



TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO

Diseño de un sistema integrado de lubricación para eliminar fallas de la bomba incorporada de un turbogenerador de vapor.

Modalidad: Proyecto de Investigación

AUTORES

Luis Alfredo García Rodríguez

Cc.13.746.487

Luis Alexander Rojas Garavito

Cc.13.514.410

Karol Johana Suarez Vasco

Cc.1.096.236.423

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA

**PROGRAMA INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
BARRANCABERMEJA**

FECHA DE PRESENTACIÓN: 11-09-2020



TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO

Diseño de un sistema integrado de lubricación para eliminar fallas de la bomba incorporada de un turbogenerador de vapor.

Modalidad: Proyecto de Investigación

AUTORES

Luis Alfredo García Rodríguez
Cc.13.746.487

Luis Alexander Rojas Garavito
Cc.13.514.410

Karol Johana Suarez Vasco
Cc.1.096.236.423

**Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO ELECTROMECHANICO**

DIRECTOR

Msc. Leidys Marleyn Rodríguez Castro

Grupo de Investigación en Ingeniería y Ciencias Sociales-**DIANOIA**

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA

**PROGRAMA INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
BARRANCABERMEJA**

FECHA DE PRESENTACIÓN: 11-09-2020

Nota de Aceptación

Trabajo de grado titulado: Diseño de un sistema integrado de lubricación para eliminar fallas de la bomba incorporada de un turbogenerador de vapor

Presentado por: LUIS ALFREDO GARCÍA RODRÍGUEZ, LUIS ALEXANDER ROJAS GARAVITO Y KAROL JOHANA SUAREZ VASCO. Para optar el título de INGENIERO ELECTROMECHANICO.

Firma del Evaluador



Firma del Director

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar a cumplir tan anhelado logro y haberme dado salud y sabiduría para lograr cada uno de mis objetivos, a mi esposa e hijos, por su apoyo en todo momento, por sus consejos, fundamentos, valores y por la motivación constante que me ha permitido ser una persona responsable.

LUIS ALFREDO GARCÍA RODRÍGUEZ

Dedico este proyecto a Dios, por permitirme superar cada obstáculo a lo largo de mi carrera, a mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, mi madre quien con sus palabras de aliento siempre me motivaban para seguir adelante y cumplir con mis objetivos, a mis hijos por ser la fuente de inspiración y motivación para poder superarme cada día más y luchar para que la vida nos conceda un mejor futuro y a mis compañeros y amigos quienes compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas.

LUIS ALEXANDER ROJAS GARAVITO

La realización de este proyecto investigativo se lo dedicado primordialmente a Dios quien me dio la fortaleza suficiente para seguir adelante en todo momento. A mi madre por brindarme su amor y cariño incondicional, por ser el pilar fundamental que ha sostenido mi vida llenándome de amor y comprensión. A mis amigos y compañeros de trabajo por brindarme parte de sus conocimientos.

KAROL JOHANA SUAREZ VASCO

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios quien fue pieza fundamental para el desarrollo de este logro, por bendecirnos y darnos fuerzas para llegar hasta donde hemos llegado, porque hiciste realidad este sueño tan anhelado para nuestras vidas.

A nuestras familias quienes siempre nos han acompañado en nuestros propósitos, lo cual las convierte en un papel importante en la toma de nuestras decisiones, su apoyo incondicional, las palabras de superación y esfuerzo que son día a día de suma importancia en el proceso de aprendizaje. A la Unidades Tecnológicas de Santander y a todos sus respetados docentes y directivos, por su dedicación en cada clase, por proyectarnos hacia un mejor futuro lleno de triunfos, por su inmensa paciencia y enseñanza que nos guiaron en todo momento para que nuestras metas se hicieran realidad.

A nuestra directora de proyecto MSc. Ing Qca. LEIDYS MARLEYN RODRÍGUEZ CASTRO por su esfuerzo, apoyo incondicional, tiempo, y dedicación, quien, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación transmitida que fueron de mucha ayuda en todo momento de nuestra carrera, debido a que siempre estuvo para orientarnos en las dificultades que se nos fueron presentando en el trayecto del desarrollo de este proyecto.

A los de ingenieros de confiabilidad de equipo rotativo que con sus aportes y enseñanzas nos brindaron toda la orientación necesaria y el apoyo incondicional para culminar con éxito este proyecto.

Contenido

RESUMEN EJECUTIVO	12
INTRODUCCIÓN	14
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	15
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	17
1.3. OBJETIVOS.....	19
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES.....	20
2. MARCOS REFERENCIALES	23
2.1. MARCO HISTÓRICO	23
2.2. MARCO TEÓRICO.....	26
2.3. MARCO CONCEPTUAL	33
2.4. MARCO LEGAL.....	36
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION	38
4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	40
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN EXISTENTE.	40
4.2. REALIZAR UN ANÁLISIS DE FALLA A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CAUSA RAÍZ (RCA) QUE CONLLEVE A DETERMINAR EL DISEÑO REQUERIDO PARA ELIMINAR LA FALLA EN EL SISTEMA DE LUBRICACIÓN.....	50
4.2.1. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO.	56
4.2.2. DESCRIPCIÓN DEL MODO DE FALLA DEL EVENTO.....	57
4.2.3. PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS DE FALLA.	57
• PROCEDIMIENTO INADECUADO (MONTAJE DE CORONAS)	58
• PROCEDIMIENTO ALINEACIÓN PEDESTAL EMPUJE RESPECTO A TURBINA	58
4.3. PARAMETRIZAR LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS, EQUIPOS, ACCESORIOS, Y MATERIALES.	66
4.4. ORGANIZAR UN TALLER DE RCA (ANÁLISIS CAUSA RAÍZ) A TRAVÉS DEL USO DE REUNIONES SISTEMÁTICAS QUE INVOLUCRE PROFESIONALES DE CONFIABILIDAD DEL ÁREA DE TURBOGENERADORES CON EL FIN DE RETROALIMENTAR LOS AVANCES DEL PROYECTO.	

- COMO SOPORTE TÉCNICO PARA EL DESARROLLO, ESTUDIO DE LA PROBLEMÁTICA Y LA SOLUCIÓN PLANTEADA, SE REALIZARON CONSULTAS VÍA TELEFÓNICAS CON INGENIEROS DE CONFIABILIDAD DE LA EMPRESA QUE POSEE EL TURBOGENERADOR. 76
- 4.5. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE LUBRICACIÓN A TRAVÉS DE ESTÁNDARES ESTABLECIDOS POR LA NORMA API 614..... 78**
- 5. RESULTADOS..... 90**
- 6. CONCLUSIONES 93**
- 7. RECOMENDACIONES 94**
- 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 96**
- 9. ANEXOS 97**
- ANEXO 1 97**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Eolipila de Heron.....	23
Figura 2: Primera turbina de gas Industrial.....	24
Figura 3: Curva de Mckee	29
Figura 4: Lubricación por anillo	30
Figura 5: Lubricación por inmersión	31
Figura 6: Lubricación por presión	32
Figura 7: Lubricación por niebla	32
Figura 8: Bomba Principal	41
Figura 9: Bomba de emergencia	44
Figura 10: intercambiadores de calor	45
Figura 11: filtros de lubricación	47
Figura 12: filtro de succión bombas auxiliares	47
Figura 13: válvula control de Presión	48
Figura 14: Diagrama de Análisis de falla	53
Figura 15: aviso de falla para turbogenerador	55
Figura 16: sistema de gobernación y lubricación.....	56
Figura 17: Diseño sinfín corona.....	57
Figura 18: Deposito del sistema de lubricación	66
Figura 19: Bomba sistema de lubricación.....	69
Figura 20: Intercambiadores de calor	70
Figura 21: filtros del sistema de lubricación	71
Figura 22: ventana operativa sistema de lubricación.....	75
Figura 23: válvulas de alivios recomendadas por API 614	80
Figura 24: bomba de tornillo vertical	84
Figura 25: bomba de tornillos horizontal.....	85
Figura 26: capacidad de carga de turbogenerador	90
Figura 27: tendencia de falla con modificación sinfín-corona.	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Matriz de selección de alternativas	64
Tabla 2: Accesorios del depósito	67
Tabla 3: instrumentación del sistema de lubricación.....	72
Tabla 4: Características requeridas	73
Tabla 5: temperaturas de operación	74
Tabla 6: Tipos de Bombas.....	81
Tabla 7: Bombas de desplazamiento positivo más usadas.....	82
Tabla 8: criterios de selección de bombas de tornillos	86

RESUMEN EJECUTIVO

El desarrollo del presente trabajo de investigación tiene como finalidad desarrollar el diseño de un sistema integrado de lubricación mediante la norma API 614, para eliminar las fallas frecuentes de la bomba incorporada de un turbogenerador de vapor el cual se encuentra operando en una de las refinerías de Colombia, dicho sistema tiene como función principal mantener lubricados los componentes que se encuentran en movimiento, a una temperatura adecuada, evitando el desgaste de los mismo para no afectar su funcionamiento.

El desarrollo del proyecto tiene una metodología de tipo descriptiva y explicativa, en la cual se tiene en cuenta los diferentes aspectos que comprenden el proyecto, haciendo un análisis desde los requerimientos del diseño y cálculos, hasta las especificaciones que comprende cada componente de la máquina. Para ello se realiza un diagnóstico de la condición actual del sistema de lubricación, donde se pueda evidenciar los siguientes problemas: tipos de daños frecuente de la bomba de lubricación incorporada, desgaste prematuro de componentes, paradas de planta no programadas, costos elevados de mantenimiento (recursos humanos y materiales).

El resultado principal que se espera obtener con la implementación un nuevo sistema de lubricación es mejorar la confiabilidad de la máquina, permitiendo periodos de trabajo más prolongados, donde las paradas que se realicen sean previamente programadas con una durabilidad entre ellas aproximadamente de cada 4 años o según el programa de mantenimiento definido.

Es así como se logra poner en práctica los conceptos que permiten conseguir un mantenimiento más prolongado para un equipo, con lo cual se benefician tanto el

docente, el estudiantado del área de electromecánica y la empresa que contiene este tipo de turbogeneradores al momento de implementar este proyecto.

INTRODUCCIÓN

Con el avance vertiginoso de la tecnología en las últimas décadas, se han venido planteando numerosos retos a las empresas de tipo industrial, forzándolas cada vez más a adaptarse a dicho contexto tecnológico, que exige cumplir a cabalidad con estándares de calidad, producción y seguridad, con el objetivo de mostrar alta competitividad en el mercado actual. En el caso de la industria del petróleo y más precisamente en el proceso de refinación se requieren mantener los indicadores de rentabilidad al tope valiéndose de estrategias y técnicas de confiabilidad que les permitan a sus plantas mantener siempre sus máquinas operando al máximo de sus capacidades sin afectar la integridad técnica de los equipos y física de sus operarios.

En las plantas de refinación generalmente se cuenta con equipos de generación de energía eléctrica, como es el caso de los turbogeneradores que se encargan de suplir las diversas necesidades de tipo energético a través del aprovechamiento algunas veces del vapor generado. Estos equipos cuentan con sistemas críticos como es el caso del sistema de lubricación cuya función es evitar que las superficies que entren en contacto generen un desgaste excesivo y con ello se afecte la vida útil del equipo. En virtud de ello, se desarrolla este proyecto de investigación que se enfoca en dar solución a una problemática recurrente de un equipo crítico como es el caso de un turbogenerador a vapor, que a través de la identificación de malos actores se plantea buscar la causa raíz de las fallas y plantear una propuesta factible desde el punto de vista técnico y económico, que permita aumentar el indicador de confiabilidad del equipo.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concepto de turbo-máquina hace referencia a una turbina de vapor que transforma la energía del vapor en energía mecánica a través de un intercambio en la cantidad de trabajo producido por el movimiento entre el fluido y el rotor. El principio de funcionamiento es el siguiente: se inyecta vapor a una presión y temperatura establecida, el vapor crea una rotación en los álabes, los cuales están unidos al eje. El vapor inyectado tiene una presión y una temperatura menor a la salida de la turbina, una porción de la pérdida de energía del vapor se utiliza para el desplazamiento del rotor. El equipo descrito requiere de los siguientes sistemas: de lubricación, de control y regulación, de refrigeración, de vacío, cojinetes de fricción y equipos auxiliares.

Actualmente, en una de las refinerías de Colombia, en el Departamento de Servicios Industriales existe un turbogenerador de vapor; puesto en servicio aproximadamente en el año de 1980, con una capacidad de generación eléctrica de 20 MW, sumado a esto la turbina conductora está diseñada para suministrar vapor de extracción a 215 psig. La turbina del sistema de generación ha venido presentando fallas recurrentes en el sistema de transmisión sinfín-corona que transmite movimiento a la bomba principal de lubricación del turbogenerador, específicamente representado en el desgaste acelerado del componente del material blando (corona). En dicha falla se evidencia un desgaste excesivo en la corona lo cual se comprobó a través de una inspección visual y análisis de aceites que determinó un alto contenido de metal.

Inicialmente se ha reparado la avería a través del mantenimiento correctivo, sin embargo, la falla a aparecido de manera recurrente, lo cual ha obligado a los ingenieros de mantenimiento a cambiar todos los componentes afectados, pero aun así la falla persiste, por consiguiente, se hace necesario el cambio de una estrategia de mantenimiento que involucre análisis de falla y así determinar mediante la causa raíz una solución viable y confiable.

Lo anterior precisa de una solución que responde a la pregunta sobre ¿Cómo diseñar un sistema integrado de lubricación basado en análisis de causa raíz para eliminar las fallas de la bomba incorporada de un turbogenerador de vapor, bajo el estándar API 614 Sistemas de aceite lubricante de la norma ISO 10438 y ASTM-D 4378-97 “In service monitoring of mineral turbine oil for steam and gas turbine?”

1.2. JUSTIFICACIÓN

Se determina que el sistema de lubricación del turbogenerador presenta fallas repetitivas que afectan el comportamiento normal de trabajo del equipo, para ello, se debe tener en cuenta que el propósito de este sistema: es lubricar, enfriar los cojinetes hidrodinámicos y mantener el mecanismo de control en funcionamiento. Es preciso decir, que los sistemas de aceite lubricante que cumplen con la norma API 614 operan a un nivel extremadamente alto de eficiencia.

En consideración un turbogenerador de vapor de una refinería en el sector de Servicios industriales, es fuente esencial en la generación de energía eléctrica, y posteriormente la energización de la planta y demás equipos que se abastecen de él. Cuando se presenta una falla o evento de no confiabilidad, el impacto se genera en la pérdida de generación eléctrica de 20 MW y vapor de extracción de 150 psi, la interrupción de estos suministros, dependiendo del contexto afecta de forma radical la disponibilidad operacional de las plantas conectadas y/o Refinería.

