación de ladrillos de cerámica, la producción de hormigón y mortero, la generación de biogás y el proceso de vermicompostaje, entre otras posibilidades.

El presente trabajo se desarrolló a lo largo de siete capítulos, y en el primero de ellos se precisa el alcance del problema objeto del mismo. El marco teórico en el que se plantean los conceptos necesarios para cumplir los objetivos del estudio son objeto del segundo capítulo; estos dos primeros capítulos conducen el diseño metodológico del trabajo, el cual se presenta en el tercer capítulo. Los capítulos 4, 5 y 6 corresponden al desarrollo de cada uno de los objetivos, es decir, presentan los hallazgos del trabajo de campo desarrollado con base en los referentes teóricos y de acuerdo con la metodología definida. Por último, el séptimo capítulo recoge las conclusiones del estudio frente a la pregunta de investigación formulada en el momento en que se inició el desarrollo del trabajo, así como las recomendaciones que se derivan del trabajo de campo.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido al aumento de la población global y la consiguiente generación de desechos, es crucial llevar a cabo una gestión adecuada de estos residuos, entre los cuales se incluyen los biosólidos. Estos últimos son subproductos generados por las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y su manejo adecuado resulta de gran importancia. En la actualidad existen varias alternativas para la extracción y disposición de los biosólidos que se producen en una PTAR mediante enfoques sostenibles, lo que hace posible aprovechar los biosólidos de manera beneficiosa, como por ejemplo en la producción de materiales de construcción, lo cual promueve la mejora de las propiedades físicas y químicas del producto final. Asimismo, se puede emplear en la fabricación de biogás y en el proceso de vermicompostaje, brindando oportunidades adicionales de utilización. (Samaniego, et al., 2021).

A pesar de ese potencial, la Empresa de Servicios de Aguazul, ESPA S.A. E.S.P. es la responsable de garantizar que las aguas residuales cumplan con las características físico-químicas contempladas en la normativa ambiental vigente, de manera que puedan ser vertidas a las fuentes hídricas. Por esa razón, si la PTAR realiza vertimiento de aguas residuales con parámetros por fuera de los requisitos ambientales establecidos en la normativa, la ESPA queda expuesta a sanciones económicas que pueden afectar a la administración municipal, incluyendo el riesgo de no giro de regalías petroleras.

Aún más grave que ese aspecto económico, la incorrecta operación de esta planta conduciría a que el Río Únete recibiera tales residuos contaminados, lo cual deterioraría la calidad necesaria para la supervivencia de peces y otras especies que habitan en ese ecosistema, así como la calidad del agua que recibirían los habitantes de la región ubicados aguas debajo del municipio de Aguazul (ver localización en la Figura 1).

Figura 1. Localización de Aguazul en Casanare y en Colombia



Nota: Gobernación de Casanare (2019)

Actualmente, la ESPA realiza mantenimiento del tipo correctivo, lo que le impide contar con una estrategia que permita garantizar la disponibilidad de la PTAR. Esta situación hace que, además de los riesgos ambientales y económicos arriba citados, la empresa incurra en elevados costos de mantenimiento y operación.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿De qué forma se puede aplicar el modelo de mantenimiento centrado en confiabilidad en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Empresa de Servicios Públicos de Aguazul, Casanare?

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La situación que enfrenta la población del casco urbano y de su vecindario rural en el municipio de Aguazul debido a la inadecuada gestión del mantenimiento de su PTAR amerita que se apliquen criterios de confiabilidad, los cuales redundarán en mejor calidad de vida de todos los afectados, así como en el mejoramiento de la situación económica de la Empresa de Servicios Públicos del municipio.

Usualmente los criterios propios de Mantenimiento Basado en la Confiabilidad (conocido en la ingeniería por sus siglas Reliability Centred Maintenance o RCM) se aplican a instalaciones industriales; esa metodología permite la optimización de los procedimientos de mantenimiento para reducir el tiempo de inactividad de emergencia, disminuir la duración del ciclo de mantenimiento y reducir significativamente los costos, como lo registran Zeinalnezhad et al. (2020). En cambio, son escasos los trabajos desarrollados en instalaciones construidas para la prestación de servicios públicos, como sucede en el presente estudio.

Para el desarrollo de su objetivo central, el trabajo debe incluir tres fases, como son la identificación de los equipos críticos de la PTAR de acuerdo con los criterios establecidos por la metodología de mantenimiento que se centra en la confiabilidad, el diagnóstico de la

situación actual de los equipos críticos de la planta objeto de estudio y la aplicación de la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad a los equipos críticos de la PTAR. Lo anterior quiere decir que más allá de la indagación teórica, el trabajo incluirá un sólido trabajo de campo, con la intención de asegurar la utilidad práctica de los resultados, así como de sus conclusiones y recomendaciones.

En la medida en que se culmine el proceso investigativo, este trabajo pretende aplicar en un caso práctico y de interés social los aprendizajes del programa de Especialización en Gerencia de Mantenimiento, con lo cual busca contribuir al mejoramiento de las condiciones de vida de los habitantes del municipio de Aguazul y del ecosistema, que actualmente se ven impactados de forma negativa, como consecuencia de la falta de planeación y el carácter de emergencia constante que caracteriza la operación de la PTAR.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general.

Diseñar un plan de gestión del mantenimiento centrado en confiabilidad para la planta de tratamiento de aguas residuales de la Empresa de Servicios Públicos de Aguazul, Casanare

1.4.2. Objetivos específicos.

1. Identificar los equipos críticos de la PTAR de acuerdo con los criterios establecidos por la metodología de mantenimiento que se centra en la confiabilidad.
2. Establecer la situación actual de los equipos críticos de la planta objeto de estudio.

3. Aplicar la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad a los equipos críticos de la PTAR.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM)

Este método de mantenimiento se enfoca en la confiabilidad del equipo y busca maximizarla durante su ciclo de operación, por medio de un sistema de mantenimiento preventivo a través del cual se detectan las fallas incipientes y se corrigen antes de tengan consecuencias mayores. También es descrito como una filosofía de aseguramiento de la calidad del mantenimiento, y se basa en siete preguntas:

1. ¿Cuáles son las funciones?
2. ¿De qué forma pueden fallar?
3. ¿Qué causa que se presente una falla?
4. ¿Qué síntomas se presentan cuando se presenta la falla?
5. ¿Qué consecuencias tiene la falla?
6. ¿Qué puede hacerse para evitar las fallas?
7. ¿Qué consecuencias tiene el hecho de no prevenir las fallas?

A su vez, son cuatro los principios básicos de este mantenimiento:

1. Orientación a la función del equipo: el mantenimiento que se centra en la confiabilidad busca la preservación de la función del sistema o del equipo y no solamente la factibilidad operacional; por ejemplo, la redundancia de la función mediante equipos alternos o de respaldo mejora la confiabilidad, pero incrementa el costo tanto en términos de inversión como de operación.
2. Enfoque en el sistema: el mantenimiento que se centra en la confiabilidad busca garantizar la función del sistema más que la función de los componentes que lo integran. Esto quiere decir que, si existe una forma diferente para lograr esa función, puede ser una solución más recomendable que la reparación de los componentes.

3. Centrado en la fiabilidad: le otorga una importancia alta a la relación entre el ciclo de vida del sistema y la estadística de fallas, por lo que no solamente tiene en cuenta la tasa de falla sino la probabilidad de que se presenten fallas a edades específicas de cada sistema.
4. Reconoce las limitaciones en el diseño: reconoce que los cambios en la confiabilidad son consecuencia del diseño más que del mantenimiento, es decir, el mantenimiento por sí mismo no es capaz de aumentar la fiabilidad propia de cada alternativa de diseño.

El proceso consta de 10 fases cuando se trata del caso de las plantas de proceso, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Fases del mantenimiento centrado en la confiabilidad

Fase	Descripción
1	Seleccionar el sistema y recolección de datos
2	Diagrama funcional de bloques
3	Análisis de fallas funcionales
4	Modelos de fallas y estudio de efectos
5	Analizar la criticidad
6	Análisis del árbol de decisión lógica
7	Selección de tareas
8	Procedimiento en detalle: actividades para el mantenimiento
9	Análisis post ejecución, índices de desempeño del mantenimiento
10	Revisar y actualizar

Nota: Vishnu y Regikumar (2019).

Cada fase está diseñada para que el desarrollador considere y responda las preguntas importantes delineadas en el proceso de MCC (en inglés, RCM). Las tareas y procedimientos desarrollados son los mejores que se pueden escribir con los recursos y el conocimiento disponible. En las etapas 1 a 3 del proceso, el responsable del desarrollo debe recopilar información detallada sobre el sistema y sus funciones, a fin de tomar decisiones óptimas

respecto a las posibles fallas que podrían ser más preocupantes para la aplicación del sistema planificado. Durante las etapas 4 a 8, el desarrollador examina todos los posibles modos de falla que podrían causar la pérdida de la funcionalidad del sistema, y determina cuáles representan el mayor riesgo. Estos modos de falla dominantes se analizan luego utilizando un árbol de lógica de decisión para determinar la mejor estrategia para gestionar el riesgo asociado. Para llevar a cabo este análisis, se realiza una encuesta a expertos en mantenimiento, producción y gestión. Estos pasos son críticos dentro del proceso de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés).

En la etapa 8, se combinan las descripciones de las tareas resultantes de aplicar la lógica de decisión del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) para crear procedimientos detallados y precisos. Durante este proceso, se analiza cuidadosamente la mano de obra requerida, los materiales necesarios y la capacitación pertinente. Se busca establecer una secuencia lógica de pasos con el objetivo de desarrollar el mejor procedimiento posible y determinar el nivel adecuado de mantenimiento necesario para llevar a cabo dicho procedimiento. (Vishnu & Regikumar, 2019).

2.2. AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales o aguas negras son una combinación de sustancias contaminantes, tanto de origen orgánico como inorgánico, que pueden encontrarse disueltas o suspendidas en el líquido. Estas aguas son recolectadas a través de un sistema de alcantarillado y la cantidad de contaminantes presentes varía según su origen. Algunos

ejemplos comunes de aguas residuales son las de tipo sanitario o municipal, las agropecuarias y las industriales.

Los sólidos presentes en las aguas residuales pueden clasificarse en dos categorías, según su condición física o composición (Marín & Osés, 2019). Uno de los principales desafíos en los puntos de descarga radica en la presencia de estos sólidos en el agua, los cuales deben ser eliminados durante el proceso de tratamiento.

2.3. TRATAMIENTO FÍSICO QUÍMICO DEL AGUA

El tratamiento químico generalmente implica agregar una cierta cantidad de inhibidor de incrustaciones e inhibidor de corrosión al agua adicional para evitar que se formen incrustaciones y la corrosión del sistema de agua. Entre los productos químicos para el tratamiento de aguas industriales, los inhibidores de incrustaciones y los inhibidores de corrosión son los productos químicos más utilizados, que son importantes para prevenir la formación de incrustaciones en los equipos, reducir el consumo de energía, prolongar la vida útil de los equipos y garantizar el funcionamiento seguro de los mismos (Díaz, et al., 2019).

Las tecnologías de tratamiento físico del agua incluyen principalmente el tratamiento magnético, el tratamiento electrostático, el tratamiento de separación por membrana, el tratamiento fotoquímico y el tratamiento ultrasónico. Comparado con el método químico, el método físico es un recién llegado en la tecnología de tratamiento de agua. Esta tecnología está menos restringida por el medio ambiente y los microorganismos, y generalmente tiene las características de protección ambiental, ahorro de energía, operación conveniente, mantenimiento y bajo costo. Estas ventajas hacen que la tecnología tenga un gran potencial de desarrollo y un amplio espacio de aplicación (Huarhua & Vera, 2022).