El proyecto busca realizar un estudio de diseño para mejorar el estado actual del sistema de lubricación mediante el análisis de esta problemática, iniciando por la verificación del sistema de bombeo que tiene actualmente, junto al respaldo que posee la bomba principal y sus demás elementos que hacen posible el recorrido del aceite; después se tendrá un diagnóstico estructural que permitirá tener una visión más amplia del suceso. Se realizará con el propósito de eliminar las fallas que frecuentemente la están afectando.

Cualquier problema que ocasione una parada de la turbina, genera pérdidas multimillonarias, por tal motivo es de gran beneficio para la empresa y los operadores tener el turbogenerador operando bajo condiciones estables para

garantizar su rendimiento en la planta y confiabilidad de todos los equipos que funcionan en conjunto con él.

El desarrollo de este proyecto de diseño del sistema de lubricación en el turbogenerador permite el beneficio de las partes involucradas; para los estudiantes, llevando a cabo la proyección e intervención del cálculo de lo aprendido durante su carrera para la investigación, mostrando sus habilidades y destrezas, y así poder optar el título como ingenieros Electromecánicos de Unidades Tecnológicas de Santander Regional Barrancabermeja, para la institución, se logra el desarrollo de un proyecto tomado de la industria, lo cual aumenta el impacto del grupo de investigación en la sociedad y por último para empresa que dispone del equipo, que logra obtener estudios de fallas desde una perspectiva académica que involucre metodologías de investigación que conlleven a resultados más precisos.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema integrado de lubricación mediante la norma API 614, que permita corregir las fallas frecuentes de la bomba incorporada de un turbogenerador de vapor a través de los talleres de RCA (análisis causa raíz) adelantados en reuniones sistemáticas.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los componentes que integran el sistema de lubricación existente, como punto de partida para la selección de componentes del diseño requerido.
- Realizar un análisis de falla a través de la metodología de análisis causa raíz (RCA) que conlleve a determinar el diseño requerido para eliminar la falla en el sistema de lubricación.
- Parametrizar las características de los fluidos, equipos, accesorios, y materiales, requeridos para los cálculos hidráulicos, termodinámicos, físicos y mecánicos del sistema integrado de lubricación.
- Organizar un taller de RCA (Análisis Causa Raíz) a través del uso de reuniones sistemáticas que involucre profesionales de confiabilidad del área de turbogeneradores con el fin de retroalimentar los avances del proyecto.
- Evaluar el diseño planteado mediante los estándares establecidos por la norma API 614 con el fin de obtener un diseño más confiable.

1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

(Soto, 2018) realizó una investigación en la universidad de Autónoma de Occidente titulada diseño de un sistema de lubricación para el grupo de arrastre y la mesa de oscilaciones de la máquina de colado continuo de la empresa SIDOC S.A. el objetivo de la investigación fue realizar un diseño óptimo a partir del diagnóstico realizado al sistema a los rodamientos que se encuentran integrados en el grupo de arrastre, obteniendo como resultado un sistema más confiable con mayores niveles de disponibilidad en el equipo.

A nivel nacional se encontró la siguiente propuesta de (Piedraita, 2016) titulada “implementación de una rutina lubricación para las máquinas de tejer de textiles omnes. El tema desarrollado a través de este trabajo de grado fue pactar de manera idónea la realización de la rutina de lubricación de las maquinas tejer, teniendo en cuenta aspectos de disponibilidad de la empresa.

A nivel nacional se encontró la siguiente propuesta, titulada “optimización del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para los equipos rotativos en la planta de aromáticos de la GRB de Ecopetrol”. La Empresa Colombiana de Petróleos es la principal compañía petrolera más grande del País, por su tamaño forma parte de las cinco petroleras más importantes de Latinoamérica y de las 39 a nivel mundial. Para garantizar el consumo y la demanda nacional de combustibles y petroquímicos con estándares de calidad cada vez más altos y de manera rentable, la compañía dispone de una infraestructura que integra las fases de transformación de hidrocarburos. En los últimos años Ecopetrol S.A. ha tenido cambios en aspectos de tipo organizacional, tecnológicos y documental en el área de mantenimiento, lo que ha permitido beneficiar la planta de aromáticos. En la actualidad la planta ha puesto en marcha sistemas de seguridad comprometidos en fortalecer el estado operativo teniendo en cuenta factores significativos como: la utilización de recursos,

gastos generales, seguridad en el personal y medio ambiente. El desarrollo del mantenimiento centrado en confiabilidad se llevó a cabo en los años 1960 y 1970 por la Aviación Comercial de los Estados Unidos con ayuda de entidades como Boeing y la NASA, que posteriormente tuvo gran aceptación en sectores de refinación, generación de energía, gasíferos, industrias de manufacturas, petroquímicas, entre otros. Esta metodología es implementada para evaluar los requerimientos y mejorar los nuevos planes de mantenimiento, conservando los activos en cada proceso y asegurando un costo beneficio para la Compañía. Propuesta realizada por (José Roa & José Gómez 2014) Universidad Industrial de Santander.

A nivel nacional se encontró la siguiente propuesta desarrollada por la compañía general de Aceros S.A. titulada: "Diseño de rutinas y cartas de lubricación para los centros de mecanizado CNC". La finalidad de este proyecto es aportar eficazmente en las rutinas diarias que se realizan en planta para la sostenibilidad y mantenibilidad de las máquinas CNC de la Compañía General de Aceros S.A., de la ciudad de Bogotá. El propósito de un óptimo funcionamiento de los equipos es lograr excelentes resultados con productos de muy buena calidad, reduciendo el impacto ambiental generado y permitiendo un aseguramiento en los procesos con la finalidad de disminuir los riesgos inherentes en la operación de los equipos. El documento describe los conceptos generales de la empresa, su misión, visión y valores centrales; luego explican el planteamiento del problema, definición y preguntas de investigación, plantean la justificación y objetivos que buscan desarrollar en el proyecto. Describen un marco teórico que incluye la conceptualización del mantenimiento y lubricación industrial; un marco que contiene la normatividad correspondiente a los lubricantes, al igual que un marco referencial para comprender la condición actual en el que se encuentran los sistemas de lubricación implementados en planta. Exponen el desarrollo de las mejoras

desarrolladas en planta para optimizar la lubricación en los equipos, alcanzando el resultado del proyecto, cartas y prácticas de lubricación para los centros de mecanizado CNC., y para finalizar muestran las conclusiones donde se evidencian los logros alcanzados según los objetivos planteados en el proyecto (Diego Callejas & 2015) Fundación Universitaria los libertadores Bogotá D.C.

A nivel nacional se encontró la siguiente propuesta, titulada “mejoramiento de la eficiencia de un turbogenerador a gas reduciendo la temperatura del aire de entrada”. Actualmente, la empresa HOCOL cuenta con turbogeneradores a gas para su sistema de generación, Marca Solar “Taurus 60”. Parte de este gas es extraído del campo y otra fracción es comprada; cada turbo máquina produce una potencia de 5670 KWe (Kilovatios eléctricos) en salida, permitiendo una capacidad limitada del generador de 4 MW en potencia real de salida. Para desarrollar el proyecto describieron el funcionamiento de las máquinas operando, con el objetivo de escoger y diseñar un adecuado sistema enfriamiento del aire para la entrada al compresor de 24°C a 10°C. Escogieron el sistema de refrigeración por absorción, realizaron los cálculos de ingeniería requeridos para que el enfriador en condiciones de operación pueda bajar la temperatura de aire a 10°C. Luego desarrollaron el sistema de control estableciendo la temperatura de entrada de aire a 10°C como referencia en un punto fijo, controlando internamente en el enfriador el flujo másico del agua para obtener en la entrada una temperatura constante. El resultado obtenido fue beneficioso ya que en la entrada del equipo se logró reducir la temperatura del aire, aumentando la potencia de generación y disminuyendo la consumida por el sistema de refrigeración, también este sistema no necesita de un mantenimiento frecuente porque no posee componentes en movimiento en el proceso térmico. Realizada por (José Orjuela & Diego Díaz 2016) Universidad de la Salle. Bogotá D.C.

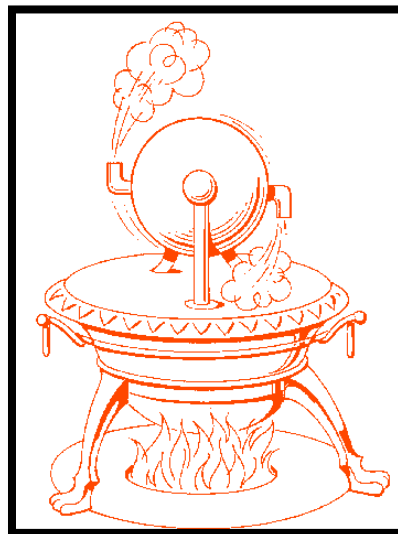
2. MARCOS REFERENCIALES

2.1. MARCO HISTÓRICO

En la actualidad, las turbinas a gas disponen de un diseño fundamentado en una turbina de expansión, una cámara de combustión y un compresor axial multi-etapas, construidos de manera compacta constituyendo un solo equipo. Para llegar a este diseño de turbina ha transcurrido una larga evolución principalmente desarrollada en el siglo XX.

El primer logotipo basado en el concepto de la turbina se remonta a los años 150 A.C. donde el filósofo egipcio Hero ideó un pequeño instrumento llamado eolípilo, que a partir de una pequeña caldera la cual generaba vapor lo hacía girar (figura 6). Este juguete era una pura invención mental, pues no se tiene certeza de que se haya construido (Zambrano, 2011).

Figura 1: Eolípila de Heron



Fuente: tomado de

<https://www.monografias.com/trabajos/turbinagas/turbinagas.shtml>

Realmente la primera turbina de gas construida fue concebida por J.F. Stolze en 1872 a partir de una patente de Fernlhous, y fabricada entre los años 1900 y 1904. Formada por un compresor axial multi-etapas, una cámara de combustión donde ingresaban los gases de escape de la turbina que se precalentaban en un intercambiador de calor, y una turbina de expansión multi-etapas. A pesar de ser un diseño original, tuvo poco éxito debido al bajo rendimiento en el compresor como en la turbina, por suministrar baja relación de compresión y baja temperatura máxima alcanzada debido a los materiales utilizados en la época (Zambrano, 2011).

Figura 2: Primera turbina de gas Industrial



Fuente: tomado de ASEA Brown Boveri AG

La relación de compresión era el reto más importante a superar para el desarrollo de las turbinas, mientras no se construyeran compresores eficientes era imposible desarrollar turbinas con rendimientos que permitieran su evolución. Los primeros turbo-compresores axiales que mejoraron su rendimiento surgen en 1926. A. A. Griffith instauró los principios básicos de la teoría del perfil aerodinámico para el diseño de turbinas y compresores, desde ese momento se inicia el desarrollo de los

compresores axiales. La teoría del perfil aerodinámico expuesta por Griffith es sin lugar a dudas uno de los logros más importantes para el desarrollo de las turbinas de gas en la actualidad, y mediante los conocimientos aplicados por Griffith obtuvo el desarrollo de turbinas y compresores de alto rendimiento.

El desarrollo de un compresor axial a partir de la mejora de los conceptos aerodinámicos ha permitido el progreso de las turbinas de gas por las altas relaciones de compresión. El segundo pilar está enfocado en la innovación y mejoramiento tecnológico en el campo de los materiales, usando nuevos recubrimientos cerámicos y aleaciones mono-cristales. Esto, unido a un intenso estudio de la refrigeración interna de los álabes ha permitido alcanzar temperaturas más altas en las primeras ruedas como en la cámara de combustión.

Lograr el desarrollo de la informática ha sido la tercera clave, donde el empleo de ordenadores ha permitido simular diferentes comportamientos y condiciones para el mejoramiento de los diseños. También se ha progresado en los sistemas de control haciéndolos más sencillos de operar, vigilar y controlar los parámetros de operación con mayor frecuencia, igualmente estos sistemas permiten el diagnóstico técnico integral del equipo para predecir fallas futuras.

2.2. MARCO TEÓRICO

Según (Adams, 2000) Constantemente en la industria obtenemos diferentes elementos y componentes de equipos donde el principio de funcionamiento es a través del contacto entre dos o más superficies, como son: cojinetes, rotores, gobernadores de velocidad, mecanismos de accionamiento y transmisiones por engranajes, entre otros; estos componentes pertenecen al diverso grupo donde las partes móviles están expuestas a condiciones severas de operación, donde el desgaste, el calentamiento y la fricción generada influyen en la integridad mecánica de una máquina; la finalidad de la lubricación es disminuir los efectos de dichos factores adicionando un fluido entre las superficies móviles denominado lubricante.

En una chumacera o cojinete, el eje rota dentro del cilindro, formando un movimiento reciproco entre ellos conocido como deslizamiento, esta situación origina efectos desfavorables a este principio, por este motivo es indispensable de una película lubricante para minimizar los factores relacionados al riesgo del desprendimiento y desgaste en las superficies de los cojinetes. En la industria son ampliamente usadas las chumaceras, las cuales se encuentran en cualquier máquina alternativa o rotativa, como turbinas a vapor o a gas, compresores, motores de combustión y bombas, entre otros, lo que permite que la ingeniería tenga un campo bastante amplio para el estudio de la lubricación, en la actualidad sigue siendo tema de desarrollo e investigación (Albarracin , 2002).

Tipos de lubricación

Según (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2008) En la actualidad existen cinco tipos de lubricación.

- **Hidrodinámica:** Hace referencia al tipo de lubricación por medio de la cual una capa de fluido mantiene separadas las superficies en contacto, lo cual disminuye el roce entre los metales reduciendo el desgaste y la fricción. Esta

lubricación no depende de la presión a la cual ingresa el fluido al cojinete, pero en algunos casos pueda que sí; depende de una entrega adecuada de aceite lubricante a cada momento, esto permite formar la presión de la película de aceite a través del empuje del lubricante a una adecuada velocidad hasta la zona cuneiforme del buje. Esta lubricación también es definida como película fluida o completa.

- **Hidrostática:** El funcionamiento consiste en la entrada del fluido a una presión alta al área de soporte de la carga, para separar las componentes en contacto por medio de una película lubricante. La diferencia con respecto al tipo de lubricación hidrodinámica es que no requiere del movimiento relativo entre superficies.
- **Elasto-hidrodinámica:** Esta lubricación es usada en algunos dispositivos donde los componentes en contacto no se alejan estando en operación, como, por ejemplo, los rodamientos de cilindros y las transmisiones de engranajes, para estas condiciones se requiere de un aceite con alta viscosidad y gran capacidad para formar una película límite que resista al desgaste adhesivo.
- **Límite:** Es un tipo de lubricación hidrodinámica que está presente cuando ocurre una variación en las condiciones normales de operación, reduciendo el espacio entre los picos de las superficiales rugosas a extensiones moleculares de espesor.
- **De película sólida:** Se utiliza cuando ocurren temperaturas extremas, requiriendo el uso de lubricantes como bisulfuros de molibdeno o grafito, debido a que los aceites comunes en estos casos no son efectivos.

Ecuación de Petroff y número de Sommerfeld

La primera teoría que describe el fenómeno de la fricción en los cojinetes fue realizada por el investigador Petroff, aplicando varias hipótesis utilizó una metodología para conseguir una expresión muy exacta definiendo el factor de fricción, recordada como la ecuación de Petroff.

$$f = 2\pi^2 \frac{\mu N r}{P c} \quad [1]$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica del fluido

N : Velocidad relativa entre la superficie y el cojinete

P : carga unitaria del cojinete

r : Radio del eje.

C : Holgura diametral que existe entre el eje y el cojinete

Esta ecuación es muy significativa debido a que las sustituciones de las dimensiones proporcionadas en cada variable simulan valores adimensionales significativos en la teoría de la lubricación.

Lubricación estable

La lubricación límite es un estado de la lubricación hidrodinámica donde el espacio entre dos superficies es mínimo, esta variación se explica examinando la figura 3, esta gráfica es el resultado de un experimento real de fricción realizado por los hermanos McKee. El estudio de este grafico es muy importante ya que especifica la estabilidad de la película lubricante y permite diferenciar los estados entre la lubricación límite y la hidrodinámica.

El estudio de este grafico se puede aplicar como restricción de diseño a la siguiente expresión:

$$\frac{\mu N}{P} \geq 1,7(10^{-6}) \quad [2]$$

Donde:

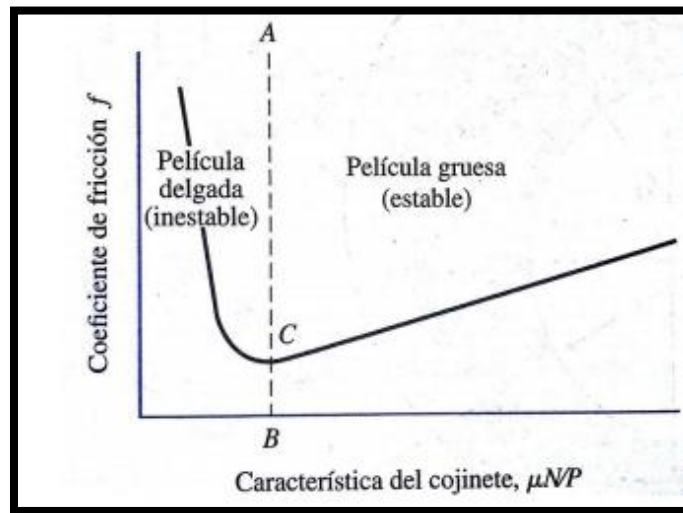
μ : viscosidad en reyns

N: revoluciones del eje en rps

P: carga unitaria del cojinete

La aplicación de esta fórmula nos demuestra que el tipo de lubricación a la derecha de la curva de Mckee, presente los entornos de la película fluida.

Figura 3:Curva de Mckee



Fuente: Tomado de Journal Bearing Friction in the Region of Thin Film Lubrication S.A. Mckee T.R Mckee, 1932.

Sistemas de lubricación

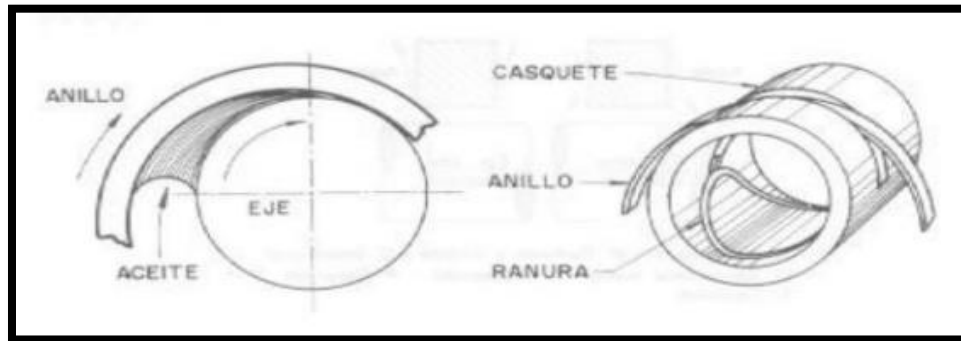
Existen varios elementos que requieren ser lubricados, así como varias maneras de lubricar una máquina, al igual hay diferentes formas de lubricación; siendo los

cojinetes los principales componentes que por la falta de lubricación pueden llegar a tener mayor afectación, junto con los sellos mecánicos son los mecanismos que presentan un menor tiempo medio entre fallas en las turbo-máquinas. (Girdhar, 2005)

Los diseños de lubricación más utilizados en Ecopetrol actualmente son:

- **Lubricación por anillo (salpique).** El aceite lubricante es suministrado por medio de un anillo de mayor diámetro mayor que el del muñón del rotor, el cual impulsa el fluido desde un reservorio de nivel constante a medida que va girando el rotor hasta la parte superior de la chumacera en donde lubrica las superficies del cojinete y el eje. (Albarracin , 2002)

Figura 4: Lubricación por anillo

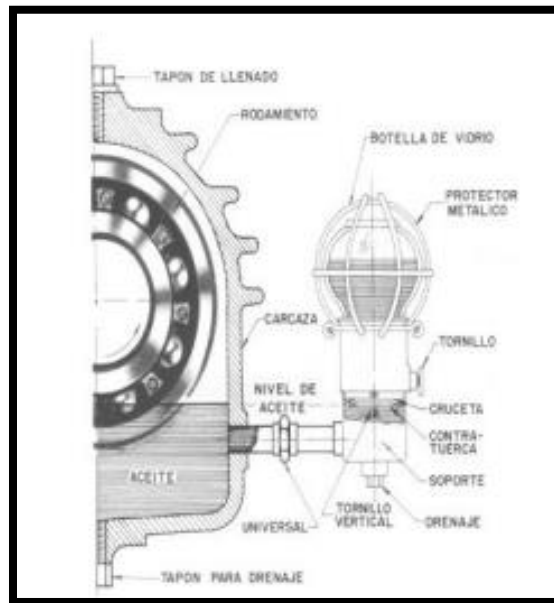


Fuente: tomado de, Lubricación de turbinas de vapor, pedro Albarracín, 2002.

Un vaso lubricador controla el nivel del depósito de aceite y la temperatura por medio de aletas disipadoras o por sistemas de circulación de agua de enfriamiento. Este diseño es utilizado solo para cojinetes que operan a revoluciones altas

- **Lubricación por inmersión.** Aproximadamente menos de la mitad o la mitad del cojinete está inmerso en un depósito de aceite de nivel constante dentro de la caja del mismo, por medio de una botella que contiene lubricante se controla el nivel de aceite en la cámara.

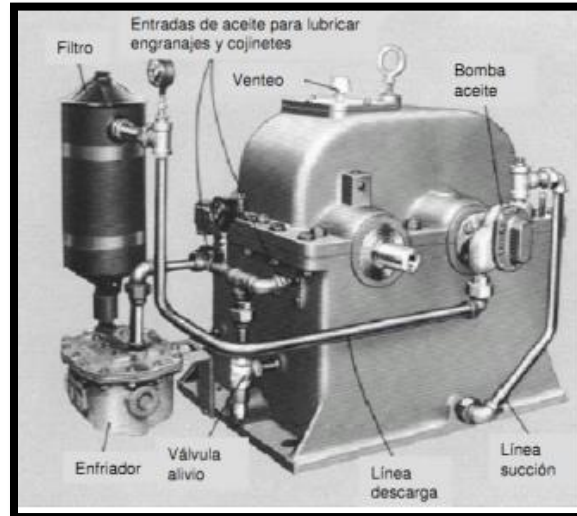
Figura 5: Lubricación por inmersión



Fuente: tomado de, Lubricación de turbinas de vapor, pedro Albarracín, 2002.

- **Lubricación por presión.** Por medio de una bomba el aceite es circulado a través de los cojinetes, la cual la mayoría de las veces es de desplazamiento positivo de tipo engranajes, por lo general usa filtros y un enfriador para lograr una mayor eficiencia en la lubricación. Este sistema de lubricación es utilizado en equipos robustos donde el rotor es demasiado pesado y solo al momento de estar girando el eje se forma la película de lubricación hidrodinámica, también el calor generado por la fricción es evacuado con mayor eficiencia.

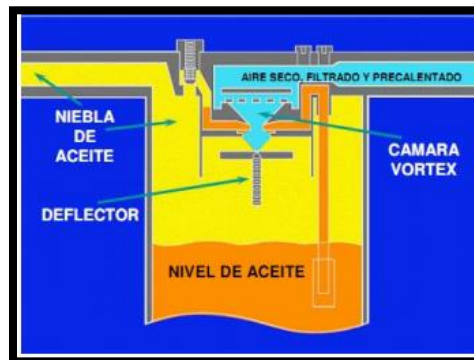
Figura 6: Lubricación por presión



Fuente: tomado de, Lubricación de turbinas de vapor, pedro Albarracín, 2002.

- **Lubricación por niebla.** El aceite depositado en una consola genera niebla por medio de la dispersión de partículas de aceite en el aire seco, precalentado y filtrado. El aceite en forma de niebla es transportado hacia las máquinas y sus diferentes elementos que requieren ser lubricados por medio de una red de tuberías. Este tipo de lubricación ha logrado disminuir ampliamente las fallas de lubricación en los equipos desde que se inició su implementación, siendo una de las más efectivas.

Figura 7: Lubricación por niebla



Fuente: lubricación por niebla, Marlon soto, 2018

2.3. MARCO CONCEPTUAL

La turbina está compuesta de dos partes principales: la carcasa que contiene las partes fijas de las toberas y el rotor que contiene las ruedas giratorias de alabes.

El conjunto turbina – generador, además tienen una serie de componentes mecánicos, auxiliares y estructurales, como cojinetes, sistemas de lubricación, válvulas de regulación, sistemas de extracción de vacío, sistemas de enfriamiento, sistema de control, sistema de sellado de vapor.

- El rotor de una turbina está compuesto de acero fundido con algunas cantidades de cromo o níquel para mejorar la tenacidad, el diámetro del eje es relativamente uniforme. Por lo regular las ruedas donde se posicionan los álabes se instalan en caliente al eje. La carcasa está dividida en dos partes: La superior, la cual es desmontable para tener acceso al rotor y a sus componentes internos, y la parte inferior, anclada a la bancada o base-plate. Ambas están provistas de filas de álabes fijos y toberas.
- La válvula de reguladora gradúa el caudal de ingreso a la turbina, siendo uno de los componentes más relevantes en las turbinas a vapor. Esta es accionada hidráulicamente por la presión de aceite de control, en algunos casos su accionamiento puede ser neumáticamente. La válvula reguladora pertenece a dos lazos de control: el que controla la carga o potencia y el que controla la velocidad de la turbina.
- Los cojinetes radiales y axiales, ubicados en la bancada sirven de apoyo y sobre ellos gira el rotor. Suelen contener una capa lubricante de material blando (aleación de babbitt) para disminuir la fricción. Estos elementos son sustituidos periódicamente ya que están sometidos a desgaste continuo, y la

frecuencia de cambio se establece bajo un plan de mantenimiento establecido o por condición del estado en que se encuentren.

- Los sistemas de lubricación suministran el fluido de lubricante, generalmente aceite. Para garantizar la circulación del aceite en todo momento el sistema puede estar equipado con tres bombas:
 - Bomba mecánica principal: Este equipo está acoplado al eje de la turbina, de manera que siempre que este girando la turbina está girando la bomba, garantizando así la presión de aceite bombeado mejor que con una bomba eléctrica.
 - La bomba auxiliar: Se utiliza principalmente en los arranques, su función es asegurar la apropiada presión de aceite hasta que la bomba mecánica principal puede realizar dicho servicio.
 - La Bomba de emergencia: Este equipo se acciona si se produce un problema de suministro eléctrico en la planta, durante la parada habría un momento en que la turbina se quedaría sin lubricación, ya que la bomba auxiliar no tendría tensión.
- Sistema de enfriamiento de aceite: El aceite en su recorrido se calienta, modificando su viscosidad, y, por ende, sus características lubricantes, lo que permite una degradación si el calor es excesivo.
- Sistema de Control: Permite el accionamiento oleo-hidráulicamente de la válvula de regulación de la turbina, por medio de la presión del aceite de control.

Tipos de mantenimiento:

Existen varios tipos de mantenimiento, que para definir su aplicabilidad se realiza una comparación de los beneficios o logros obtenidos de cada uno de ellos. La finalidad de las operaciones de mantenimiento es lograr resultados confiables a bajo costo y para ello se definen los siguientes: Mantenimiento Correctivo,

Mantenimiento Preventivo, Mantenimiento Mejorativo y Mantenimiento Predictivo. (Sierra, 2004, pág. 14).

Mantenimiento mejorativo estableciendo el estado técnico de las instalaciones eléctricas de los equipos disponibles del sistema de control y operativos de la empresa. Atiaja (2011) menciona que: “Efectuar el mantenimiento mejorativo a los equipos del taller de máquinas de herramientas, mediante el enlace y diseño del sistema de control” (pág. 23). Por medio, del mantenimiento en mención, se logra establecer las ventajas de la utilización de piezas esenciales e importantes en ellos, y las diferentes aplicaciones que se obtiene en el proceso.

Mantenimiento preventivo Gabriel Sierra (2004) asegura que el mantenimiento preventivo es realizar un conjunto de inspecciones periódicas programadas sobre los equipos y el activo fijo de la planta, con el fin de evidenciar estado y condiciones inadecuados de esos componentes que puedan ocasionar paros en la producción o fallas graves en las máquinas, instalaciones o equipos, y realizar en forma sistemática el mantenimiento y cuidado adecuado de la planta.

El mantenimiento correctivo consiste en reparar una pieza o máquina averiada con la sustitución o el re-acondicionamiento de partes del equipo una vez que han fallado; La corrección de la falla (falla funcional), se produce de urgencia o emergencia. Primordialmente consta de los siguientes pasos: “Retirar piezas o conjuntos averiados. Corregir dichos componentes o piezas. Volver a instalarlos. Eliminar desperfectos de los elementos no constructivos de los equipos, como son: reglajes, ensamblajes” (Paladines, 2005, pág. 48).