Los procesos para tratar aguas residuales se refieren en muchos casos a la separación de partículas, debido a que la mayoría de los contaminantes en las aguas residuales existen en forma de partículas o coloidales o se transforman en estas formas durante el proceso de tratamiento. Estas observaciones conducen a la estrategia para tratar esas aguas mediante eliminación de partículas y las partículas coloidales en el paso principal y, posteriormente, tratar los compuestos solubles que deben transformarse en partículas coloidales y partículas antes de que se separen (Obotey & Rathilal, 2020).

La reutilización de aguas residuales se enfatiza cada vez más como una estrategia para el uso racional de los recursos limitados de agua dulce y como un medio para salvaguardar el medio ambiente acuático en deterioro debido a la eliminación de aguas residuales. Aunque las aguas residuales tratadas secundaria y terciariamente se pueden descargar en las aguas receptoras, no se pueden usar para fines de reutilización no potable sin un tratamiento adicional (Blair, et al., 2019).

El grado de tratamiento requerido en las instalaciones individuales para tratar y recuperar aguas residuales varía según las cargas existentes en las aguas residuales, la aplicación de reutilización específica y los requisitos de calidad del agua asociados. El sistema de tratamiento más simple involucra procesos de separación sólido-líquido tales como coagulación-floculación, filtración, sedimentación y desinfección, mientras que los sistemas de tratamiento más complejos involucran una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos tales como adsorción de carbón activado, extracción de aire, intercambio iónico, filtración por membrana (Hairrom, et al., 2021).

Últimamente, los procesos físico-químicos han despertado el interés de los investigadores no solo para lograr la calidad necesaria de los efluentes industriales para los diferentes fines de reutilización del agua, sino también como etapa de pretratamiento previo al tratamiento biológico si se trata de aguas con alta carga de residuos. Por ejemplo, debido a la alta demanda química de oxígeno (DQO), el contenido de amonio y N y la presencia de compuestos tóxicos como los metales pesados, el tratamiento biológico directo de los lixiviados de los vertederos da como resultado una baja eficiencia de eliminación. El lixiviado de vertedero pretratado se sometió a tratamiento biológico en un tanque de aireación operado en modo discontinuo alimentado en presencia y ausencia de carbón activado en polvo como adsorbente.

2.4. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se emplean diversos procesos para lograr la eliminación de contaminantes, buscando alcanzar los requisitos específicos de tratamiento de manera rentable y eficiente. El principal objetivo de las PTAR es purificar las aguas residuales (removiendo la mayoría de los contaminantes o al menos reduciéndolos) y tratar los lodos generados durante el proceso. El efluente tratado (agua residual limpia) se utiliza principalmente para riego o se puede devolver a cuerpos de agua, actuando como un agente regenerador (Santoyo, 2022).

Existen cuatro metas específicas en el tratamiento de aguas residuales:

- Prevenir la contaminación del cuerpo receptor donde se descargan.

- Producción de efluentes con propiedades adecuadas para su reutilización.
- Cumplir con las regulaciones ambientales actuales.
- Garantizar la protección adecuada de la flora y fauna.
- Tratamiento previo. El propósito fundamental de esta fase es salvaguardar las etapas subsiguientes del proceso de tratamiento. Es una etapa crucial para prevenir inconvenientes posteriores en la planta de tratamiento. Durante esta etapa se llevan a cabo diversas etapas para la separación de los sólidos presentes en el agua, tales como la eliminación de sólidos de gran tamaño, desbastar, cribar, tamizar, desarenar, desengrasar y preparar, entre otras técnicas.
- Tratamiento primario. Una vez completada la etapa preliminar del tratamiento de aguas residuales, se procede a realizar la sedimentación de los sólidos en suspensión. Estos sólidos se retienen en un tanque durante un periodo de tiempo de 0.5 a 3 horas o incluso más, lo que permite que aproximadamente del 40 al 65% de estos sólidos se depositen en el fondo del tanque. Posteriormente, se extraen utilizando colectores mecánicos, los cuales los aglomeran formando lodos.

La configuración y funcionamiento de este tratamiento primario es crucial para reducir los residuos que se descargaban en los cuerpos receptores. Una vez que se ha eliminado la fracción sólida de origen mineral del agua, esta se dirige a un depósito donde los materiales orgánicos se sedimentan o depositan, y luego se eliminan adecuadamente. En algunas plantas de tratamiento, se aplican procesos químicos de floculación y coagulación en el tanque de sedimentación, lo cual acelera la velocidad de sedimentación.

La coagulación promueve la unión y aglomeración de las partículas para formar fragmentos más grandes, lo que acelera su precipitación. Los coagulantes actúan como catalizadores para facilitar este proceso. Algunas partículas, como los coloides, son pequeñas y tienen una sedimentación más lenta, lo que dificulta su eliminación mediante filtros. Para este procedimiento se utilizan sustancias químicas como el Cloruro Férrico, el Sulfato de Aluminio y los polielectrolitos.

La floculación implica el estímulo de la masa coagulada para promover el crecimiento y aglomeración de flóculos recién formados, lo que aumenta su tamaño y peso, favoreciendo su decantación. Este proceso se facilita mediante una mezcla suave que proporciona las condiciones necesarias para que los flóculos se unan progresivamente; si la agitación es demasiado intensa, los flóculos se romperán y reducirá la posibilidad de que vuelvan a unirse y alcancen el tamaño adecuado. La floculación provoca la unión de los sólidos en suspensión, permitiendo eliminar aproximadamente el 80% de las partículas sólidas suspendidas.

- Tratamiento secundario. Este tratamiento busca la eliminación de los residuos sólidos que no se eliminaron en las fases previas y la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno.

En esta etapa, se emplea un proceso biológico que promueve la descomposición de la materia orgánica mediante la actividad bacteriana, acelerando su descomposición. Para ello, el efluente tratado en la etapa preliminar se transfiere a depósitos o tanques donde se mezcla con lodos activados, que contienen microorganismos. Estos tanques están equipados con sistemas de burbujeo y agitación que garantizan condiciones óptimas para el crecimiento de los microorganismos.

Después de esta etapa, se lleva a cabo una separación de los lodos mediante un proceso de decantación en tanques cilíndricos con forma cónica. Esto permite obtener un agua con una menor concentración de residuos. Para aumentar la oxidación de los lodos, estos son recirculados al tanque.

Con el fin de cumplir con las normativas establecidas, es necesario eliminar la biomasa generada durante este proceso de tratamiento. Esta eliminación se logra mediante la sedimentación en estanques y lagunas.

- Tratamiento terciario. Se realiza para reducir la concentración de nutrientes inorgánicos, como nitratos y fosfatos; esta fase se realiza utilizando técnicas para precipitar, filtrar y/o clorar, por lo que se trata de una técnica costosa.

En ocasiones, se recurre al tratamiento terciario para mejorar los efluentes obtenidos del proceso biológico secundario mediante la utilización de un sistema de filtración en arena. Esta técnica contribuye a una mejor eliminación de los sólidos, la demanda bioquímica de oxígeno y los nutrientes suspendidos en el agua.

Una opción más eficiente para este tratamiento terciario consiste en agregar uno o varios estanques de depuración en serie, conectados a la estación convencional de tratamiento. De esta manera, se pueden aprovechar los efluentes generados para su uso en sistemas de riego agrícola. Este enfoque final del tratamiento garantiza una mejora en la calidad del efluente antes de ser descargado en su destino receptor, ya sea un río, lago, mar, u otro cuerpo de agua (De Marco & Lazzaroni, 2022).

Tabla 2. Etapas de tratamiento de aguas residuales.

Etapa	Objetivos del tratamiento
Fase preliminar	<ul style="list-style-type: none">- Remover basuras- Separar arenas- Regular el flujo
Tratamiento primario	Separar material en suspensión
Tratamiento secundario	Separar materiales orgánicos biodegradables
Tratamiento terciario	<ul style="list-style-type: none">- Mejoramiento del efluente de la fase secundaria:- Separar material en suspensión- Separar nutrientes N y/o P)
Desinfección	Suprimir agentes infecciosos
Tratamiento de lodos	<ul style="list-style-type: none">- Generación de lodo adecuado para la eliminación:- Separación del contenido líquido- Producción de lodos estabilizados que se degraden

Nota: De Marco y Lazzaroni (2022)

3. DISEÑO METODOLÓGICO

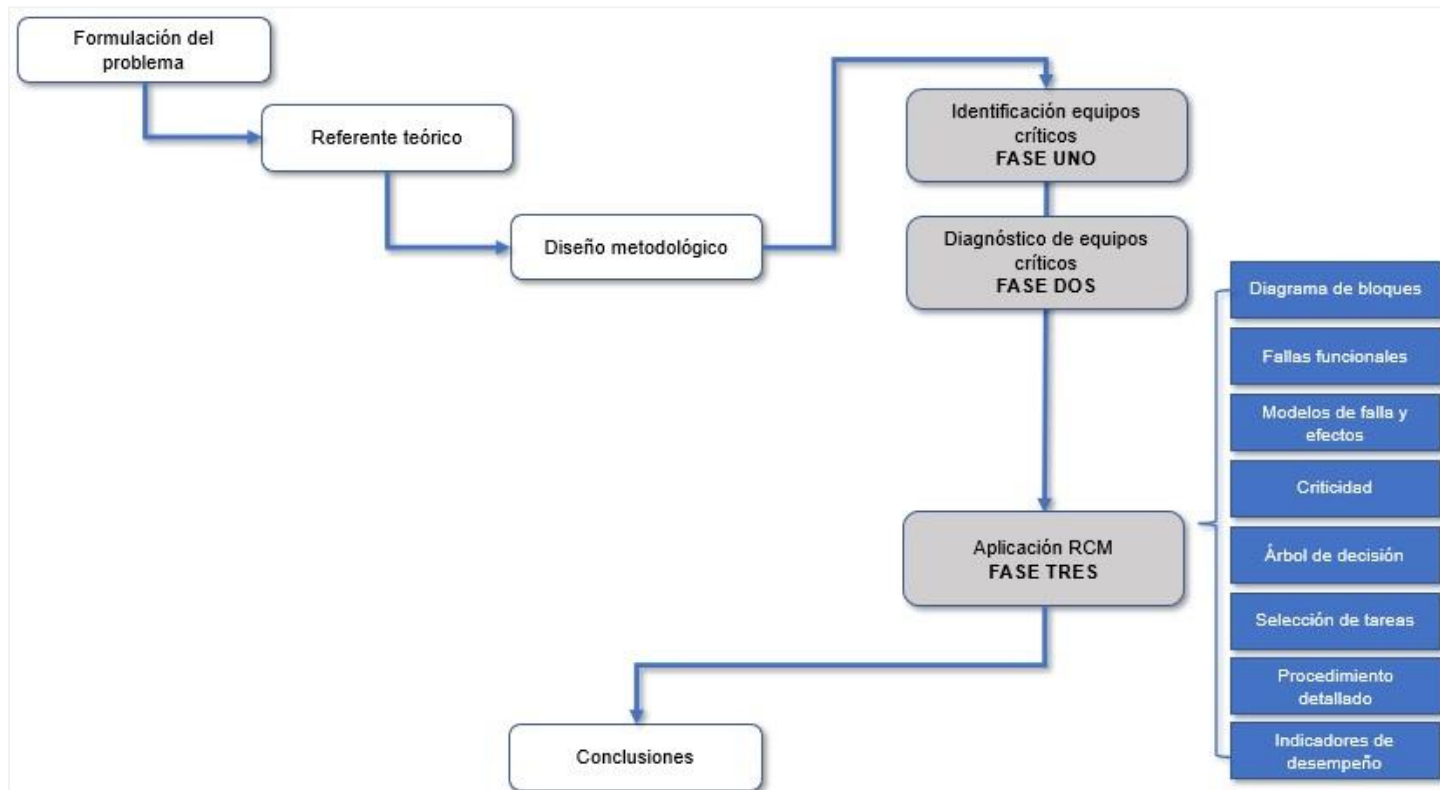
En este capítulo se establece el método que se aplicará para el desarrollo de los objetivos específicos planteados.