2.4. MARCO LEGAL

Norma técnica colombiana. Código eléctrico colombiano. NTC.2050

La NTC.2050 (1998) estipula que el objetivo de dicho código es salvaguardar los bienes y la vida de las personas contra los riesgos inherentes por el uso de la electricidad. Este código incluye cuidados y prácticas que se consideran indispensables para la seguridad. El estricto cumplimiento de las normas y el mantenimiento adecuado de los equipos darán lugar a unas instalaciones prácticamente libres de riesgos, aunque no necesariamente eficientes, pero si adecuadas para el buen servicio o ampliaciones futuras en el uso de la electricidad. (NTC, 1998)

ASME Y1 4.5-2009

Norma Nacional Estadounidense de Dimensionamiento y Tolerancia que fue implementada en la década de 1950. El objetivo de la norma Y14.5 fue definir y delimitar el equipo de los componentes mecánicos y definir un lenguaje estándar en el dibujo técnico para normalizar las prácticas en la realización de planos. Así mismo se logró una representación perfecta en el dibujo el cual incluye una tolerancia que permita cierto desvío de la parte perfecta (porque la perfección no se puede alcanzar en la producción real). La norma Y14.5 es una excelente herramienta para: Ingeniero de productos, diseñadores, fabricantes, revisores, operadores de CMM, ingenieros, estudiantes, personal de calidad y cualquier otra persona que en el trabajo utiliza tolerancias y dimensiones geométricas (GD&T). La norma Y14.5 ha sido elegida como una “norma internacional”, el estándar de escogencia en gran parte del mundo. (RETIE, 2008).

Sistemas de lubricación según normas API 614

La norma API 614 especifica los parámetros de fabricación y diseño de los sistemas de lubricación para el sector petroquímico & petrolero. Estos sistemas son implementados para bombas, compresores, reductores, turbinas y accionamientos API.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION

La metodología de investigación que se usó en el desarrollo de este proyecto fue de tipo descriptiva y explicativa ya que se ha basado en teorías que sustentan el funcionamiento de un turbogenerador de vapor, y por ende ayudó en la determinación del por qué se están presentando este tipo de fallas.

Este proyecto se basó en un enfoque cuantitativo donde se trabaja con la recolección de los datos y un análisis de estos, para la realización del nuevo diseño de lubricación se ha tomado la iniciativa de realizar hipótesis sobre el funcionamiento de la bomba incorporada donde es sometido a diferentes tipos de pruebas para la detección de las posibles causas o condiciones en las cuales se encuentra los dispositivos que conforman este módulo, al mismo tiempo la solución de estas posibles fallas es la relación entre el diagnostico de cada equipo y el tipo de diseño más acorde a la falla que ha presentado.

Para alcanzar los objetivos propuestos el proyecto se desarrolló teniendo en cuenta las siguientes fases:

Fase 1. Descripción. La primera fase del proyecto se enfocó en describir las especificaciones técnicas para cada componente que permita un mejor entendimiento del papel que desempeña la lubricación en este equipo rotativo.

Fase 2. Diagnostico. La fase de diagnóstico del sistema de lubricación se basó en revisión de cada uno de los componentes del sistema, sus fallas típicas y las causas raíces del problema, el diagnóstico del equipo se realizará por medio de una comparación de sus especificaciones de diseño en base a los requerimientos de la norma.

Fase 3. Evaluación operacional. Esta fase consistía en evaluar el desempeño operativo de los componentes del sistema de lubricación por medio de principios teóricos de transferencia de calor, mecánica de fluidos, y lubricación, esta evaluación nos permitirá confirmar si la especificación de diseño del sistema cumple con los requisitos de lubricación hidrodinámica necesarios.

Fase 4. Identificación de necesidades. En esta fase del proceso se emitieron las recomendaciones necesarias para mejorar el sistema de lubricación.

Fase 5. Evaluación de factibilidad. Esta esta fase se realizó una evaluación de la factibilidad para implementar las actualizaciones de diseño necesarias, junto con la modificación respectiva de los protocolos de operación del sistema de bombeo en compañía de los profesionales de confiabilidad quienes se encargarán facilitar las mitologías establecidas para análisis de falla.

Fase 6. Diseño del sistema. En esta última fase se seleccionaron e integraron los componentes del sistema de lubricación con base en especificaciones obtenidas de los análisis previos y recomendaciones de la norma API 614.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

4.1. Caracterización del sistema de lubricación existente.

La metodología de descripción de los elementos que conforman el sistema de lubricación se centra en caracterización de las especificaciones técnicas de ellos. Cabe resaltar que este proyecto se enfoca en la bomba principal del sistema de lubricación del turbogenerador, sin embargo, para un mejor entendimiento del sistema general de lubricación se hace una descripción de los componentes que lo conforman.

Sistema de lubricación del Turbogenerador

En la turbo-maquinaria uno de los sistemas de mayor importancia es el sistema de lubricación, que se encarga de refrigerar, lubricar, limpiar y proteger los componentes que se encuentran en contacto cuando están operando los equipos. Para nuestro caso el turbogenerador tiene un sistema de lubricación que hace circular el aceite por el sistema de control y cojinetes de la turbina, cojinetes del generador y turning gear.

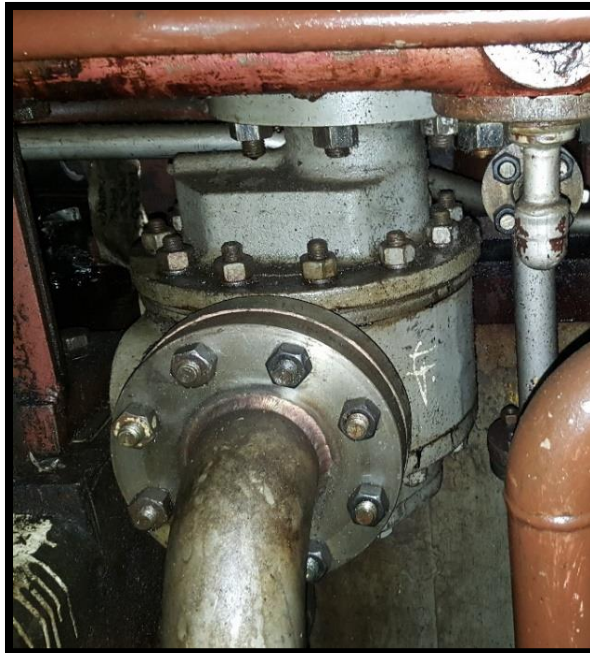
Para asegurar dicha circulación de aceite en todo momento el sistema está equipado con los siguientes componentes: Bomba mecánica principal, 2 bombas auxiliares y Bomba de emergencia.

Bomba Mecánica Principal

Es una bomba de desplazamiento positivo de tipo engranajes exteriores que se acoplan al eje de la turbina por medio de una transmisión tornillo sinfin – corona, se encuentra ubicada en el extremo lado gobernación, en la parte inferior de la carcasa,

de forma que siempre que este girando la turbina está girando la bomba, garantizando la presión de bombeo de aceite. No obstante, esta bomba no proporciona la presión suficiente en los momentos de arranque y parada; Por esta razón el sistema se encuentra respaldado por bombas auxiliares. La bomba principal se encarga de impulsar el aceite desde la consola a través de las tuberías y accesorios, pasando por los filtros, intercambiadores, cojinetes, acumuladores y el sistema de control.

Figura 8. Bomba Principal



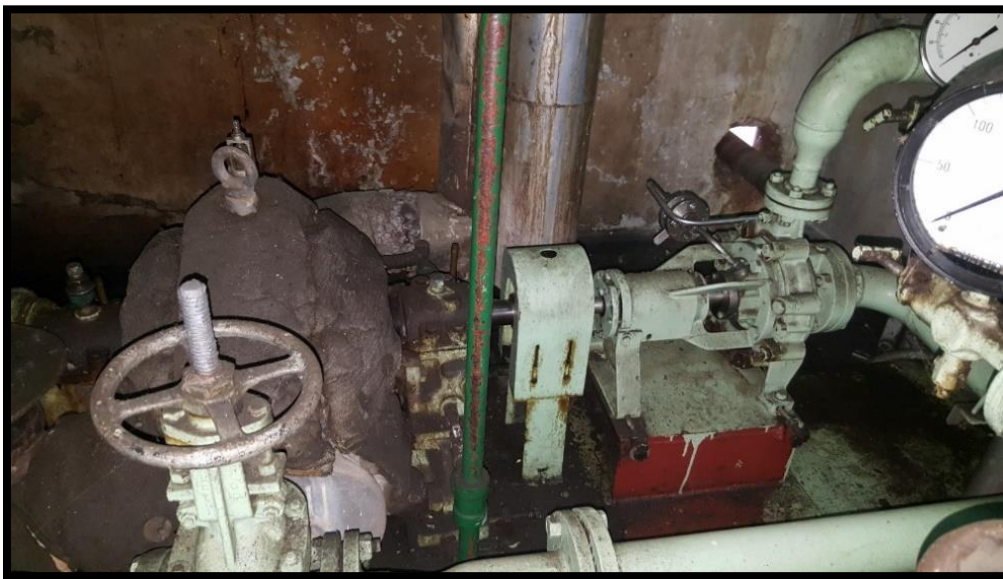
Fuente: Autores

Bomba Auxiliar operada por turbina a vapor

Es una bomba centrífuga con un impulsor semi-abierto, accionada por una turbina a vapor, (25 H.P., 3500 rpm, 161 G.P.M. a 100 psig). Esta bomba cumple la función de suministrar aceite al sistema de lubricación y al sistema de control, cuando la turbina del generador arranca y cuando tienen paradas periódicas. El sistema de bombeo se pone en servicio antes de la puesta en marcha del sistema de

generación y se detiene el funcionamiento cuando las revoluciones le permitan a la bomba principal dar la confiabilidad y sostener por si sola el proceso, al igual sucede en los momentos de parada del sistema de generación. La bomba arranca automáticamente cuando detecta una baja presión de aceite en el sistema de lubricación de 70 psig, asegurando la correcta presión de lubricación al sistema hasta que la bomba principal pueda realizar esta función. La diferencia de este sistema de bombeo con respecto al de la bomba auxiliar que es accionada por motor eléctrico AC es que debe apagarse manualmente.

Figura 9: Bomba Auxiliar operada por turbina



Fuente: Autores

Bomba Auxiliar operada por motor AC

Es una bomba centrífuga con un impulsor semi-abierto, accionada por un motor eléctrico de corriente alterna A.C. Cumple la misma función y tiene las mismas características y especificaciones técnicas que la bomba auxiliar accionada por turbina a vapor. La parada y el arranque de la bomba auxiliar de aceite se controlan con un interruptor eléctrico sensible a la presión ubicado en el sistema de

lubricación. La bomba arrancará automáticamente cuando la presión de aceite en el sistema disminuya a un valor mínimo de operación segura (65psig) y continuará funcionando hasta que la presión de aceite alcance el valor normal.

Figura 10: Bomba Auxiliar



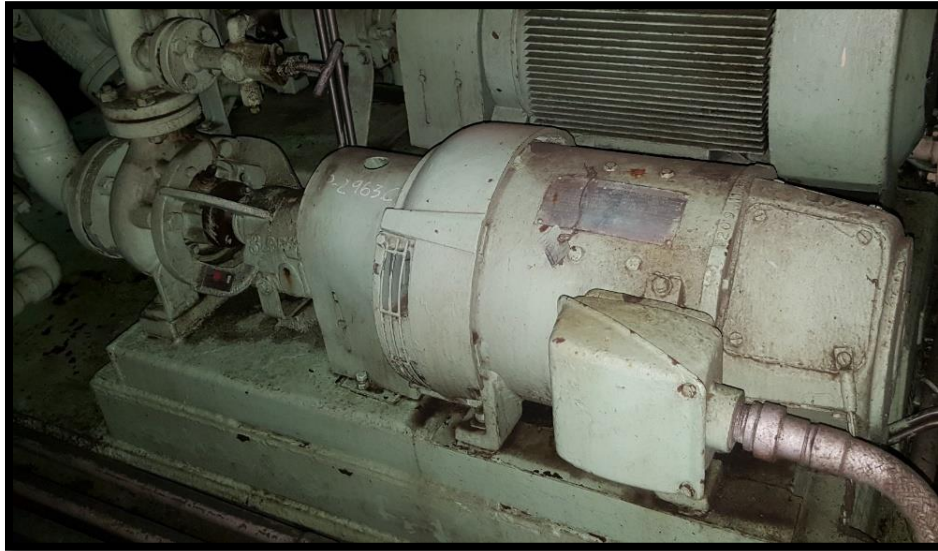
Fuente: Autores

Bomba de Emergencia operada por motor DC

Es una bomba centrífuga accionada por un motor eléctrico de corriente continua D.C (7.1/2 HP, 3500 rpm, 80 G.P.M. a 50 psig). La bomba de aceite de emergencia funciona como respaldo en caso de fallo de energía o mal funcionamiento de las bombas principal o auxiliares de aceite. Las especificaciones técnicas de diseño de esta bomba son calculadas solo en función de suministrar aceite de lubricación a los cojinetes de todo el sistema, por tal motivo la capacidad es menor que las bombas principal y auxiliares, por lo tanto, la función principal de la bomba de parada de emergencia es suministrar aceite lubricante a los cojinetes del sistema

de generación (turbina y generador) y a los componentes del Turning Gear (arrancador de engranaje) para garantizar una parada segura del sistema rotativo.

Figura 9: Bomba de emergencia



Fuente: Autores

Enfriador.

Este equipo es un intercambiador de calor dúplex de casco y tubos, su función es enfriar el aceite proveniente de la consola; el agua refrigerante pasa por los tubos y el aceite por el casco, este diseño permite que la presión del agua en los tubos sea menor que la del aceite en caso tal de una ruptura interna en el enfriador el aceite no se contamine con el agua. Los enfriadores están equipados con una válvula de transferencia que al ser usada se puede realizar el mantenimiento de cada intercambiador sin necesidad de apagar el sistema de generación. La cantidad de agua de enfriamiento se debe ajustar para mantener una temperatura de salida de

aceite de aproximadamente 120 °F. Estos enfriadores estas hechos de acero carbón SAE285.

La disipación de calor tiene varios objetivos, entre ellos:

- Reducir la temperatura del aceite para evitar la oxidación
- Disipar el calor absorbido por los cojinetes, los componentes en movimiento y las áreas adyacentes a los mismos.
- Cuando el aceite está a una menor temperatura se reduce la solubilidad del mismo, por ello podrá limpiar y separar los contaminantes disueltos en el lubricante al llegar a los filtros.
- La disminución de temperatura del aceite permite la formación de lodos los cuales son filtrados posteriormente.

Figura 10: intercambiadores de calor



Fuente: Autores

Filtros

Se encargan de retener los contaminantes y las impurezas presentes en el aceite, y así evitar la llegada de estos a los cojinetes. Las impurezas más comunes retenidas en los filtros tenemos:

- Partículas metálicas provenientes por el desprendimiento del metal entre los elementos lubricados.
- Humedad y polvo obtenidos en la operación o por la exposición al ambiente del aceite.
- Partículas derivadas de la oxidación del aceite: como hollín y gomas.