Lo primero que se hará será la identificación de los equipos críticos de la PTAR, con base en los criterios que se utilizan en la metodología de mantenimiento que se centra en la confiabilidad; con ese propósito, se elaborará un listado de todos los equipos de la instalación junto con una breve descripción de la función que cumple cada uno. A partir de ese inventario, se podrá establecer cuáles son críticos en la operación y cuales se pueden considerar como auxiliares, teniendo en cuenta que su disponibilidad no afecte de forma directa la operación de la planta de tratamiento de agua.

El segundo objetivo consiste en diagnosticar la situación actual de esos equipos críticos previamente identificados; ese diagnóstico se hará mediante una descripción de la vida útil que tiene cada uno de ellos y de las condiciones de operación en aspectos como su lubricación, desgaste, aspecto exterior, generación de ruido al operar, calentamiento, historial de fallas, historial de reparaciones previas o cualquier otra variable que pueda dar un indicio de las condiciones de operabilidad y confiabilidad del mismo.

Finalmente, se aplicará la metodología de mantenimiento que se centra en la confiabilidad para determinar los procedimientos de mantenimiento detallado que hace parte de esa metodología. En la Figura 2 se muestran las fases a seguir para el desarrollo de esta metodología.

Figura 2. Fases para aplicación de la metodología



Nota: elaboración propia

Para llegar a ese punto se seguirán las 10 fases que se enumeran en la Tabla 1, como son seleccionar el sistema y recolección de datos, la elaboración del diagrama funcional de bloques, el análisis de fallas funcionales, la descripción de los modelos de falla y análisis de consecuencias, análisis de criticidad, el análisis del árbol de decisión lógica, la selección de tareas, el procedimiento detallado de las actividades de mantenimiento, el análisis posterior a la implementación con base en índices de desempeño del mantenimiento, y la revisión y actualización.

Necesariamente estas fases se deben seguir de forma secuencial, dado que se necesita haber terminado una para poder continuar con la siguiente. La primera de esas fases se desarrolla en el siguiente capítulo.

4. EQUIPOS CRÍTICOS DE LA PTAR DE ACUERDO CON LOS CRITERIOS ESTABLECIDOS POR LA METODOLOGÍA DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD

La ESPA S.A. E.S.P. carece de un registro total de los equipos que conforman la PTAR, por lo que se hizo necesario practicar visitas técnicas y realizar el levantamiento de la información de los activos que existen.

Se recopiló y tabuló información de las placas características de los equipos con la siguiente información: modelo, tipo, ubicación física, proceso al cual pertenece y características técnicas, para el caso de motores eléctricos.

En la Tabla 3 se presenta el inventario de equipos; a cada uno se le asignó un código y su ubicación.

Tabla 3. Inventario de equipos de la PTAR

Ítem	Código	Equipo	Ubicación
1	PR-MTP-01	Motor translación puente barredor	PTO
2	PR-MPP-01	Motor pala N° 01 de puente barredor	PTO
3	PR-MPP-02	Motor pala N° 02 de puente barredor	PTO
4	PR-MRA-01	Motor N° 1 rejilla automática	PTO
5	PR-MRA-02	Motor N° 2 rejilla automática	PTO
6	PR-BCA-01	Bomba N° 1 clasificadora de arenas	PTO
7	PR-BCA-02	Bomba N° 2 clasificadora de arenas	PTO
8	PR-TCA-01	Tornillo clasificador de arenas N° 1	PTO
9	PR-AZO-01	Analizador de oxígeno N° 1	TBI
10	PR-AZO-02	Analizador de oxígeno N° 2	TBI
11	PR-DAS-01	Decantador de agua superficial N° 1	TBI
12	PR-DAS-02	Decantador de agua superficial N° 2	TBI

Ítem	Código	Equipo	Ubicación
13	PR-BEL-01	Bomba extracción lodo biológico N° 1	TBI
14	PR-BEL-02	Bomba extracción lodo biológico N° 2	TBI
15	PR-DFA-01	Difusores de aire tanque N° 1	TBI
16	PR-DFA-01	Difusores de aire tanque N° 2	TBI
17	PR-SEL-01	Soplador eléctrico N° 1	SPS
18	PR-SEL-02	Soplador eléctrico N° 2	SPS
19	PR-VIA-01	Válvula de inyección de aire N° 1	SPS
20	PR-VIA-02	Válvula de inyección de aire N° 2	SPS
21	PR-PLC-01	Sistema de control PLC	SPS
22	PR-TEL-01	Tanque espesador de lodos	TLS
23	PR-RBV-01	Rompe bóvedas	TLS
24	PR-DFC-01	Dosificador de Cal	TLS
25	PR-INC-01	Inyector de Cal	TLS
26	PR-MZC-01	Mezclador de Cal	TLS
27	PR-TRC-01	Tornillo transportador de Cal	TLS
28	PR-TRL-01	Tornillo transportador de lodos N°1	TLS
29	PR-TRL-02	Tornillo transportador de lodos N°2	TLS
30	PR-AGP-01	Agitador de polímero N°1	TLS
31	PR-AGP-02	Agitador de polímero N°2	TLS
32	PR-PMQ-01	Bomba dosificadora de químicos N°1	TLS
33	PR-PMQ-02	Bomba dosificadora de químicos N°2	TLS
34	PR-AFC-01	Agitador de floculantes N° 1	TLS
35	PR-AFC-02	Agitador de floculantes N° 2	TLS
36	PR-DHR-01	Deshidratador de lodos de lodos N° 1	TLS
37	PR-DHR-02	Deshidratador de lodos de lodos N° 2	TLS
38	PR-TCL-01	Tablero control de lodos N° 1	TLS
39	PR-TCL-02	Tablero control de lodos N° 2	TLS
40	PR-TCA-01	Tablero control falsificador de arenas	PTO
41	PTR-TCR-01	Tablero de control rejilla automática	PTO
42	PR-TCP-01	Tablero de control puente barredor	PTO

Nota: elaboración propia

Como se observa, en la planta de tratamiento existe un total de 42 equipos; las ubicaciones indicadas corresponden a los códigos que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Códigos asignados a las ubicaciones

Código	Ubicación	Cantidad de equipos
PTO	Pretratamiento	11
TBI	Tratamiento biológico	8
SPS	Sopladores	5
TLS	Tratamiento de lodos	18

Nota: elaboración propia

La mayor cantidad de equipos se ubica en el área de tratamiento de lodos.

Para este inventario se utilizó una codificación que permita su identificación de una forma clara, sencilla y de fácil interpretación y que además relacione el equipo con su ubicación en el proceso. Para ello, se utilizaron las recomendaciones de norma ISO 14224 “Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural-recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos”.

Se implementó un código alfanumérico compuesto de tres niveles: XX-YYY-NN. Teniendo en cuenta que la PTAR no es la única planta que opera la ESPA S.A. E.SP. y con el ánimo que la empresa continúe aplicando las recomendaciones de este documento a sus demás activos, se utilizara el primer nivel para designar la planta. Para este caso en particular, la codificación asignada corresponde a PR, Planta de tratamiento de aguas residuales.

El segundo nivel corresponde a la clase de equipo y se representa por tres caracteres del alfabeto. En la Tabla 5 se muestra la codificación asignada.

Tabla 5. Clasificación de los equipos

Nivel según tipo de equipo	Clase de equipo
MTP	Motor translación puente
MPP	Motor pala de puente barredor
MRA	Motor rejilla automática
BCA	Bomba clasificadora de arenas
TCA	Tornillo clasificador de arenas
DAS	Decantador de agua superficial
BEL	Bomba extracción lodo biológico
DFA	Difusores de aire tanque
SEL	Soplador eléctrico
VIA	Válvula de inyección de aire
PLC	Sistema de control PLC
TEL	Tanque espesador de lodos
RBV	Rompe bóvedas
DFC	Dosificador de Cal
INC	Inyector de Cal
MZC	Mezclador de Cal
TRC	Tornillo transportador de Cal
TRL	Tornillo transportador de lodos
AGP	Agitador de polímero
PMQ	Bomba dosificadora de químicos
AFC	Agitador de floculantes
DHR	Deshidratador de lodos de lodos

Nota: elaboración propia

En el tercer nivel, de tipo numérico, se asigna un consecutivo del equipo respecto a su clase.

5. SITUACIÓN ACTUAL DE LOS EQUIPOS CRÍTICOS DE LA PLANTA

OBJETO DE ESTUDIO

Dado que en la empresa no existe un registro sistemático de las fallas que presentan los equipos, se procedió a elaborar una tabla en la que se registra la cantidad de fallas que presentan los equipos de acuerdo con lo que reportaron los operarios encargados de su mantenimiento.

El resultado del levantamiento de esa información se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Histórico de fallas de los equipos

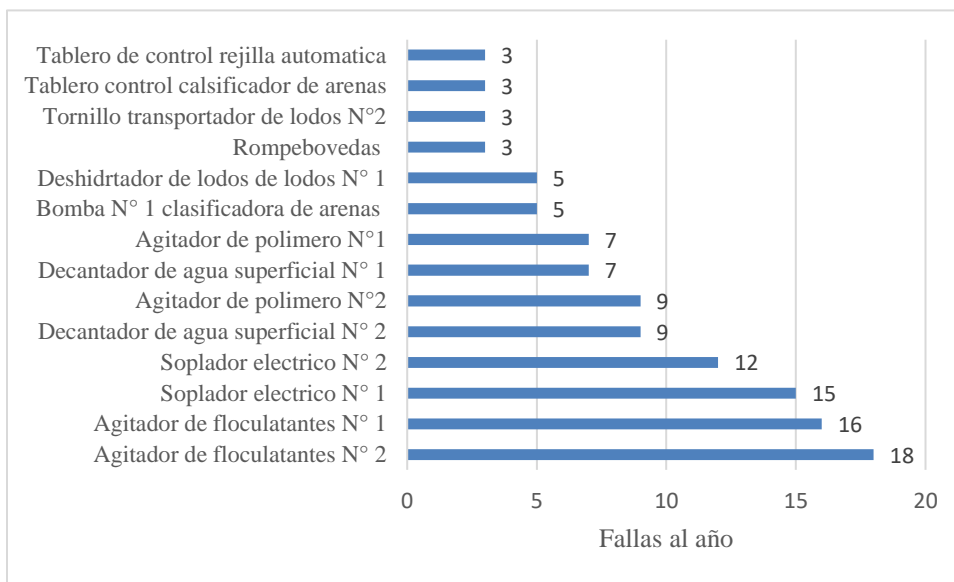
Ítem	Código	Equipo	Número de fallas en el año
1	PR-MTP-01	Motor translación puente barredor	1
2	PR-MPP-01	Motor pala N° 01 de puente barredor	1
3	PR-MPP-02	Motor pala N° 02 de puente barredor	1
4	PR-MRA-01	Motor N° 1 rejilla automática	0
5	PR-MRA-02	Motor N° 2 rejilla automática	0
6	PR-BCA-01	Bomba N° 1 clasificadora de arenas	5
7	PR-BCA-02	Bomba N° 2 clasificadora de arenas	1
8	PR-TCA-01	Tornillo clasificador de arenas N° 1	1
9	PR-AZO-01	Analizador de oxígeno N° 1	0
10	PR-AZO-02	Analizador de oxígeno N° 2	0
11	PR-DAS-01	Decantador de agua superficial N° 1	7
12	PR-DAS-02	Decantador de agua superficial N° 2	9
13	PR-BEL-01	Bomba extracción lodo biológico N° 1	1
14	PR-BEL-02	Bomba extracción lodo biológico N° 2	1
15	PR-DFA-01	Difusores de aire tanque N° 1	0
16	PR-DFA-01	Difusores de aire tanque N° 2	0
17	PR-SEL-01	Soplador eléctrico N° 1	15

Ítem	Código	Equipo	Número de fallas en el año
18	PR-SEL-02	Soplador eléctrico N° 2	12
19	PR-VIA-01	Válvula de inyección de aire N° 1	0
20	PR-VIA-02	Válvula de inyección de aire N° 2	0
21	PR-PLC-01	Sistema de control PLC	2
22	PR-TEL-01	Tanque espesador de lodos	0
23	PR-RBV-01	Rompe bóvedas	3
24	PR-DFC-01	Dosificador de Cal	1
25	PR-INC-01	Inyector de Cal	1
26	PR-MZC-01	Mezclador de Cal	1
27	PR-TRC-01	Tornillo transportador de Cal	2
28	PR-TRL-01	Tornillo transportador de lodos N°1	2
29	PR-TRL-02	Tornillo transportador de lodos N°2	3
30	PR-AGP-01	Agitador de polímero N°1	7
31	PR-AGP-02	Agitador de polímero N°2	9
32	PR-PMQ-01	Bomba dosificadora de químicos N°1	0
33	PR-PMQ-02	Bomba dosificadora de químicos N°2	0
34	PR-AFC-01	Agitador de floculantes N° 1	16
35	PR-AFC-02	Agitador de floculantes N° 2	18
36	PR-DHR-01	Deshidratador de lodos de lodos N° 1	5
37	PR-DHR-02	Deshidratador de lodos de lodos N° 2	1
38	PR-TCL-01	Tablero control de lodos N° 1	1
39	PR-TCL-02	Tablero control de lodos N° 2	1
40	PR-TCA-01	Tablero control falsificador de arenas	3
41	PTR-TCR-01	Tablero de control rejilla automática	3
42	PR-TCP-01	Tablero de control puente barredor	2

Nota: elaboración propia

Como se observa, los equipos que presenta mayor frecuencia de fallas son los agitadores de floculantes, como se muestra en la Figura 3; en segundo lugar, se encuentran los sopladores.

Figura 3. Equipos con mayores frecuencias de falla



Nota: elaboración propia

Sin embargo, la frecuencia de falla es solamente uno de los criterios que se utiliza para aplicar el mantenimiento que se centra en la confiabilidad, por lo que se en el siguiente capítulo se procede a aplicar esa metodología, de acuerdo con el diseño metodológico previsto.

Los criterios que se utilizaron para la clasificación del impacto de las fallas de los equipos fueron la frecuencia con que fallan, el impacto en la operación que generan esas fallas, la flexibilidad operacional, los costos del mantenimiento y el impacto en HSEQ. En la Tabla 7 se explican los valores asignados, de acuerdo con cada uno de esos grupos de criterios de clasificación.

Tabla 7. Criterios para la ponderación de las fallas de los equipos

Criterios	Descripción	Ponderación
	Más de 7 fallas anuales	7

Criterios	Descripción	Ponderación
Frecuencia de falla	Entre 5 y 7 fallas anuales	5
	Entre 2 y 4 fallas anuales	3
	Solo 1 falla/Año	1
Impacto operacional	Parada total de producción	7
	Parada parcial de un sector de la producción	5
	Genera costos operacionales adicionales a la disponibilidad del equipo	3
	Sin efecto sobre equipo y operaciones	1
Flexibilidad operacional	Sin repuestos, no existen opciones de producción	7
	Se puede contar con respuesta compartido	5
	Repuestos disponibles	3
	Se cuenta con equipo en SPARE	1
Costo de mantenimiento	Mayor a \$2.500.000,00	7
	Mayor a \$1.000.000,00 pero menor \$2.500.000,00	5
	Mayor a \$500.000,00 pero menor \$1.000.000,00	3
	Menor a \$500.000,00	1
Impacto HSEQ	Una o más fatalidades de personas	7
	Incapacidad permanente de personas	5
	Afecta negativamente el medio ambiente	3
	No provoca daño al medio ambiente, personas ni a la infraestructura	1

Nota: elaboración propia

Al aplicar esos criterios a todos los equipos de la PTAR, se obtuvo la clasificación que se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Clasificación de los equipos según la criticidad de las fallas

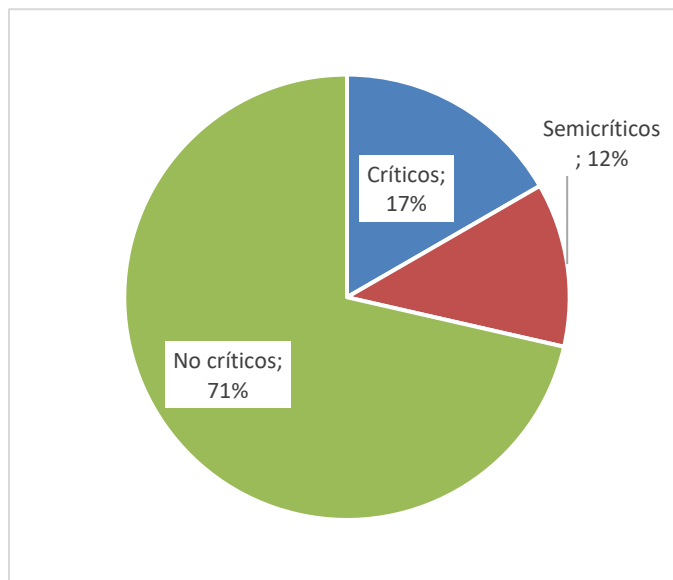
Ítem	Código	Equipo	Frecuencia de falla	Impacto operacional	Flexibilidad operacional	Costo mantenimiento	Impacto HSEQ	Consec	Criticidad	Nivel de criticidad
17	PR-SEL-01	Soplador eléctrico N° 1	7	5	7	7	3	45	315	Crítico
18	PR-SEL-02	Soplador eléctrico N° 2	7	5	7	7	3	45	315	Crítico
12	PR-DAS-02	Decantador de agua superficial N° 2	7	5	5	5	3	33	231	Crítico
13	PR-BEL-01	Bomba extracción lodo biológico N° 1	5	5	7	7	3	45	225	Crítico
21	PR-PLC-01	Sistema de control PLC	3	7	7	5	3	57	171	Crítico
11	PR-DAS-01	Decantador de agua superficial N° 1	5	5	5	5	3	33	165	Crítico
14	PR-BEL-02	Bomba extracción lodo biológico N° 2	3	5	7	7	3	45	135	Crítico
29	PR-TRL-02	Tornillo transportador de lodos N°2	3	3	7	5	3	29	87	Semi crítico
27	PR-TRC-01	Tornillo transportador de Cal	3	3	7	5	3	29	87	Semi crítico
28	PR-TRL-01	Tornillo transportador de lodos N°1	3	3	7	5	3	29	87	Semi crítico
37	PR-DHR-02	Deshidratador de lodos de lodos N° 2	6	3	1	7	3	13	78	Semi crítico
36	PR-DHR-01	Deshidratador de lodos de lodos N° 1	5	3	1	7	3	13	65	Semi crítico
30	PR-AGP-01	Agitador de polímero N°1	7	1	1	3	3	7	49	No crítico
31	PR-AGP-02	Agitador de polímero N°2	7	1	1	3	3	7	49	No crítico
34	PR-AFC-01	Agitador de floculantes N° 1	7	1	1	3	3	7	49	No crítico
35	PR-AFC-02	Agitador de floculantes N° 2	7	1	1	3	3	7	49	No crítico
15	PR-DFA-01	Difusores de aire tanque N° 1	1	5	7	7	3	45	45	No crítico
16	PR-DFA-01	Difusores de aire tanque N° 2	1	5	7	7	3	45	45	No crítico
19	PR-VIA-01	Válvula de inyección de aire N° 1	1	5	7	7	3	45	45	No crítico
20	PR-VIA-02	Válvula de inyección de aire N° 2	1	5	7	7	3	45	45	No crítico
22	PR-TEL-01	Tanque espesador de lodos	1	5	7	7	3	45	45	No crítico
24	PR-DFC-01	Dosificador de Cal	1	5	7	5	3	43	43	No crítico
25	PR-INC-01	Inyector de Cal	1	5	7	5	3	43	43	No crítico
26	PR-MZC-01	Mezclador de Cal	1	5	7	5	3	43	43	No crítico
1	PR-MTP-01	Motor translación puente barredor	5	1	5	1	1	7	35	No crítico

Ítem	Código	Equipo	Frecuencia de falla	Impacto operacional	Flexibilidad operacional	Costo mantenimiento	Impacto HSEQ	Consec	Criticidad	Nivel de criticidad
9	PR-AZO-01	Analizador de oxígeno N° 1	1	5	5	5	3	33	33	No crítico
10	PR-AZO-02	Analizador de oxígeno N° 2	1	5	5	5	3	33	33	No crítico
38	PR-TCL-01	Tablero control de lodos N° 1	1	3	7	5	3	29	29	No crítico
39	PR-TCL-02	Tablero control de lodos N° 2	1	3	7	5	3	29	29	No crítico
23	PR-RBV-01	Rompe bóvedas	3	1	3	3	3	9	27	No crítico
40	PR-TCA-01	Tablero control falsificador de arenas	3	1	3	5	1	9	27	No crítico
41	PTR-TCR-01	Tablero de control rejilla automática	3	1	3	5	1	9	27	No crítico
42	PR-TCP-01	Tablero de control puente barredor	3	1	3	5	1	9	27	No crítico
6	PR-BCA-01	Bomba N° 1 clasificadora de arenas	5	1	1	3	1	5	25	No crítico
4	PR-MRA-01	Motor N° 1 rejilla automática	3	1	5	1	1	7	21	No crítico
2	PR-MPP-01	Motor pala N° 01 de puente barredor	1	1	5	1	1	7	7	No crítico
3	PR-MPP-02	Motor pala N° 02 de puente barredor	1	1	5	1	1	7	7	No crítico
5	PR-MRA-02	Motor N° 2 rejilla automática	1	1	5	1	1	7	7	No crítico
8	PR-TCA-01	Tornillo clasificador de arenas N° 1	1	1	5	1	1	7	7	No crítico
32	PR-PMQ-01	Bomba dosificadora de químicos N°1	1	1	1	3	3	7	7	No crítico
33	PR-PMQ-02	Bomba dosificadora de químicos N°2	1	1	1	3	3	7	7	No crítico
7	PR-BCA-02	Bomba N° 2 clasificadora de arenas	1	1	1	3	1	5	5	No crítico

Nota: elaboración propia

La clasificación de los equipos de acuerdo con sus niveles de criticidad de falla se resume en la Figura 4.

Figura 4. Resumen de clasificación de los equipos según su criticidad de falla



Nota: elaboración propia

De acuerdo con esta metodología, los equipos críticos de la instalación son los siguientes 7, mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9. Equipos críticos de la PTAR de Aguazul

Código	Equipo
PR-SEL-01	Soplador eléctrico N° 1
PR-SEL-02	Soplador eléctrico N° 2
PR-DAS-02	Decantador de agua superficial N° 2
PR-BEL-01	Bomba extracción lodo biológico N° 1
PR-PLC-01	Sistema de control PLC
PR-DAS-01	Decantador de agua superficial N° 1
PR-BEL-02	Bomba extracción lodo biológico N° 2

Nota: elaboración propia

A los equipos que se clasifican como no críticos, se le realizará mantenimiento correctivo. Sin embargo, a aquellos que presentan mayor frecuencia de falla, como son los agitadores, se les hará una revisión preventiva cada dos meses, con lo cual se buscará reducir esa frecuencia.

6. MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD PARA LOS EQUIPOS CRÍTICOS DE LA PTAR

Como se observa en la Tabla 9, los equipos críticos de la PTA de Aguazul son dos sopladores eléctricos, dos decantadores de agua superficial, dos bombas de extracción de lodos y el sistema de control PLC. Se presenta en este capítulo el diseño del programa de mantenimiento que se centra en la confiabilidad para esos equipos.

6.1. SOPLADORES ELÉCTRICOS

Son dos sopladores de desplazamiento positivo, encargados de suministrar el aire necesario a los difusores localizados en el sistema de tratamiento biológico ICEAS®; mientras uno de ellos opera el otro está en *stand-by*, lo que quiere decir que trabajan alternadamente. Un solo soplador es capaz de generar aire suficiente para un solo tanque, para este sistema los sopladores funcionan de manera intercalada; es decir están programados para que opere un soplador por cada siglo.

Las especificaciones se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones de los sopladores

	
Cantidad	2 (1 operación + 1 stand by)

Ubicación	etapa tratamiento biológico aireación
Marca	Kaeser
Modelo	Eb 420 C PR
Máximo caudal de aire descarga	1589 cfm.
Máxima presión de descarga	29 psi
Potencia	75 hp
Modo de operación	Manual o automática

Nota: elaboración propia

De acuerdo con su manual, los componentes de estos equipos de desplazamiento positivo, potencia 100 Hp, incluye motor, filtro de aire, válvula de entrada tipo mariposa automática, conectores flexibles, válvula de cheque, silenciador de entrada, silenciador de salida, válvula de alivio de presión, manómetro, termómetro, panel de control y monitoreo independiente para control de sobrecargas y sobrepresiones, además de regulaciones. Los dispositivos de control de los sopladores permiten seleccionar el modo de operación manual o automática; todos los equipos del sistema ICEAS deben de operar de manera automática.

Figura 5. Dispositivos de control



La Figura 5 muestra los dispositivos de control de los sopladores, válvulas y bombas de lodos para cada tanque, todos los dispositivos están ubicados en un mismo tablero y cuenta con luces pilotos que indican el equipo que se encuentra en operación. En el Anexo 1 se incluyen las principales recomendaciones del fabricante para la operación de estos sopladores; la observación de esas recomendaciones es importante para evitar daños por errores en su puesta en marcha, funcionamiento, puesta en marcha, funcionamiento a velocidad reducida u operación a velocidad baja o alta.

El manual del equipo también presenta información para la para la detección y corrección de fallas.

6.2. DECANTADORES DE AGUA SUPERFICIAL

Son los equipos encargados de extraer el agua clarificada depositada en la parte superficial después del ciclo programado de sedimentación del sistema ICEAS; normalmente sus movimientos de subida y bajada son lentos. Los decantadores deben de operar de manera automática y su operación de debe monitorear desde el panel de control central de la PTAR; adicionalmente, este equipo cuenta con un tablero local que permite su operación de manera manual. Esta opción manual se puede emplear en casos de emergencia o durante mantenimientos programados de los equipos.

En la Figura 6 se presenta una fotografía de un decantador.

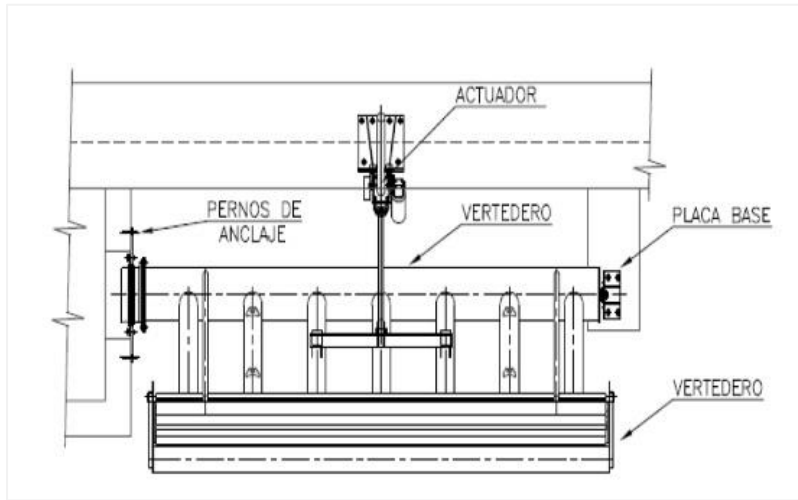
Figura 6. Decantador de agua superficial.



Nota: elaboración propia

El mecanismo de vaciado se conforma por el colector superior con vertedero integrado, pantalla de flotantes, conductos de bajada, junta de articulación, actuador electromecánico y motorreductor. En la Figura 7 se presenta un dibujo que permite identificar esas partes.

Figura 7. Componentes del decantador



Nota: elaboración propia

La ficha técnica de este equipo aparece en la Tabla 11.

Tabla 11. Ficha técnica del decantador

Cantidad	2 (1 para cada tanque)
Ubicación	Etapas de tratamiento
Marca	Sanitare
Longitud	5.3 M
Fabricante actuador	Duff-Norton
Tensión de alimentación	440 V/3 fases /60 HZ
Modelo actuador	Serie 9010
Fabricante del reductor	Nord
Modelo del reductor	Serie SK 1S
Potencia	0.5 HP
Modo de operación	Automática
<ul style="list-style-type: none"> • Equipo Decantador con actuador electromecánico con interruptores limitadores redundantes y controladores de frecuencia variable (VFD) para controlar la velocidad. • Material de construcción: Acero Inoxidable • Longitud del vertedero: 5.3 m 	

Nota: elaboración propia

Todos los componentes del sedimentador, a excepción de los sellos y cojinetes, están fabricados con acero inoxidable 304L, lo que les confiere resistencia a la corrosión y a los rayos UV. Los soportes son de acero tipo inoxidable 316L.

El sistema que permite el movimiento del sedimentador se instala en una plataforma para facilitar el acceso y el mantenimiento. El diseño del mecanismo permite su funcionamiento continuo a velocidad variable para lograr un flujo constante del emisario durante la etapa de descarga. El sistema de descarga está parametrizado para que el nivel de agua se reduzca al mínimo al finalizar la etapa de descarga, lo que maximiza el tiempo de sedimentación.

Los sistemas de control del actuador y su correspondiente motor eléctrico se encuentran integrados en la misma lógica de control para evitar la activación del soplador durante el proceso de vaciado. La operación del decantador no requiere el uso de válvulas de control para el manejo del flujo, ni tampoco se necesita una válvula de retención u otro dispositivo adicional para el vaciado del efluente.

El manual de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) no contiene instrucciones de mantenimiento específicas para los decantadores. A continuación, se presentan las recomendaciones de mantenimiento para el actuador.

El mantenimiento de un actuador hidráulico es esencial para asegurar el adecuado funcionamiento y una mayor durabilidad. A continuación, se proporciona una guía básica sobre cómo llevar a cabo el mantenimiento de un actuador hidráulico, siguiendo las recomendaciones de Castrejón. (2019).

- Inspección visual: realizar una inspección visual del actuador hidráulico para detectar cualquier signo de desgaste, fugas de aceite, daños en las conexiones o componentes sueltos. Esta inspección se debe hacer con frecuencia diaria.
- Limpieza: antes de realizar cualquier trabajo de mantenimiento, asegurarse de limpiar bien el actuador hidráulico. Utilizar un paño limpio o aire comprimido para eliminar el polvo, la suciedad y otros contaminantes.
- Cambio de aceite: se debe revisar el nivel y la calidad del aceite regularmente. Si es necesario, realiza un cambio de aceite siguiendo las recomendaciones del fabricante en cuanto a tipo y viscosidad. Además, reemplazar el filtro de aceite según las indicaciones del fabricante de ese componente.
- Lubricación: aplicar lubricante en los puntos de pivote y en las superficies de deslizamiento del actuador.
- Verificación de las conexiones: verificar que todas las conexiones del actuador hidráulico estén correctamente apretadas, incluyendo las conexiones de las mangueras y tuberías, así como a los sellos y juntas.
- Pruebas de funcionamiento: realizar pruebas de funcionamiento después de realizar el mantenimiento. Verificar que el actuador hidráulico se mueva suavemente y sin problemas, y asegurarse de que todas las funciones operativas estén en óptimas condiciones.

De estas operaciones la más importante es la limpieza, dado que el actuador suele presentar problemas de funcionamiento debido a pequeñas partículas sólidas que flotan en el

agua de los tanques y que se adhieren en el cilindro del actuador; esas partículas pueden dañar los sellos del actuador y dificultar su desplazamiento, con lo cual se bloquea todo el decantador.

El motorreductor que hace parte del decantador requiere principalmente el cambio de aceite cada 5.000 horas de funcionamiento, así como el mantenimiento del motor eléctrico que lo acciona. Este mantenimiento del motor eléctrico debe ser el mismo que se les dé a los demás motores eléctricos que se encuentran en la PTAR. Sin embargo, las fallas de los decantadores se presentan principalmente en el actuador y en las partes móviles; a pesar de que esas partes son de acero inoxidable, el inconveniente se presenta por la adherencia acumulativa de pequeñas partículas sólidas que flotan en el agua; la recomendación es realizar todos los días un soplado de esas partes para retirar y evitar la acumulación de esos objetos pequeños.

6.3. BOMBAS DE EXTRACCIÓN DE LODOS

Las bombas son los equipos encargados de extraer el exceso de lodos formados en los tanques del sistema; cada tanque cuenta con una bomba sumergible que operan de manera automática por ciertos periodos de tiempo programados después de culminar cada ciclo. El lodo es bombeado desde el tanque hasta un espesador de lodos ubicado en la parte externa de la caseta de tratamiento de lodos.

En la Figura 8 se muestra el sistema de extracción de lodos, con el tanque desocupado.

Figura 8. Disposición del sistema de extracción de lodos



Nota: elaboración propia

La ficha técnica del sistema de bombeo es presentada en la Tabla 12.

Tabla 12. Ficha técnica del sistema de bombeo

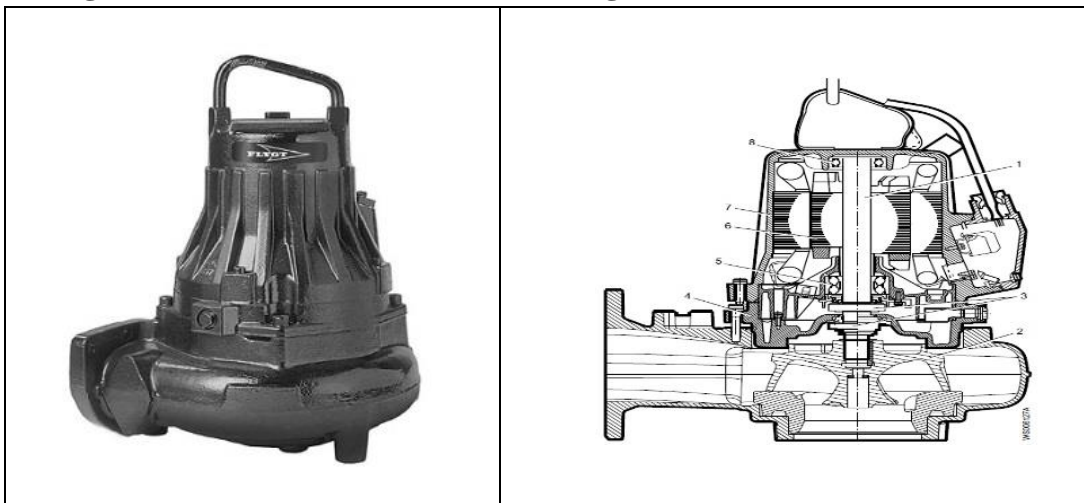
Característica	Descripción
Cantidad	2 (una por cada tanque)
Ubicación	Etapa de tratamiento
Marca	Flygt
Modelo	NP 3085.183 SH
Motor	Motor por inducción tipo jaula de ardilla
Altura dinámica punto de operación	7.0 m
Caudal punto operación	6.5 l/s
Diámetro de salida	2"
Frecuencia	60 HZ, 220/460 V
Caudal	6 l/s
Cabeza	16 m
Velocidad	3395 RPM

Característica	Descripción
Potencia	4 hp
Modo de operación	Automática
Referencias técnicas	
Tipo de motor	3085.092/.160/.172/.183/.190/.760/.770/.891: motor de inducción de jaula de ardilla
Método de arranque	Arranque directo tipo estrella – triángulo
Arranques máximos cada hora	Se permiten 30 arranques por hora.
Regulación de tensión sin sobrecalentamiento	$\pm 10\%$, cuando funcione continuamente a carga plena.
Máximo desequilibrio de tensiones	2%

Nota: elaboración propia

La estructura externa de estas bombas sumergibles se observa en la Figura 9.