Los filtros usados en este sistema son de tipo dúplex con una válvula de transferencia con la finalidad de poder cambiar un solo elemento sin apagar la turbina. Los filtros están instalados en el circuito de forma vertical y en paralelo, permitiendo realizar el cambio de cada uno de ellos sin necesidad de parar el equipo (mientras se cambia uno, el otro está en operación).

Por lo regular se cambian cada seis meses, el periodo de tiempo entre cambios depende de la saturación y cantidad de contaminantes en el aceite, este registro se evidencia en la indicación del diferencial de presión entre el ingreso y la salida de aceite a cada filtro. Los parámetros de diseño empleados para la elección de los filtros son el grado de filtración que hace referencia a la máxima dimensión de partículas que permite pasar por el filtro, en este caso nuestro sistema es de 25μ , y la relación de filtración las cuales son recomendaciones según el tipo de sistema o los mecanismos a lubricar: 10μ .

Figura 11: filtros de lubricación



Fuente: Autores

Figura 12: filtro de succión bombas auxiliares



Fuente: Autores

Válvulas de control de presión.

La funcionalidad de estos dispositivos es la de regular la presión del sistema de lubricación a un nivel establecido por los requerimientos de dicho sistema, en este caso se controla la presión de lubricación hacia los cojinetes de la turbina, el arrancador de engranaje y los cojinetes del generador manteniendo una presión de 14 psig, también controla una presión de 80 psig hacia las válvulas de entrada y extracción de vapor del gobernador.

Figura 13: válvula control de Presión



Fuente: Autores

Orificios de restricción

Los orificios de restricción son unas facilidades similares a ductos que se encargan de provocar una caída de presión, limitando el flujo del aceite lubricante desde las

tuberías hasta los cojinetes, de esa forma suministran la cantidad adecuada a las partes que están en contacto y que requieren ser lubricadas permitiendo la llegada de aceite con el flujo necesario a todos los cojinetes. La regulación generalmente se realiza con una observación de la presión de aceite que indica el manómetro en la entrada de cada chumacera, normalmente los niveles se encuentran entre 12 psig y 16 psig para unas óptimas condiciones de lubricación.

Tubería y Accesorios

En los sistemas de lubricación los elementos de instrumentación, control y tuberías son de vital importancia ya que estos elementos rigen la filosofía de operación del sistema, estableciendo los rangos sobre los cuales se debe operar y mostrando permanentemente el estado de las variables de operación.

Los accesorios más comunes en este tipo de instalaciones son los: indicadores de nivel (LG), indicadores de presión (PI), indicadores de temperatura (TI), válvulas de control de presión, válvulas de compuertas, por otro lado, los materiales comúnmente utilizados en la tubería según la norma API614 deben ser de acero inoxidable, sin embargo, en este caso los materiales de la tubería y accesorios son de acero carbono.

Aceite de lubricación

El aceite con el cual opera actualmente el sistema es un lubricante mineral grado ISO32, este tipo de aceite es recomendado para turbinas de gas y vapor que operen bajo condiciones severas. Estos aceites tienen unos aditivos especiales que proporcionan una alta resistencia térmica y a la oxidación. Otras características importantes de estos aceites son los siguientes:

- Opera eficazmente en grandes rangos de temperatura
- Ofrece índices de viscosidad altos y también bajos puntos de fluidez
- Posee una buena lubricidad que permite reducir la fricción y el desgaste.
- Es bastante tolerante a la formación de lodos
- No es corrosivo en superficies de metal
- Contiene puntos de inflamación relativamente altos

4.2. Realizar un análisis de falla a través de la metodología de análisis causa raíz (RCA) que conlleve a determinar el diseño requerido para eliminar la falla en el sistema de lubricación.

Análisis causa raíz:

Existen varios métodos para la aplicación de causa raíz, algunos son especializados y aplican a situaciones u objetivos específicos que se quieran conseguir. Algunos de ellos tienen sus propias categorizaciones de causas, pero todos son efectivos cuando se usan dentro de los rangos para los cuales fueron diseñados.

Cuando se realiza un análisis de causa raíz a profundidad, se deben identificar aspectos más allá de los componentes físicos de la falla, dichos aspectos tienen que ver con acciones humanas que pueden desatar una cadena de causa-efecto que termine en una causa física, en esa medida se requiere realizar una serie de análisis que permitan establecer si se debió a procedimientos incorrectos, especificaciones erróneas o falta de capacitación al personal, lo cual puede develar aspectos vitales de la organización.

El análisis causa raíz se puede aplicar de distintas maneras, según sea la naturaleza del problema, a continuación, se muestran las aplicaciones más usuales:

- Análisis de falla, generalmente se usa esta aplicación cuando las fallas que se requieren encontrar poseen una alta complejidad o en procesos que son altamente críticos.
- Fallas recurrentes, cuando se presentan fallas bajo el mismo modo en frecuencias altas.
- Análisis de modos y efectos de fallas la cual es conocido como (FMEA)
- Análisis de errores humanos, generalmente se usa para determinar errores cometidos durante el proceso de aplicación y diseño de los procedimientos.

El análisis de causa raíz se puede considerar como un proceso a través del cual se permite graficar la relación que existe entre causa-efecto que conlleva a identificar eventos indeseables, para ello se debe plantear una serie de preguntas: ¿cómo? Puede ocurrir una falla, ¿porqué? o ¿cuáles? Son las causas que las generan. Para poder valorar los hechos, se hace necesarios aspectos como observación directa, documentación recolectada y deducciones de tipo científica. Para ello se utilizan las siguientes técnicas:

- Análisis causa-efecto.
- Árbol de fallas
- Diagrama de espina de pescado
- En algunos casos es de gran ayuda un software de RCA que permita la construcción de árbol de fallas.

Análisis de Eventos y Factor Causal.

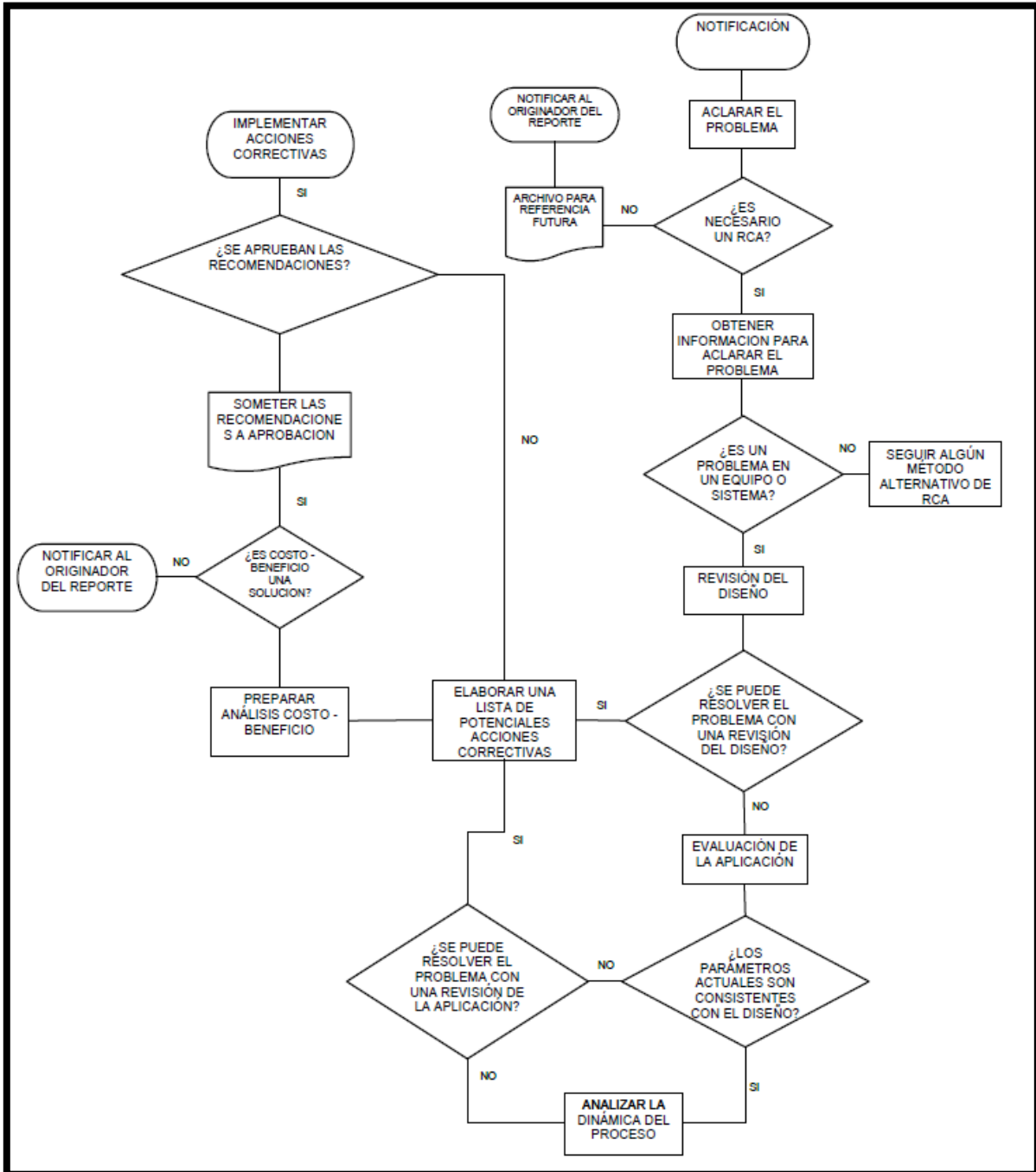
Este método de análisis es usado para problemas multi faceta o largas cadenas de factor causal complejos. La tabla resultante de su aplicación es un diagrama de causa-efecto que describe en forma de secuencia una serie de tareas o acciones y las condiciones que llevan a que ocurra el evento. La línea de evento es una secuencia de tiempo, acciones o sucesos mientras las condiciones son cualquiera que forme el desenlace y rangos de condiciones físicas, actitud o cultura de seguridad. Los eventos y condiciones que se dan en la tabla describen la cadena de factor causal.

Árbol de falla.

El árbol de falla se considera como una herramienta vital dentro de la confiabilidad operacional la cual permite realizar una gráfica de las relaciones que existen entre causa y efecto que permite descubrir el evento indeseable que concluye con la causa raíz de la falla estudiada.

Los árboles de falla se construyen a partir de la colocación de datos de una falla en una forma lógica y coherente, que permita verificar a través de preguntas que sirvan de guías la causa raíz del problema, como se muestra en la figura 16.

Figura 14: Diagrama de Análisis de falla



Fuente: tomado de, KEITH MOBLEY R. Root Cause failure analysis. Editorial Newnes, 1999.p 15

Antecedentes y análisis de fallas

En todo proyecto de reingeniería es imperativo revisar el historial de falla del equipo con el fin de conocer el comportamiento operativo del mismo y lo cual permitirá un mejor enfoque al momento de plantear aspectos a mejorar. Para tal fin se deberá analizar la información de los historiales de mantenimiento que reposan en la base de datos de la empresa.

Historiales de Mantenimiento

Actualmente en las Refinerías se gestionan los activos físicos para mantenimiento y operaciones a través del software SAP ERP, el cual se encarga de asignar recursos para las actividades de mantenimiento planeadas por tal razón es una herramienta muy importante en todo lo que tiene que ver con estrategias de mantenimiento enfocadas a confiabilidad.

Como se planteó inicialmente en el objetivo específico el RCA (por sus siglas en inglés, Root Cause Analysis) va a ser desarrollado para la última falla presentada en el equipo. Se selecciona esta falla, ya que es la de mayor nivel de frecuencia. Dicha falla se enfoca principalmente en el sistema de lubricación, la cual será abordada a través de la metodología de árbol lógico de falla, que será descrita a continuación:

Gestión de avisos en SAP

SAP es un software de gestión de mantenimiento, el cual permite planear, programar y controlar un plan de mantenimiento. Una de las herramientas que tiene SAP para gestión de dicho plan son los avisos, que se crean dependiendo de la

necesidad, la cual puede ser para una falla o para un mantenimiento planeado entre otros.

A continuación, se muestra uno de los avisos creados para el turbogenerador, el resto de los avisos creados se muestra en el anexo 2.

Figura 15: aviso de falla para turbogenerador

The screenshot shows a software interface for managing maintenance orders. The window title is "Modificar No Rutinario 20326265: Cabecera central". The interface includes a menu bar (Orden, Iratar, Pasar a, Detalles, Entorno, Sistema, Ayuda) and a toolbar. The main content area is divided into several sections:

- Order Information:** Orden: z2 PM 20326265; MANTTO CAMBIO DE CORONA-SIN FIN SG2951; Stat.sist.: CTEC NOTI CESc FCAP FMAT IMOP MMGO MO... OTPL.
- Responsible:** Gpo.plan.: SIB / 2000 Serv Indust. Balan; Rs.pto.tr.: DMECEPLN / 2000 Planeación Mecánica; Aviso: 200124715; Costes: 37.470.015 COP; Cl.activ.PM: C03 CVO Por Condicion; EstdInstal: .
- Fechas:** Inic.extr.: 09.03.2019; Fin extr.: ; Inic.prog.: 15.03.2019 07:00; Fin progr.: 18.03.2019 09:20; Cl.progr.: Hacia adelante; Vista REO: Mixto; Versión: 0; Sel.calendario: De puesto d...; Inic.real: 11.03.2019 11:28; Fin real: 15.03.2019 12:24; Fecha ref.: 09.03.2019; Inicio en el pasado: 0; Adaptar fechas: 2; ID calen.fábr.: ; Prioridad: M - Media; Revisión: ; Desplazar orden: ; Ind. datos REO: ; Fecha autom.: ; Con descansos: ; NecCapac.: .
- Objeto de referencia:** Ubic.técn.: RFB-2950-SGEN-IEL... Tg2951 20 Mw; Equipo: 10136416 Turbina De Vapor SG2951.
- Datos avería:** IniAvería: 09.03.2019 11:30:00; FinAvería: 12.03.2019 12:00:00; Parada: ; Duración parada: 62,50 H.