Figura 9. Estructura de la bomba sumergible



Nota: elaboración propia

En el Anexo 2 se presentan las recomendaciones para la operación de estas bombas.

Las operaciones de mantenimiento se listan en la Tabla 13.

Tabla 13. Operaciones de mantenimiento de las bombas de lodos

Tipo de Mantenimiento	Objetivo	Intervalo de inspección
Primer Inspección	Un especialista en mantenimiento realiza una evaluación del estado de la bomba y, basándose en los resultados y las mediciones obtenidas, establece los momentos adecuados para llevar a cabo inspecciones periódicas y revisiones generales montaje.	Primer año de operación.
Inspección de rutina	Con el fin de prevenir interrupciones en el funcionamiento y averías de la máquina, es importante considerar parámetros como el equilibrado del impulsor, el monitoreo y reemplazo de los componentes desgastados y el control de los ánodos de zinc.	Cada año como máximo
Revisión general	Con el objetivo de verificar la durabilidad del producto, se realizan reemplazos de los componentes principales y se toman medidas durante las inspecciones para garantizar su vida útil prolongada.	Cada tres años como máximo.

Nota: elaboración propia

Los intervalos pueden variar dependiendo de las condiciones del medio en el que opere la bomba.

La inspección de los componentes de la bomba debe hacerse de acuerdo con las indicaciones que aparecen en la Tabla 14.

Tabla 14 Indicaciones para la inspección

Elemento de mantenimiento	Acción
Cable	<ul style="list-style-type: none"> • Sustituir el cable si su cobertura externa se deteriora • Evitar que se doblen o aplasten los cables
Tableros de potencia	Comprobar que se mantengan aseados y libres de humedad
Impulsor	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobar la libertad de movimiento del impulsor • En caso de necesidad, ajustar el impulsor
Alojamiento del estator	<ul style="list-style-type: none"> • Drenar todo el líquido cuando se necesite

Elemento de mantenimiento	Acción
	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobar la resistencia en el medidor de fugas Valor normal de aproximadamente 1500 ohmios, alarma de aproximadamente 430 ohmios.
aislamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar una pinza de 1.000 V o menos • Comprobar que la resistencia entre las líneas de tierra y fases supere los 5 megohmios • Comprobar la resistencia entre fases
Caja de conexiones	Comprobar que esté limpia y seca
Dispositivo de elevación	Comprobar el seguimiento de las regulaciones locales de seguridad
Asa de elevación	<ul style="list-style-type: none"> • Comprobar cada tornillo • Examinar el estado de la manija de elevación • Sustituirla si está deteriorada
Juntas tóricas	<ul style="list-style-type: none"> • Sustituir las del tapón de aceite. • Sustituir las juntas, tanto a su entrada como en la cubierta de la caja de empalmes. • Engrasar las nuevas juntas.
Proteger por sobrecargas y otras fallas	Comprobar que la parametrización sea la que se calculó.
Dispositivos para seguridad personal	Examinar las guardas, tapas y otros sistemas de protección
Sentido de giro	Comprobar el sentido de giro del impulsor
Alojamiento del aceite	Llenara con aceite nuevo, en caso necesario
Bloque de terminales / empalme cerrado	Comprobar que las conexiones estén correctamente aseguradas
Termo-contactos	Circuito normalmente cerrado; intervalo entre 0 y 1 ohm.
Tensión y amperaje	Comprobar los valores de operación

Nota: elaboración propia, con base en el manual de mantenimiento de la PTAR.

Como se observa, las indicaciones de mantenimiento se centran en el mantenimiento correctivo de las bombas. Sin embargo, el inconveniente de operación que presentan con mayor frecuencia es su taponamiento, dado que cuando se presenta genera recalentamiento y desgaste acelerado. Para prevenir este tipo de falla, la operación de mantenimiento que se recomienda es la medición preventiva de la corriente que está consumiendo cada bomba,

dado que cuando se presenta taponamiento se incrementa incremento de esa corriente. Por esa razón, se recomienda instalar cerca del sitio en donde sale el cable de alimentación de las bombas una ficha en la que se registres dos veces al día la corriente de consumo, medida promedio de una pinza amperimétrica. Cuando el nivel de corriente supere los niveles normales, se recomienda extraer la bomba de su localización y retirar el tapón que se haya creado; de esta forma se asegura que la bomba siempre esté operando en condiciones para las cuales ha sido diseñada.

6.4. SISTEMA DE CONTROL PLC

El equipo de control principal es vía SCADA, sigla que corresponde a Supervisory Control and Data Acquisition (supervisión, control y adquisición de datos). En el panel de control, se encuentra ubicado el terminal gráfico que brinda una visualización gráfica de los parámetros y estado. Este terminal ofrece una calidad VGA con una resolución de 640x480 puntos por pulgada, en colores. El sistema incluye una página de alarmas que facilita el reconocimiento de las mismas. Además, permite visualizar datos analógicos en gráficos de barra o en formato digital, junto con representaciones gráficas en diferentes páginas.

Los controles del sistema funcionan según un ciclo de tiempo, y el tiempo transcurrido del proceso se muestra en una pantalla de visualización. Los estanques pueden operar en ciclos alternados, de tal manera que, mientras un estanque está en aireación, el otro estanque está en fase de decantación o vaciado. En operación automática, el procesador mantiene todo el tiempo la secuencia adecuada de operación, aun en el caso de falla de poder. Todas las etapas y equipos se interrelacionan y bloquean de forma que se impida cualquier

alteración del proceso. En caso de que algún equipo falle, se activará una alarma en el terminal del operador hasta que se solucione el problema. La pantalla de visualización mostrará el momento en que se generó la alarma y el estado actual.

En la Figura 10 se muestra la disposición del sistema de control

Figura 10. Disposición del sistema de control de la PTAR de Aguazul



Nota: elaboración propia.

Los manuales que existen en la PTAR de Aguazul no incluyen ninguna instrucción específica para la operación del sistema de control PLC. De acuerdo con la literatura disponible sobre este tema, ese mantenimiento debe incluir los siguientes aspectos (Rosillo & Sosa, 2022).

- Actualización y respaldo del software: mantener actualizado el software del sistema SCADA con las versiones más recientes y asegurarse de tener copias de seguridad de los archivos y configuraciones importantes. Esto ayudará a prevenir problemas de seguridad y a facilitar la recuperación en caso de fallas o pérdida de datos.

- Monitoreo y mantenimiento del hardware: hacer seguimiento periódico de los componentes de hardware del sistema SCADA, como servidores, equipos de red, interfaces de comunicación y dispositivos de entrada/salida. Verificar su estado físico, realiza limpieza regular y reemplaza los componentes defectuosos o envejecidos según sea necesario.
- Seguridad cibernética: implementa medidas de seguridad para proteger tu sistema SCADA contra amenazas cibernéticas. Esto incluye el empleo de firewalls, sistemas para detectar intrusiones, autenticación de usuarios, actualizaciones de seguridad y políticas de acceso y permisos adecuados.
- Supervisión del rendimiento: monitorear el rendimiento del sistema SCADA para detectar posibles problemas. Analizar los registros de eventos, supervisar el rendimiento de la red y los servidores, y llevar a cabo pruebas periódicas para evaluar la respuesta del sistema ante situaciones de carga o eventos anormales.
- Mantenimiento de la base de datos: Si el sistema SCADA utiliza una base de datos para almacenar y gestionar los datos, asegurarse de realizar copias de seguridad regularmente y mantener la integridad de la base de datos. Limpiar y optimizar la base de datos según las recomendaciones del proveedor del software.

Teniendo en cuenta la importancia de este sistema en toda la operación de la PTAR, se recomienda la contratación de un especialista en estos sistemas de control para que realice un diagnóstico a profundidad y haga las recomendaciones específicas.

6.5. Esquema general de implementación de RCM

Figura 11. Esquema general de implementación de RCM

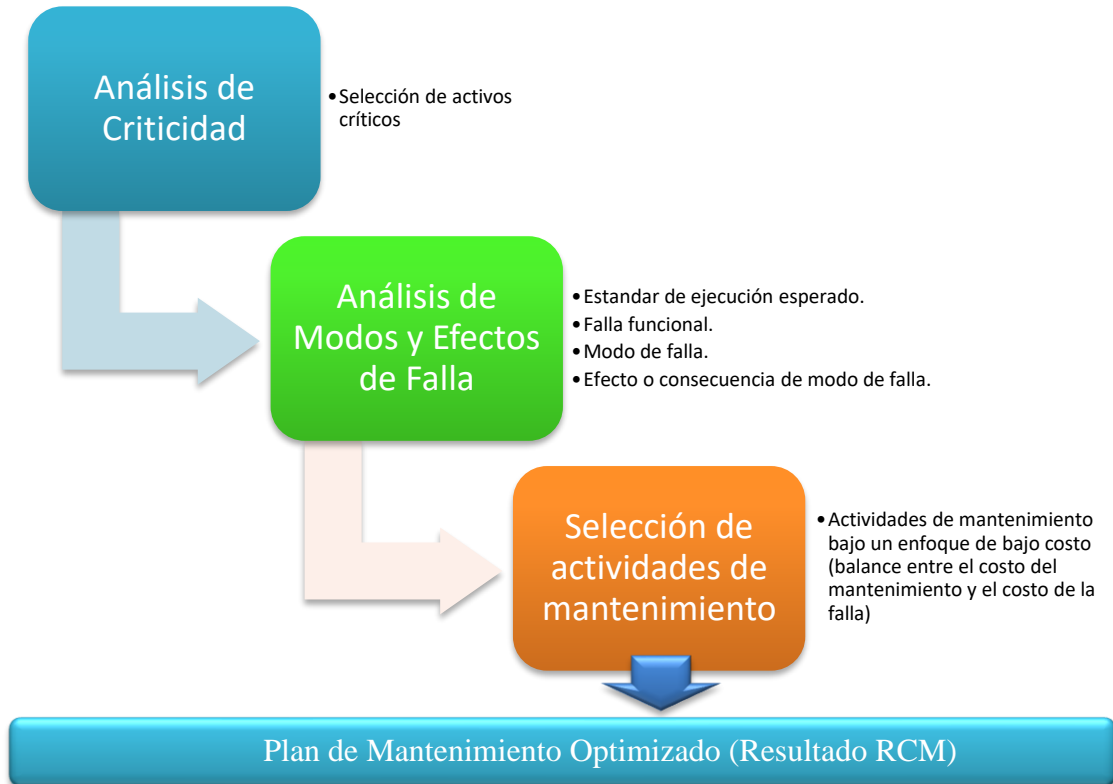


Tabla 15 Plan de mantenimiento optimizado PTAR

EMPRESA	PLANTA	Tipo de Equi	Tag	Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto de Falla	Tarea mantenimiento	Frecuencia (días)		
ESPA S.A. E.S.P.	PTAR	Sopladores eléctricos	PR-SEL-01 PR-SEL-02	Suministrar el flujo de aire necesario para el correcto funcionamiento de los difusores del reactor biológico	A	No hay descarga de ire	1	Sentido de giro incorrecto	El aire no llega hasta los difusores.	Revisar sentido de giro del motor eléctrico del soplador	Previo al montaje
							2	Válvula de pie/filtro obstruido o cerrado.	El soplador no tiene acceso al aire.	Limpieza de filtros	Trimestral
					B	Pérdida de caudal	1	Filtro obstruido o cerrado.	Pérdida de aire que le llega al soplador	Limpieza de filtros	Trimestral
							2	Exceso de temperatura del fluido.	El caudal generado es inferior al requerido.	Revisión temperatura y ruidos	Mensual
							3	Golpeteo de la válvula de seguridad.	Flujo de aire discontinuo por el mal estado de la válvula.	Revisión de las válvulas	Mensual
							4	Velocidad de la bomba inferior a la estimada.	El caudal generado es inferior al requerido.	Comprobación de la velocidad	Mensual
							5	Deslizamiento correas de transmisión.	El caudal generado es inferior al requerido.	Revisión estado de la correa	Mensual
					C	Paradas durante la puesta en marcha	1	Exceso presión de impulsión	Presión superior a la requerida, causará el paro de la soplante.	Revisar tubería posibles obstrucciones/agujeros	Semestral
							2	Baja tensión.	La máquina deja de funcionar al bajar la tensión de alimentación.	Comprobar consumo	Mensual
					D	Sobrecalentamiento del motor	1	Velocidad de la bomba superior a la adecuada.	El soplador no trabajará de la manera adecuada.	Comprobación de la velocidad	Mensual
							2	Fallo válvula de seguridad	El fallo de la válvula de seguridad provoca el sobrecalentamiento.	Revisión de las válvulas	Mensual
							3	Problemas de la ventilación.	La falta de ventilación puede provocar la rotura de la soplante.	Revisión temperatura y ruidos	Mensual
							4	Fallo / desgaste de los rodamientos.	Aumentará el consumo de corriente del motor.	Revisión temperatura y ruidos	Mensual
					E	Ruidos y vibraciones	1	Entradas de aire en la aspiración.	Pérdida de aire que le llega a la soplante.	Revisar tubería posibles obstrucciones/agujeros	Semestral
							2	Filtro obstruido o cerrado.	Pérdida de aire que le llega a la soplante.	Limpieza de filtros	Trimestral
							3	Fallo / desgaste de los rodamientos.	Aumentará el consumo de la soplante.	Revisión temperatura y ruidos	Mensual
							4	Golpeteo de la válvula de seguridad.	Flujo de aire discontinuo por el mal estado de la válvula.	Revisión de las válvulas	Mensual
							5	Problema con las correas / poleas.	La soplante no trabajará de la manera adecuada.	Revisión estado de la correa	Mensual
					F	Calentamiento excesivo del núcleo soplante	1	Filtro de aspiración colmatado.	El calentamiento puede provocar el fallo de la soplante.	Limpieza de filtros	Trimestral
							2	Ventilación insuficiente.	Verificar sistema de ventilación.	Revisión temperatura y ruidos	Mensual
							3	Exceso de aceite o viscosidad inadecuada.	Mala lubricación que provocará el calentamiento.	Comprobación/sustitución del aceite	Mensual
					G	Ruido extraño durante el funcionamiento	1	Rodamientos deteriorados.	Aumentará el consumo de corriente del soplador	Revisión temperatura y ruidos	Mensual
							2	Desalineación de correas.	Aumentará el consumo de corriente del soplador	Revisión estado de la correa	Mensual
							3	Roce de correas con la protección.	Aumentará el consumo de corriente del soplador	Revisión estado de la correa	Mensual
							4	Fricción entre émbolos o sobre	El soplador no trabajará de la manera adecuada.	Revisión temperatura y ruidos	Mensual
							5	Adherencias sobre émbolos.	El soplador no trabajará de la manera adecuada.	Revisión temperatura y ruidos	Mensual
					H	Fuga de aceite al exterior del núcleo soplante e interior de la cámara de fluido	1	Exceso de aceite en cárter.	Pérdida de aceite hasta tener el nivel adecuado.	Comprobar nivel de aceite	Mensual
							2	Segmentos desgastados.	Fuga de aceite a través de los segmentos.	Comprobar fugas de aceite	Diario
							3	Retén deteriorado.	Fuga de aceite a través del retén.	Comprobar fugas de aceite	Diario
							4	Tapón de vaciado flojo o junta	Fuga de aceite a través del agujero del tapón.	Comprobar fugas de aceite	Diario
							5	Visor agrietado o junta dañada.	Fuga de aceite a través del visor de aceite.	Comprobar fugas de aceite	Diario
					I	Efecto anti giro después de la parada del soplante	1	Válvula anti retorno deteriorada o bloqueada.	Soplador bloqueado al fallar la válvula antiretorno.	Revisión de las válvulas	Mensual

Tabla 16 Plan de mantenimiento optimizado PTAR (Continuación)

EMPRESA	PLANTA	Tipo de Equi	Tag	Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto de Falla	Tarea mantenimiento	Frecuencia (días)		
ESPA S.A. E.S.P.	PTAR	Bomba extracción lodo biológico	PR-BEL-01 PR-BEL-02	Levantar los lodos biológico que se sedimentan en el reactor	A	El motor no arranca.	1	Ausencia de tensión en la red.	La bomba no será capaz de ponerse en funcionamiento.	Revisar conexiones, automatismos y alarmas	Trimestral
							2	Fusible fundido.	La bomba no será capaz de ponerse en funcionamiento.	Revisar conexiones, automatismos y alarmas	Trimestral
							3	Cable cortado.	La bomba no será capaz de ponerse en funcionamiento.	Revisar conexiones, automatismos y alarmas	Trimestral
							4	Bomba bloqueada.	La bomba no será capaz de ponerse en funcionamiento.	Comprobación ruidos y temperatura	Semanal
					B	El grupo arranca pero no eleva lodo.	1	Giro contrario.	La bomba girará en sentido contrario y el fango no se elevará hasta la tolva.	Revisar sentido de giro de la bomba	Previo montaje
							2	Altura real mayor que la capacidad de la bomba.	La bomba no será capaz de elevar el fango a la altura deseada	Cambiar la bomba a una de mayor altura	Previo montaje
							3	Rotor a bloqueado	El rotor no girará, de manera que no elevará fango.	Limpieza/Sustitución elementos mecánicos	2 años
					C	Caudal insuficiente.	1	Giro contrario.	La bomba girará en sentido contrario y el fango no se elevará hasta la tolva.	Revisar sentido de giro de la bomba	Previo montaje
							2	Tubo descarga obstruido.	Existirá una reducción del caudal causada por la obstrucción.	Comprobación tuberías	Trimestral
							3	Rotor parcialmente atascado.	Existirá una reducción del caudal causada por el atascamiento	Comprobación ruidos y temperatura	Semanal
							4	Desgaste de rotor.	Existirá una reducción del caudal causada por el desgaste.	Limpieza/Sustitución elementos mecánicos	2 años
					D	Lodos en la caja de conexiones motor.	1	Juntas deterioradas.	La bomba dejará de funcionar con la entrada de fluido.	Cambio de juntas	2 años
							2	Rotura del recubrimiento del cable.	La bomba dejará de funcionar con la entrada de fluido.	Revisión conexiones, automatismos y alarmas	Trimestral
					E	Lodos en la carcasa del motor.	1	Cierre mecánico superior deteriorado.	La bomba dejará de funcionar con la entrada de fluido.	Limpieza/Sustitución elementos mecánicos	2 años
							2	Juntas tóricas carcasa estropeadas.	La bomba dejará de funcionar con la entrada de fluido.	Cambio de juntas	2 años
					F	Lodos en el aceite del depósito.	1	Cierre mecánico inferior deteriorado	Mala lubricación que puede dañar los componentes mecánicos de la bomba.	Limpieza/Sustitución elementos mecánicos	2 años
							2	Tapones mal apretados o juntas rotas.	Mala lubricación que puede dañar los componentes mecánicos de la bomba.	Comprobación ruidos y temperatura	Semanal
							3	Juntas tóricas estropeadas.	Mala lubricación que puede dañar los componentes mecánicos de la bomba.	Cambio de juntas	2 años

Tabla 17 Plan de mantenimiento optimizado PTAR (Continuación)

EMPRESA	PLANTA	Tipo de Equi	Tag	Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto de Falla	Tarea mantenimiento	Frecuencia (días)	
ESPA S.A. E.S.P.	PTAR	Decantador de agua superficial	PR-DAS-01 PR-DAS-02	Separar el agua tratada biológicos.	A	Problemas en la estructura principal del decantador.	1	Falla en el puente. Al fallar el puente, no girará y los barredores no cumplirán su función.	Revisión estructura espesador	Semanal
							2	Falla barredor de fangos. El lodo de las paredes no será arrastrado hasta la tubería de fango.	Revisión estructura espesador	Semanal
							3	Falla barredor de grasas. Las grasas flotantes no se limpiarán y se irán acumulando.	Revisión estructura espesador	Semanal
							4	Falla vertedero agua saliente. El agua tratada no podrá llegar hasta la tubería que la llevará al laberinto.	Revisión estructura espesador	Semanal
					B	Fugas/obstrucciones en las tuberías	1	Fuga en la entrada de agua. El agua entrante no llega de manera adecuada al decantador.	Comprobación estado de las tuberías	Trimestral
							2	Fuga en la salida de agua. No toda el agua tratada llega al laberinto, hay pérdidas.	Comprobación estado de las tuberías	Trimestral
							3	Fuga en la salida de fangos. Existen pérdidas de fango entre el decantador y el espesador.	Comprobación estado de las tuberías	Trimestral
					C	El motor no funciona correctamente.	1	Falla eléctrica. El motor no aportará el giro al eje, y los rasadores no girarán.	Revisión conexiones del motor	Trimestral
							2	Falla mecánica. El motor no aportará el giro al eje, y los rasadores no girarán.	Comprobar ruido y temperatura del motor	Trimestral
					D	Problemas en el reductor de velocidad conectado al motor.	1	Rotura piñón. La reductora no transmite el movimiento adecuadamente.	Comprobar ruido y temperatura reductora	Trimestral
							2	Desgaste del engranaje. La reductora no transmite el movimiento adecuadamente.	Comprobar ruido y temperatura reductora	Trimestral
							3	Fuga de aceite. La mala lubricación puede causar la rotura de algún engranaje.	Comprobación fugas aceite	Diario
					E	Problemas en el colector de alimentación.	1	Problemas en las escobillas. No se efectuará el contacto correctamente, de manera que el motor no funcionará de la forma adecuada.	Revisión del colector de alimentación	Trimestral
							2	Problema en la banda de rodadura. No se efectuará el contacto correctamente, de manera que el motor no funcionará de la forma adecuada.	Revisión del colector de alimentación	Trimestral

Tabla 18 Plan de mantenimiento optimizado PTAR (Continuación)

EMPRESA	PLANTA	Tipo de Equi	Tag	Función	Falla Funcional	Modo de falla	Efecto de Falla	Tarea mantenimiento	Frecuencia (días)	
ESPA S.A. E.S.P.	PTAR	PLC	PR-PLC-01	Automizar los procesos electromecánicos de la PTAR	A	El PLC no responde	1	La fuente de alimentación no aporta energía. El PLC no reaccionará, de manera que ni recibirá ni enviará señales.	Comprobar estado de la toma eléctrica	Anual
							2	El CPU no responde. El PLC no reaccionará, de manera que ni recibirá ni enviará señales.	Comprobar estado de la CPU	Anual
					B	Problemas en las entradas/salidas.	1	Problemas en los datos de entrada. El problema en los datos de entrada desencadenará en un mal funcionamiento de la planta.	Comprobar comunicaciones del PLC	Trimestral
							2	Problema en los datos desalida. Los datos de salida del PLC no son los adecuados, de manera que el funcionamiento de la planta no es el correcto.	Comprobar comunicaciones del PLC	Trimestral
					C	El HMI no responde	1	Falla SCADA. No es posible controlar los parámetros de la planta.	Comprobar SCADA	Semanal
							2	Pérdida de datos. Un cierre inesperado del programa puede causar la pérdida de datos del SCADA, de manera que deberá de existir una copia de seguridad de estos.	Guardar copia de seguridad del SCADA	Trimestral
							3	Falla Eléctrica. Si HMI no puede encenderse porque no le llega corriente.	Comprobar estado de la toma eléctrica	Anual

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

El desarrollo de los objetivos de este trabajo permitió identificar las siguientes conclusiones.