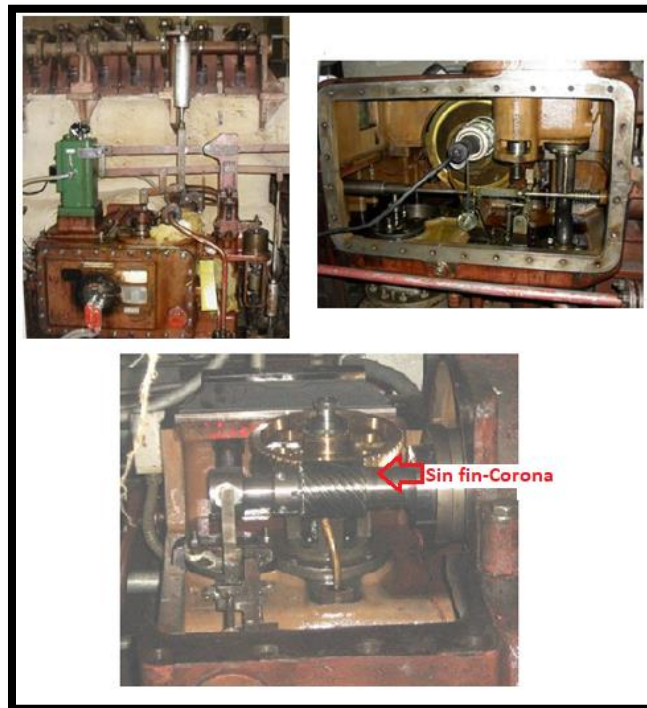
Fuente: Autores

4.2.1. Descripción del evento.

En la planta Eléctrica de servicios industriales se han presentado fallas repetitivas en el sistema de transmisión sin fin corona representada en 38 fallas en los últimos dos años y un tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures-TMEF) de 30 días, generadas principalmente en las coronas de la transmisión de potencia al gobernador y la bomba principal de lubricación, con un impacto económico por lucro cesante estimado en USD 4´120.000.

En la figura 16 y 17 se logra observar el sistema de gobernación y el sistema sin fin corona, el cual es el encargado de transmitir movimiento del eje de la turbina a la bomba principal del sistema de lubricación.

Figura 16: sistema de gobernación y lubricación



Fuente: Autores

Figura 17: Diseño sinfín corona



Fuente: Autores

4.2.2. Descripción del modo de falla del evento.

El día 09/03/2019, a las 06:30 pm se procedió a parar previamente el turbogenerador para revisión del sin fin-corona, por presentar ruido anormal en el sistema de transmisión de la bomba principal de lubricación y aumento en el diferencial de presión de los filtros de aceite correspondiente, indicando un desgaste mayor de la transmisión sinfín-corona después de 2,78 meses de operación.

4.2.3. Planteamiento de hipótesis de falla.

En este paso es indispensable formular las hipótesis requeridas, que ofrezcan información del por qué falló el sistema sinfín-corona, con el fin de aclarar el

problema. Las hipótesis enunciadas para el modo de falla del sinfín-corona son las siguientes:

4.2.3.1 Falla prematura de coronas

La falla prematura de la corona puede obedecer a alguna de las que están listadas a continuación:

- Operación inadecuada del Turbogenerador
- Ventana Operativa Mal Definidas (Sistema Lubricación)
- Preventivo Inexistente (Sistema Lubricación)
- Procedimiento Inadecuado (Montaje de Coronas)
- Procedimiento Alineación Pedestal Empuje respecto a Turbina
- Mantenimiento no programado

Las causas raíces anteriormente citadas están enmarcadas dentro de seis categorías de causas básicas a saber:

- Desalineación durante montaje
- Lubricación inadecuada
- Pérdida de back lash por distorsión en la carcasa debido a esfuerzos en tuberías
- Proceso inadecuado de manufactura
- Torcedura en la carcasa
- Procedimiento de arranque y parada inadecuados

A continuación, se mostrará cada una de las medidas tomadas con el objetivo de descartar las causas raíces planteadas como hipótesis y de esa manera seleccionar la real.

- **Desalineación durante montaje**

Para descartar esta causa se revisaron los procedimientos y registros ejecutados al momento de realizar el montaje del sistema y se concluyó que el procedimiento descrito en el manual original (enviado en enero del 2006 por los Especialistas del equipo) es el que debe seguirse: Básicamente Alinear 0-0 en altura (sin fin- corona), con Juego entre dientes de 0.012"-0.016" y distancia entre centros de 6.250" (+/- 0.001").

- **Lubricación inadecuada**

Para poder esclarecer esta causa básica se revisaron las especificaciones del aceite actual, la severidad del sistema y las especificaciones del aceite que se debe utilizar en los turbogeneradores de la Unidad. Una vez realizada dicha revisión se encontraron los siguientes hallazgos.

- 1- Contaminación con agua, por escape de vapor por los sellos de la turbina del turbogenerador
- 2- Contaminación con agua por retiro deficiente de agua.
- 3- Contaminación con partículas sólidas.
- 4- Bajo flujo de aceite lo cual obedece a filtros saturados

- **Pérdida de back lash por distorsión en la carcasa debido a esfuerzos en tuberías**

Considerando los esfuerzos inducidos por la tubería y los efectos térmicos sobre la carcasa de la turbina, se realizó un estudio de ingeniería de flexibilidad, dando como resultado las mejoras requeridas en los trazados y soportes de las líneas de admisión y extracción. Dichas recomendaciones y modificaciones de los spools de tuberías fueron implementadas en los mantenimientos mayores realizados posteriormente

- **Proceso inadecuado de manufactura**

Esta causa se prevé siempre que se genera una modificación del sistema que involucre cambios en el material, por consiguiente solo se realizó una modificación en el sistema que tiene que ver con el engrane sin fin corona del gobernador, en ese momento se procedió a enviar muestras al laboratorio de un Instituto Colombiano para verificar las propiedades físico mecánicas de las coronas en el nuevo diseño con respecto a las coronas del viejo diseño, concluyendo que las propiedades eran las mismas.

- **Torcedura en la carcasa.**

Dentro de las causas básicas que se pueden identificar en este ítem, se encuentra un posible defecto en la carcasa, la cual es confirmada al momento de inspeccionar la alineación del mecanismo sinfín-corona, dicha torcedura se debe a una dilatación inadecuada del turbogenerador al momento de las puestas en servicio, lo cual se debe a un mal procedimiento de arranque. Este procedimiento ya fue mejorado en

conjunto con especialistas del equipo; aunque el tiempo medio entre fallas mejoró, la falla aún continúa

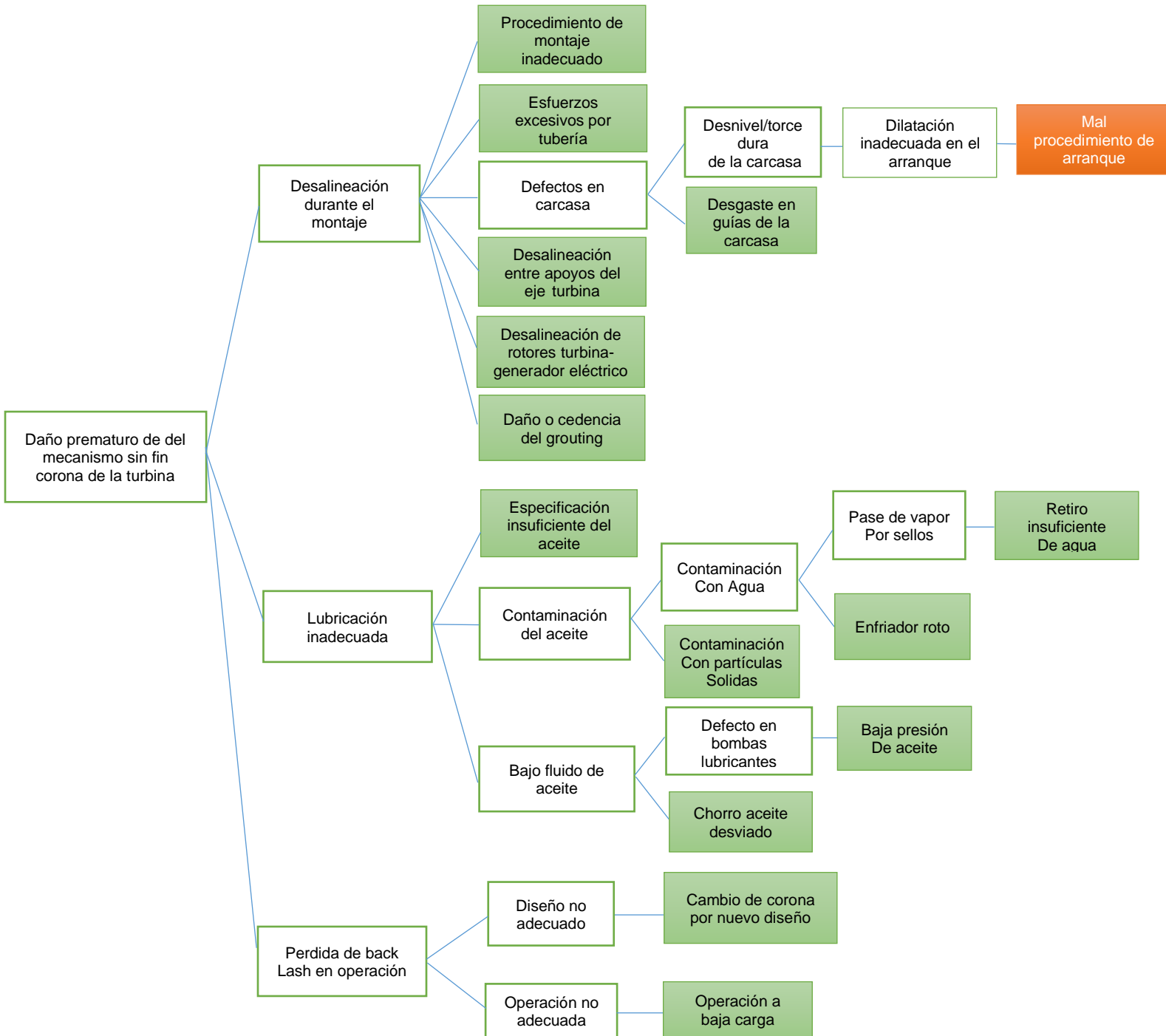
- **Procedimiento de arranque y parada inadecuados (Causa raíz de la falla)**

La causa raíz de la falla radica en el hecho de cuando se realizó la modificación del diseño del sistema sinfín-corona, los técnicos se percataron de una leve torcedura en la carcasa del turbogenerador lo cual fue constatada a través de pruebas realizadas por los especialistas del equipo, en un informe que se encuentra como anexo al documento, en el cual se pudo concluir que debido a una dilatación incorrecta de la carcasa al momento de arrancar el equipo, se produjo dicha torcedura lo cual hizo que el mecanismo sin fin corona presentara fallas permanentemente, debido a la desalineación que se genera por la falla mencionada. Una vez identificada la causa raíz se corrige a través de una actualización del procedimiento de arranque del turbogenerador y capacitación de los operadores de la planta.

Soluciones Alternativas e Identificación de la Decisión

Las causas raíz de falla determinadas se agruparon de acuerdo a la interacción entre ellas y se plantearon las soluciones para cada causa o grupo de causas, las cuales se dan a conocer en base al Anexo 1.

Árbol lógico de falla



Análisis de la causa raíz de la falla.

Todas las causas que están en verde fueron descartadas como causas raíces a través de pruebas o inspecciones mostradas en el anexo 1, por tal motivo la que se encuentra en rojo es la causa raíz más probable de la falla.

Alternativas de solución Planteadas

- Corregir la torcedura de la carcasa: Esta alternativa no es viable económicamente, ya que para dicho procedimiento se requiere enviar el equipo a su casa matriz en Texas EEUU lo cual acarrea costos económicos elevados y pérdidas por indisponibilidad del equipo
- Actualización del sistema de lubricación con el fin de eliminar la transmisión sinfín-corona de forma permanente. En el análisis de la problemática con especialistas y fabricantes del equipo se concluyó que en la industria existen varios prototipos de estas máquinas y el modo de falla es similar, por tal motivo estos mecanismos han sido eliminados en los nuevos diseños.

La solución más viable es eliminar el mecanismo sinfín-corona que sirve para transmitir movimiento a la bomba principal del sistema de lubricación, lo cual concluiría con la modificación del sistema de lubricación:

- Realizar la instalación de un Skid hidráulico completo que permita la actualización de todos sus componentes según norma API614, esta solución es viable, pero se deben tener en cuenta criterios técnicos y económicos al momento de tomar la decisión según tabla 1: Matriz de selección de alternativas.
- Seleccionar una bomba que reemplace a la principal y a las auxiliares y que cumplan a cabalidad con los requerimientos propios del sistema

de lubricación, sin embargo, es pertinente tomar la decisión con base en un análisis de criterios, los cuales son mostrados en la matriz de selección para así poder realizar la selección de la alternativa más viable.

Tabla 1: Matriz de selección de alternativas

Matriz de selección			
Criterio	Alternativas		
	Reparación en U.S.A	Cambio de bomba incorporada por sistema de bombeo interno	
		Skit completo de lubricación	Cambio de la bomba principal
Económico	Se gasta USD 700.000 y no incluye montaje ni desmontaje.	Gasta USD 1.000.000 y no incluye adecuación e instalación.	Se gasta USD 40.000 no incluye montaje ni adecuaciones para montajes.
Tiempo de ejecución	6 meses	12 meses	3 meses
Confiabilidad	Debe ser monitoreada la condición del equipo una vez sea reparada y así ver que no exista desviación en su rendimiento.	El indicador de confiabilidad mejora al instalar un equipo nuevo, que cumpla con la norma API 614.	Eleva indicador de confiabilidad al cambiar la bomba por una que cumpla con la norma API 614.
Seguridad	No presenta cambio ya que permanecen los mismos componentes; bomba principal, dos bombas auxiliares,	Contiene tanque elevado para parada de emergencia, el cual tiene una limitante y es	Seguridad igual a la existente, a pesar de los cambios de las bombas principal y auxiliar, se

	bomba de parada de emergencia conducida por motor DC.	principalmente que no contienen suficiente cantidad de aceite para posible giro en reversa del generador.	mantendrá la misma bomba de parada de emergencia conducida por motor DC.
Mantenibilidad	Seguiría presentando una condición no ideal ergonómica	Mejora condiciones ergonómicas ya que las bombas y componentes se instalan externamente y habría un fácil acceso a ellas.	Mejora condiciones ergonómicas ya que las bombas y componentes se instalan externamente y habría un fácil acceso a ellas.
Instalación	Seguiría siendo igual, ya que no hay cambios estructurales diferentes a los que están actualmente.	No hay suficiente espacio en el área para ubicar el skid completo	Espacio suficiente. Modificaciones en la base, modificaciones en línea de llegada y salida de la bomba

Cabe resaltar que, para la consolidación del cuadro de decisión, en relación con la información de los criterios se tomó con base en entrevista previa con personal involucrado en la operación y mantenimiento del equipo.

4.3. Parametrizar las características de los fluidos, equipos, accesorios, y materiales.

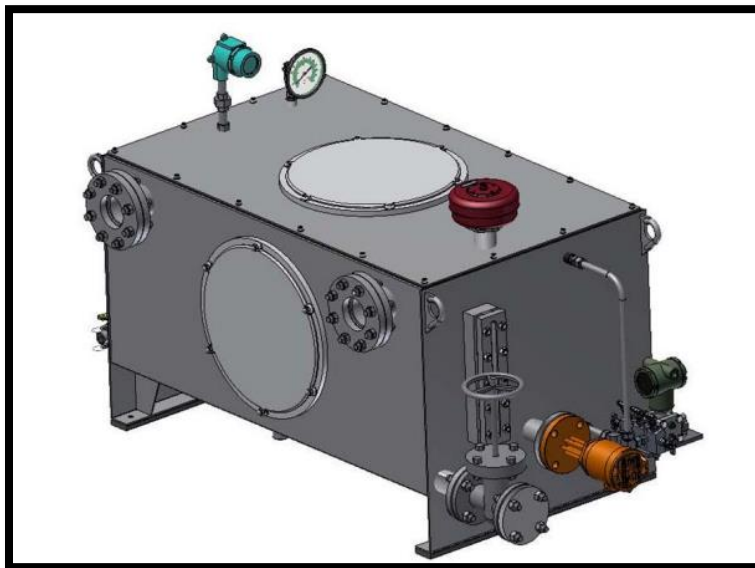
La norma API 614 es la encargada de establecer las especificaciones técnicas que debe tener un sistema de lubricación, principalmente en el sector Oil & Gas. A continuación, se mostrarán los requisitos establecidos por la norma para el sistema de lubricación con relación a los componentes que lo conforman:

Deposito

Las características del depósito deben ser las siguientes:

- Material de construcción es acero inoxidable AISI 304
- Ensamblaje en skid de la bomba, sobre apoyos o con bancada propia.
- Inclinación del fondo para facilitar la limpieza de impurezas y realizar el drenaje cuando sea requerido.
- Instalación de placas internas anti-vibración, marcos de pre filtrados y captación magnética.




Figura 18: Deposito del sistema de lubricación






Fuente: tomado de, RIVI, G. t. (2017). *Lubricacion industrial y aplicaciones especiales de fluidos*. Zaragoza: Grupo tecnico RIVI.

En la siguiente tabla 1 se muestran los accesorios ligados a área de instrumentación que debe llevar el depósito, con base en las normas API.

Tabla 2: Accesorios del depósito

Descripción	Componente
<p>Nivel réflex soldable</p> <p>Es un visor de nivel de vidrio transparente tipo réflex.</p>	
<p>Nivel magnético</p> <p>Indicador de nivel magnético con dos válvulas de aislamiento.</p>	
<p>Transmisor de presión</p> <p>Transmisor diferencial de presión magnetostrictivo.</p>	

<p>Nivel radar</p> <p>El medidor de nivel adopta una señal de alta frecuencia, que se emite a través de una antena.</p>	
<p>Resistencia eléctrica</p> <p>Resistencia de calentamiento bridada que sirve para calentamiento indirecto</p>	
<p>Sonda de temperatura</p> <p>Es un instrumento que transmite la temperatura de un lugar (emisor) a otro (receptor), por medios mecánicos o eléctricos</p>	

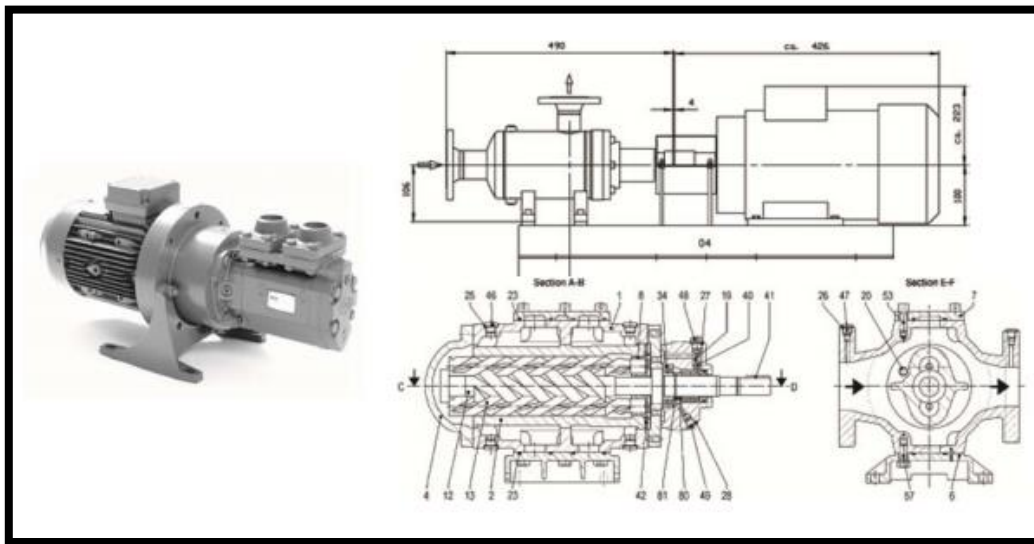
Bombas

Las bombas recomendadas por la norma API deben tener las siguientes características:

- Todos los equipos, incluyendo las bombas deberán diseñarse para una vida útil mínima de 20 años y al menos 5 años de funcionamiento ininterrumpidos.
- El sistema de lubricación debe incorporar una bomba de aceite principal y una bomba de aceite auxiliar o de reserva, ambas adecuadas para funcionamiento continuo de operación.
- Las bombas principales y auxiliares deben ser idénticas y cumplir la Norma API STD 610

- Se puede proporcionar una bomba de aceite de emergencia para permitir un apagado seguro sin daños al equipo en caso que falle la bomba principal como la auxiliar, y la potencia de los motores debe ser dimensionada de manera adecuada tanto para corriente continua como para corriente alterna.
- La bomba principal de lubricación puede ser accionada por turbina o motor. Las bombas de reserva serán conducidas por motor, esto debido a los tiempos de arranque relativamente largos para las bombas de turbina. Cuando se selecciona una turbina a vapor debe cumplir la Norma API STD 611 y los motores cumplir con IEEE 841 o NEMA MG-1 a prueba de explosión.
- Cuando se selecciona el conjunto motor-bomba deberá llevar una válvula de seguridad la cual se selecciona de acuerdo a la norma API 520-526.

Figura 19: Bomba sistema de lubricación



Fuente: tomado de, RIVI, G. t. (2017). *Lubricacion industrial y aplicaciones especiales de fluidos* . Zaragoza: Grupo tecnico RIVI.

Tuberías:

La tubería para el sistema de lubricación debe ser seleccionada en material de Acero Inoxidable (por ejemplo, ASTM A312 tipo 304 o 316), sin costuras y pueden ser soldadas por fusión eléctrica.

Intercambiadores de calor:

Los intercambiadores de calor se pueden seleccionar de acuerdo a consideraciones específicas de cada proyecto y dependiendo de ello se utiliza agua o aire como medio de refrigeración, sin embargo, dicha selección también se puede realizar con base a las normas ASME VIII DIV.1, TEMA C, TEMA R, API 661. El material de fabricación de los enfriadores puede ser en acero carbón (por ejemplo, ASTM A 106-B y A53-B)

Figura 20: Intercambiadores de calor



Fuente: tomado de, RIVI, G. t. (2017). *Lubricacion industrial y aplicaciones especiales de fluidos* . Zaragoza: Grupo tecnico RIVI.

Filtros:

Las consideraciones más relevantes al momento de seleccionar un filtro son las siguientes:

- Los filtros pueden ser simples o dobles conmutables en servicio.
- Cartucho filtrante de fibra se encuentra disponible desde 10μ .
- El material del cuerpo puede ser en acero inoxidable o acero carbono.
- Indicador de colmataje (manómetro diferencial, presostato o transmisor diferencial).

Figura 21: filtros del sistema de lubricación



Fuente: tomado de, RIVI, G. t. (2017). *Lubricacion industrial y aplicaciones especiales de fluidos*. Zaragoza: Grupo tecnico RIVI.

Los sistemas de lubricación generalmente tienen asociados una serie de accesorios de instrumentación, los cuales se muestran en la tabla 2:

Tabla 3: instrumentación del sistema de lubricación

Descripción	Componente
Válvula reductora de presión	
Válvula de compuerta	
Caja de bornas	
Manómetros y termómetros	
Tubería y accesorios	

Fuente: tomado de, RIVI, G. t. (2017). *Lubricacion industrial y aplicaciones especiales de fluidos* . Zaragoza: Grupo tecnico RIVI.

Requerimientos que debe cumplir el sistema de lubricación actual.

El medio a través del cual se lubrica es principalmente aceite, que a su vez debe cumplir básicamente con unas características físico-químicas mínimas que garanticen el desempeño óptimo durante largos periodos de tiempo. En esa medida se muestran a continuación las propiedades de mayor relevancia:

- Aceite mineral altamente filtrado y altamente refinado.
- Máxima capacidad de humectación de metales y capacidad para evitar la formación de óxido en las partes metálicas bañadas de aceites. La alta estabilidad frente a la oxidación y la resistencia a la corrosión puede lograrse mediante el uso de inhibidores, o como resultado de un proceso de referencia particular.
- Libre de ácidos o alcalinos
- La mejor capacidad posible para separar rápidamente el agua.
- Tendencia mínima a emulsionarse o formar espuma cuando se agita con agua y/o aire.
- Las características técnicas que debe tener el aceite de lubricación son mostradas en la tabla 3.

Tabla 4: Características requeridas

Característica	Valor
Cst@ 40°C	29.6
Cst@ 100°C	5.4
Índice de viscosidad, ASTM D2270	110°C

Punto de congelación, °C, ASTM D 97	-30 °C
Punto de inflamación, °C, ASTM D 92	224 °C
Densidad @ 15.60°C (g/ml)	0.86

Fuente: tomado de manual técnico, Serie Móvil DTE800

Temperaturas de operación:

Según el manual de operación del Equipo, las ventanas operativas de la temperatura del sistema de lubricación, son las que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5: temperaturas de operación

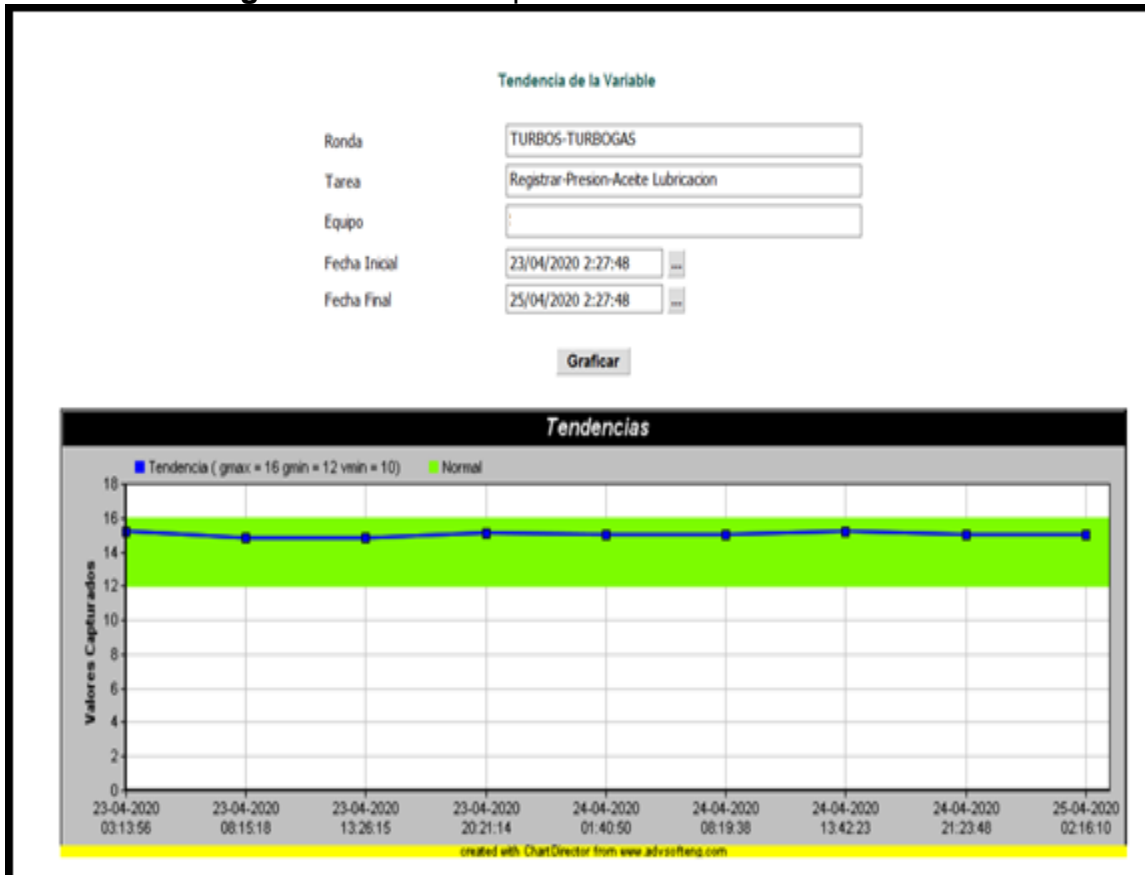
Operación	Temperatura del aceite °F
Temperatura normal de operación	120
Máxima temperatura en operación.	180
Punto de alarma	185
Apagado (Shutdown)	195

Fuente: tomado de manual de operación del equipo

Presión del sistema de lubricación:

Para la presión de operación se requiere tomar la ventana operativa del sistema de lubricación que se muestra en la figura 24, la cual indica una presión de operación entre 14-16 psi.

Figura 22: ventana operativa sistema de lubricación



Fuente: Pantalla de control del equipo

Caudal del sistema de lubricación:

Con base en la capacidad de la bomba de lubricación actual se establece una medida del caudal utilizando un aparte de la norma API en el que establece que el caudal del sistema de lubricación debe ser mínimo el 20% de la capacidad de la bomba, por tal motivo se toma el 25% de la capacidad de la bomba auxiliar

Capacidad bomba Auxiliar:161GPM

Caudal sistema= 161 GPM *(0.75) = 120.7 GPM.

Caudal requerido en el sistema de lubricación es de 120.7 GPM.

Justificación de cálculos:

Con relación a la posibilidad de los cálculos planteados previamente, se debe aclarar que el enfoque del desarrollo del proyecto, se basa en la selección de una bomba adecuada según especificaciones del sistema de lubricación y bajo la revisión por parte de la norma API, que cumpla a cabalidad con los requerimientos mínimos establecidos previamente.

4.4. Organizar un taller de RCA (Análisis Causa Raíz) a través del uso de reuniones sistemáticas que involucre profesionales de confiabilidad del área de turbogeneradores con el fin de retroalimentar los avances del proyecto.