- Se identificó que los equipos críticos de la PTAR de Aguazul, con base en los criterios correspondientes a la metodología de mantenimiento que se centra en la confiabilidad, son los sopladores eléctricos, los decantadores, las bombas de lodos y el sistema de control.
- Se estableció la condición actual no solamente de los equipos críticos de la planta objeto de estudio, sino de todos los 42, de acuerdo con la Tabla 6 y con la Tabla 8.
- La aplicación del método del mantenimiento centrado en confiabilidad a los equipos críticos de la PTAR permitió establecer que esas actividades son relativamente sencillas, y que las fallas se presentan especialmente como consecuencia de las condiciones de contaminación que se presentan en este tipo de instalaciones.

7.2. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos muestran la conveniencia de seguir las siguientes recomendaciones:

- Realizar limpieza diaria de los cilindros actuadores de los decantadores.
- Llevar un registro diario de las actividades de limpieza de los cilindros actuadores de los decantadores.

- Controlar la corriente eléctrica consumida por las bombas de lodos.
- Llevar un registro diario de la corriente eléctrica consumida por las bombas de lodos.
- Extraer las bombas de lodos y retirar los taponamientos que estén ocasionando los aumentos de corriente.
- Contratar un servicio especializado de electrónica para revisar el sistema de control PLC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blair, R., Waldron, S. & Gauchotte, C., 2019. Average daily flow of microplastics through a tertiary wastewater treatment plant over a ten-month period. *Water Research*, 163, pp. 114-139.
- Castrejón, D., 2019. *Integración de actuadores hidráulicos para los sistemas secundarios de moldeo y liberación en moldes de inyección de plástico*. Lerma, México: Ciateq.
- De Marco, T. & Lazzaroni, C., 2022. *Tratamiento de efluentes con alto contenido de azufre mediante biodigestión anaeróbica*. Buenos Aires: Pontificia Universidad Católica de Argentina.
- Díaz, M. y otros, 2019. Evaluación de tratamiento químico para aguas residuales provenientes de la elaboración de productos cárnicos. *Revista Centro Azúcar*, 46(5), pp. 114-119.
- Gobernación de Casanare, 2019. *Aguazul*. [En línea] Available at: <https://www.casanare.gov.co/ElCasanare/Paginas/Aguazul.aspx> [Último acceso: 5 abril 2023].
- Hairom, N. y otros, 2021. A review of nanotechnological applications to detect and control surface water pollution. *Environmental Technology & Innovation*, 24, pp. 120-132.
- Huarhua, T. & Vera, V., 2022. Comparación en la eficacia de remoción de patógenos en aguas residuales domésticas con tratamientos biológicos por bacterias facultativas y

- tratamientos físicos por radiación UV. *Revista Ciencia y Tecnología para el Desarrollo UJCM*, pp. 29-36.
- Iyer, K., Kim, S., Robbins, N. & Cowen, L., 2022. Downregulation of Essential Genes in the Fungal Pathogen *Candida auris*. *Candida auris: Methods and Protocols*, pp. 111-126.
- Marín, A. & Osés, M., 2019. *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados*. Jalisco: s.n.
- Obotey, E. & Rathilal, S., 2020. Membrane technologies in wastewater treatment: a review. *Membranes*, 10(5), pp. 80-98.
- Pilapanta, M., 2022. *Política pública y residuos sólidos en las Islas Galápagos: Una perspectiva desde la economía ambiental, período 2015-2020*. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato.
- Rivera, M. y otros, 2021. La calidad de las aguas residuales domésticas. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 6(3), pp. 228-245.
- Rosillo, R. & Sosa, J., 2022. *Diseño de un sistema SCADA para mejorar la gestión operativa en el área de mantenimiento de un terminal portuario*. Lima, Perú: Universidad César Vallejo.
- Samaniego, M., Caiza, Y. & Pilco, J., 2021. Caracterización microbiológica de muestras de aguas servidas pre filtradas de la comunidad de San Vicente de las Casas de la provincia de Chimborazo. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, pp. 112-130.

Santoyo, E. R., 2022. *Manejo y uso de biosólidos en suelos agrícolas*, Montecillo, Texcoco, EDO. México: s.n.

Vishnu, C. & Regikumar, V., 2019. Reliability based maintenance strategy selection in process plants: a case study. *Procedia Technology*, pp. 1080-1087.

Zeinalnezhad, M., Chofreh, A., Goni, F. & Klemeš, J., 2020. Critical success factors of the reliability-centred maintenance implementation in the oil and gas industry. *Symmetry*, *12(10)*, pp. 15-85.

ANEXOS

Anexo 1. Operación de los sopladores

Puesta en marcha de los sopladores

- Seguridad
 - Riesgo eléctrico: no tocar piezas o partes energizadas.
 - Realizar el aislamiento eléctrico desde todas las fuentes de alimentación eléctrica del equipo, aplicando el bloqueo para impedir la energización no autorizada.
 - Verificar la ausencia de tensión.
- Fuerza de compresión liberada
 - Antes de intervenir despresurizar todo el sistema.
 - Despresurizar completamente todas las partes de la máquina que puedan contener aire a presión
 - La puesta en marcha solo se debe realizar por personal entrenado y habilitado.,
 - Antes poner en operación la máquina es indispensable comprobar que:
 - Todo el personal de mantenimiento y operación sen han retirado de la maquina.
 - Las guardas y demás protecciones de la maquina están colocados en el sitio correspondiente y están anclados solidamente,.

- Cuando la maquina ha sido almacenado por largos periodos de tiempo se requieren aplican las siguientes medidas especiales para la puesta en marcha:

Periodo de almacenamiento superior a	Medida
12 meses	Reemplazar la totalidad del aceite lubricante
36 meses	Hacer controlar todo el estado técnico por el servicio autorizado KAEZER.

- Verificar el sentido del giro

El bloque de aspas tiene que girar en el sentido de giro correcto. El cigüeñal debe girar en sentido opuesto a las agujas del reloj, viéndolo desde el final del eje. Las flechas del sentido de giro se encuentran en la protección de correas y el bloque de las aspas de la máquina. Se ha marcado por una flecha en el ventilador el sentido de giro del ventilador. Si el sentido de giro es correcto, el aire que sale de la capota silenciadora es soplado hacia el exterior fuertemente. Si el motor del ventilador gira en el sentido de giro incorrecto, el aire de soplado hacia el exterior es débil.

- Riesgo de lesiones graves por pieza en movimiento

Riesgo de lesiones graves: no quitar los paneles de revestimiento

- Sentido de flujo incorrecto

Si el sentido de flujo es incorrecto, se invertirá la dirección del caudal y se efectúa la aspiración del tubo de presión.

La aspiración de partículas extrañas o una depresión demasiado elevada pueden provocar un deterioro o la destrucción del bloque de aspas.

- Asegurar el sentido de giro correcto.
- Quitar las tapas de mantenimiento de filtros en el silenciador de aspiración o el filtro de aspiración y/o las válvulas de retención por el lado de aspiración.
- Verificar que el sentido de giro del motor eléctrico es correcto es decir que coincida con la flecha dibujada en el lado libre del motor eléctrico, mediante la ayuda de un medidor de campos giratorios conectado en la acometida eléctrica.
- Si el sentido de giro del motor de accionamiento es incorrecto, habrá que invertir los cables de alimentación del motor L1 y L2.
- Si es necesario invertir el sentido de giro del motor del ventilador, invierta las líneas de alimentación del motor del ventilador L1 y L2.

Funcionamiento de los sopladores

Conexión y desconexión: la conexión y desconexión depende ampliamente de los procedimientos operacionales establecidos en las instalaciones previstas.

- Frecuencia de conmutación máxima por hora: 6
- Arrancar la máquina solo de parada
- Si hay contrapresión en el sistema de tuberías, hay que procurar una descarga de arranque adecuada.

- Conexión: Aire a presión

Nunca dirija la salida de aire comprimido hacia personas o animales.

- Comprobar que:

- No hay personal trabajando en la máquina
- Se hayan fijado todos los paneles de revestimiento
- Conectar la máquina del armario eléctrico instalado por el usuario.

Desconexión de los sopladores

- Desconectar la máquina del armario eléctrico instalado por el usuario.
- Conexión, conmutación y desconexión con motor de polos conmutables
- Condiciones: Máquina funciona con motor de polos conmutables.

Funcionamiento de los sopladores en velocidad reducida

- Conexión:

- Conectar el motor en la conexión para velocidad nominal reducida.
- Modo de arranque: Directo o estrella – triángulo.

- Desconexión:

- Desconectar el motor del armario eléctrico instalado por el usuario.

Operación en alternativa a velocidad baja o alta.

- Conexión:
 - Conectar el motor en la conexión para velocidad nominal reducida
 - Modo de arranque: directo o estrella – triángulo.
- Conmutación - de velocidad baja a velocidad alta:
 - Una vez alcanzada la velocidad nominal reducida se conmutará a velocidad nominal alta.
- Conmutación – de velocidad alta a velocidad baja:
 - Desconectar el motor. Cuando el motor funcione a velocidad nominal reducida volver a conectar el motor.
- Desconexión:
 - Desconectar el motor en el armario eléctrico instalado por el usuario.
- Función motor del ventilador
 - Prestar atención a un correcto funcionamiento del motor del ventilador de la capota insonorizante.
- Precaución
 - Daños en la máquina debido a temperatura demasiado altas en la capota insonorizante.

- Un sobrecalentamiento puede causar fallos en el bloque de las aspas u otros componentes.
- En caso de una parada del ventilador procurar la entrada suficiente de aire refrigerante o desconectar la máquina.

Anexo 2. Operación de las bombas de lodos

Antes de poner la unidad en funcionamiento, comprobar lo siguiente:

- Todos los dispositivos de seguridad recomendados están instalados.
- Que el aislamiento del cableado no ha sufrido daños.
- Toda la suciedad y residuos se han eliminado.
- Asegure que la línea de descarga esta despejada antes de poner en funcionamiento la bomba.
- El nivel de ruido del equipo puede variar durante la operación, esto debido a la curva de rendimiento y al nivel de carga en el cual este operando. Sin embargo, en condiciones de régimen permanente el nivel del ruido no sobrepasa los 70 dB.

Puesta en marcha de las bombas de lodos

- Antes de intervenir la bomba asegurarse que se realizó el aislamiento eléctrico.
- Riesgo eléctrico: un motor de imanes permanente genera tensión cuando el eje está en rotación. Antes de realizar ninguna instalación eléctrica, asegurarse de que el eje no puede girar.
- En algunas instalaciones, la bomba y el líquido que la rodea pueden calentarse y generar quemaduras.
- Asegurarse de que ninguna persona esté cerca de la unidad al arrancarla. La bomba se sacudirá en dirección opuesta a la rotación del impulsor.

- Asegurarse de que la rotación del impulsor sea la correcta.
- Comprobar el nivel aceite en la cámara de aceite
- Quitar los fusibles o corte la corriente con el interruptor de circuito y comprobar que el impulsor gire sin problemas.
- Comprobar que el equipo de control funcione
- Poner en marcha la bomba.