La información descrita en el proyecto está fundamentada en criterios técnicos desarrollados por ingenieros del área de Confiabilidad de la empresa que posee el turbogenerador y complementada bajo lineamientos investigativos por parte de los Autores.

Para el desarrollo de este objetivo fue necesario el uso de herramientas virtuales (Reuniones por la aplicación Teams y telefónicas) debido a que en la actualidad se presenta una pandemia a nivel nacional y mundial que afecta indirectamente la ejecución presencial.

- Como soporte técnico para el desarrollo, estudio de la problemática y la solución planteada, se realizaron consultas vía telefónicas con ingenieros de confiabilidad de la empresa que posee el turbogenerador.

Como resultado de las comunicaciones se obtienen datos técnicos e información de gran importancia, la cual nos permitió enfocarnos a la solución planteada.

- Se realizó reunión virtual por la plataforma Teams el día 27 de Julio del 2020 con el ingeniero de confiabilidad del área de Servicios Industriales. Soporte de ingeniería de la empresa que posee el equipo para el Área de Servicios Industriales.

Como resultado de la reunión se evidencio lo siguiente:

- ✓ una propuesta que se está proyectando por parte de la empresa está encaminada en la eliminación de la Bomba incorporada por un sistema de lubricación centralizado (Skid Hidráulico), pero debido al costo es una inversión bastante alta.
- ✓ El tiempo medio entre fallas del sistema de transmisión Sinfín Corona ha incrementado de 3 a 9 meses aproximadamente, como resultado de las mejoras realizadas al equipo, siendo una de ellas la corrección de la flexibilidad en las tuberías.
- ✓ La empresa busca que la solución aplicada para el Turbogenerador de estudio, también sea viable para los otros dos turbogeneradores contiguos que presentan el mismo modo de falla, pero que tienen algunas características operacionales diferentes entre cada uno.
- ✓ Nos informa que el próximo mantenimiento Mayor que se realizara al Turbogenerador de estudio está programado para el año 2022 y sugiere como prueba piloto para este equipo la implementación de la propuesta planteada en este proyecto.
- De las comunicaciones telefónicas que se llevaron a cabo con los ingenieros de confiabilidad se obtuvo la siguiente información complementaria.

- ✓ Descripción del funcionamiento del sistema de generación y del sistema de lubricación.
- ✓ Información de las investigaciones y RCA´s desde que se presentó la falla hasta la fecha.
- ✓ Diferencias de funcionamiento entre un sistema de lubricación que opera para un Turbogenerador y un sistema lubricación para un Turbocompresor.
- ✓ Las soluciones planteadas como resultados de las diferentes investigaciones a la problemática.
- ✓ Mejoras ejecutadas a los Turbogeneradores que están presentando la falla para aumentar el tiempo medio entre fallas.
- ✓ Posibles soluciones para eliminar la falla y observaciones sugeridas para el planteamiento de la propuesta.

En el Anexo 3 se encuentra los soportes de las conversaciones con los ingenieros de confiabilidad.

4.5. Evaluación del sistema de lubricación a través de estándares establecidos por la norma API 614.

Para el desarrollo de este objetivo es importante enfatizar que se realizó a través de las recomendaciones establecidas por la norma API para la selección de una bomba adecuada que cumpla a cabalidad con los parámetros establecidos por el sistema de lubricación y de igual manera cumpla con estándares establecidos por la norma API 614.

Requerimientos y consideraciones según la norma API614

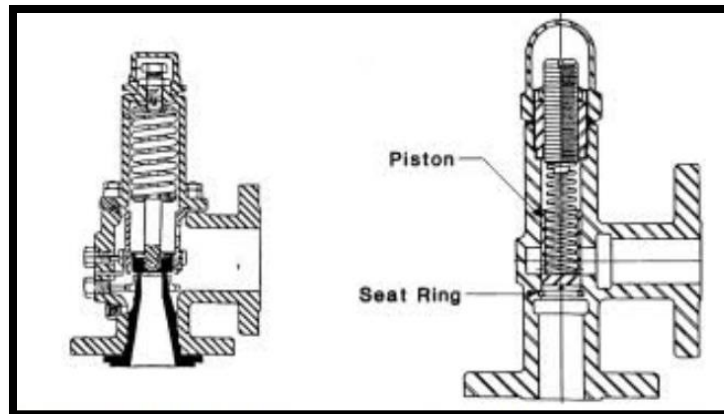
- Los equipos deben ser diseñados y construidos para una vida útil de mínimo 20 años y al menos 5 años de funcionamiento ininterrumpido
- Los depósitos y tuberías deben ser fabricados en acero inoxidable austenítico
- El sistema de lubricación debe incorporar una bomba principal y una bomba de reserva, las dos diseñadas y fabricadas para un funcionamiento continuo de operación.
- La bomba principal y de reserva deben ser idénticas
- Las bombas deben ser externas al depósito
- La bomba de parada de emergencia debe permitir un apagado seguro sin daños al equipo en caso que fallen la bomba principal y la bomba de reserva. El diseño de dicha bomba está definido según configuración dada por el usuario.
- El usuario especifica si la bomba principal es impulsada por turbina o por motor.
- Las bombas de reserva serán conducidas por motor.
- Si las dos bombas son accionadas por motor, las fuentes de alimentación eléctrica deben ser independientes para cada una.
- Los motores deberán cumplir con la norma IEEE841 o NEMA MG-1 a prueba de explosión
- Las turbinas de vapor deben cumplir con la norma API STD 611
- Las bombas centrifugas deben cumplir con la norma API STD 610
- Las bombas rotativas de desplazamiento positivo deben cumplir con la norma API STD 676

Selección de bomba.

Para seleccionar la bomba de lubricación se emplearon los siguientes criterios establecidos por la norma API 614:

- La capacidad que debe entregar la bomba debe ser seleccionada cuando el aceite bombeado este a la mayor temperatura y menor viscosidad.
- La bomba seleccionada debe proporcionar como mínimo un caudal del 20% por arriba del flujo normal de operación del sistema.
- En el caso de las bombas de desplazamiento positivo, deben estar en la capacidad de entregar todo el flujo, razón por la cual el set point de presión de la válvula de alivio debe superar un 90% del diferencial de presión del sistema.

Figura 23: válvulas de alivios recomendadas por API 614



Fuente: Estándar API 614

Análisis comparativo entre bomba centrífuga y de desplazamiento positivo.

Existen dos tipos de bombas que han sido ampliamente usadas en sistemas de lubricación, las cuales son las bombas centrífugas y las de desplazamiento positivo de tipo tornillo, a continuación, se realizara un análisis comparativo entre este tipo de bombas con el fin de determinar cuál de ellas, cumple a cabalidad con todos los requerimientos de la instalación.

Tabla 6: Tipos de Bombas

Tipo de bomba	Recomendación
Bomba centrífuga	Las bombas centrífugas deben entregar la presión del sistema especificada a través de la bomba y deben operar entre 50 por ciento y 110 por ciento del punto de mayor eficiencia.
Bomba de desplazamiento positivo	Las bombas de desplazamiento positivo deben tener la capacidad de suministrar el flujo requerido a una temperatura de 50°F en el setting de la válvula de alivio de la bomba. el ajuste de la presión de la válvula de alivio más el 10 por ciento será un máximo del 90 por ciento de la clasificación de presión diferencial máxima del fabricante para la bomba de lubricación

En la tabla 5 se muestra una comparación a grandes rasgos de las bombas que se pueden usar para sistemas de lubricación, de hecho, actualmente las bombas que

operan el sistema de lubricación son centrifugas, sin embargo, el sistema que se desea instalar actualmente se requiere que el caudal suministrado por la bomba sea el mismo siempre y no presente fluctuaciones en su capacidad, por tal motivo la compañía se inclina más por el uso de bombas de desplazamiento positivo.

Tabla 7: Bombas de desplazamiento positivo más usadas

Tipo	Características
Bombas de engranajes	<p>Las bombas de engranajes se utilizan para las siguientes condiciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A velocidades de eje de entrada de 120 rpm a 1800 rpm. • con viscosidad de aceite de 100 ssu a 500 ssu. • Donde las presiones de descarga de la bomba de aceite lubricante son superiores a 150 psi
Bombas de tornillos	<p>Las bombas de tornillos son más viables para las siguientes condiciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operación con bajos niveles de ruido. • Donde la velocidad de entrada de la bomba excede 3500 rpm. • Donde predomina una alta viscosidad del fluido. • Donde la presión de descarga sea de 150 psi o menos

En la tabla 7 se logra evidenciar que las bombas de tornillos son más viables para sistemas de lubricación de acuerdo a consideraciones de viscosidad, niveles de ruido y velocidades de operación.

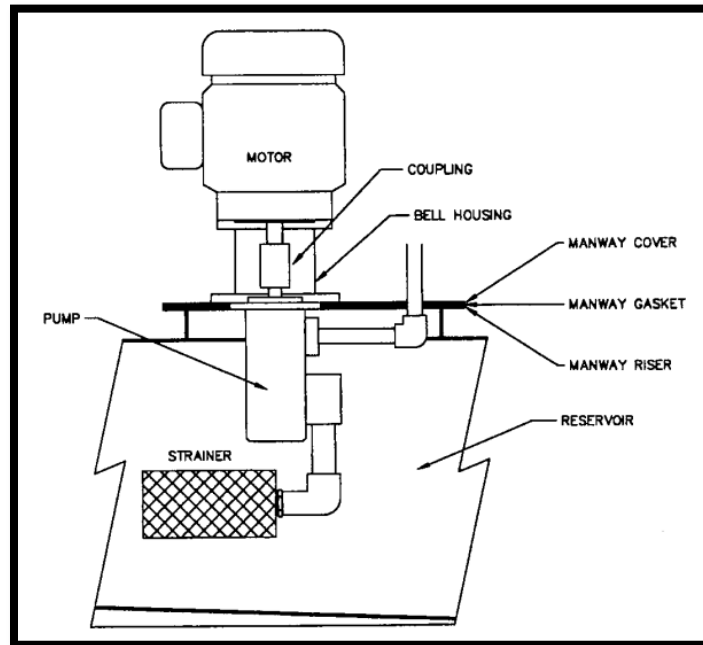
Por este motivo es posible asegurar que las bombas más comunes usadas hoy en día para sistemas de lubricación con un solo nivel de bombeo son las bombas de desplazamiento positivo de tipo tornillo. Este diseño proporciona un flujo relativamente libre de pulsaciones, silencioso y sin vibraciones. Dependiendo del tamaño del rotor, las bombas de tornillo pueden funcionar a varias velocidades en amplio rango. Con el número de tamaños y diseños disponibles, esto permite una buena selección de la bomba. Para cumplir con todas las condiciones de flujo y presión.

Las bombas de tornillos más común mente utilizadas en sistemas de lubricación, son de dos tipos:

Bombas verticales

Las bombas verticales sumergibles, se caracterizan por tener el motor instalado sobre el reservorio del aceite y la bomba sumergida dentro, si se decidiera instalar esta bomba se debería modificar el tanque en la parte superior con el fin de tener las facilidades para la instalación.

Figura 24: bomba de tornillo vertical

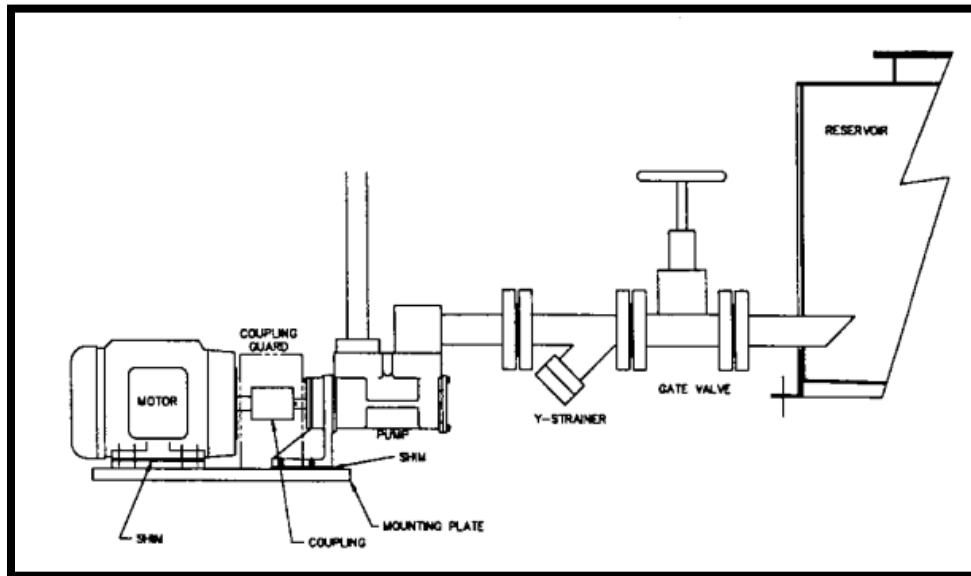


Fuente: Selección de bombas API 614, Kellogg-Brown

Bomba horizontal

Esta bomba se instalaría en la parte externa del tanque, la línea de succión saldrá del reservorio y sobre ella abra una válvula de compuerta y un filtro tipo (Y), la línea de descarga conduce al enfriador de aceite, sobre ella también va instalada una válvula anti-retorno.

Figura 25: bomba de tornillos horizontal



Fuente: Selección de bombas API 614, Kellogg-Brown

Criterios de selección.

- Mantenibilidad
- Confiabilidad
- Facilidad para instalar
- Espacio disponible

Tabla 8: criterios de selección de bombas de tornillos

Criterio	Bomba Horizontal	Bomba Vertical
Mantenibilidad	Es de fácil mantenimiento ya que se encuentra en un lugar externo al depósito de aceite lubricante con el espacio suficiente para poder maniobrar con facilidad.	Difícil acceso a las actividades de mantenimiento ya que se requiere desmontar la tapa del tanque reservorio, lo cual hace difícil de maniobrar al momento de trabajar.
Confiabilidad	Este tipo de bombas es perfectamente abalado por la norma API 614.	Este tipo de bombas es perfectamente abalado por la norma API 614.
Facilidad para instalar	Es perfectamente viable ya que son pocas las modificaciones que se tendrían que realizar a la base y a las facilidades (tuberías succión y descarga) para la instalación.	Para poder instalarse requiere hacer modificaciones al tanque y a algunas facilidades como tuberías de succión y descarga, por tal motivo se hace más complicado.
Especio requerido	Hay espacio suficiente para la instalación ya que ocuparía el espacio de la bomba auxiliar existente.	No hay el suficiente espacio ya que el tanque reservorio no tiene las dimensiones para el espacio de la bomba.

Selección de a bomba.

Para seleccionar se debe calcular la presión requerida.

$$Pot[Hp] = \frac{PQ}{1714\eta}$$

Donde:

P=presión de trabajo

Q=Flujo Requerido

η : eficiencia de la bomba, un valor practico es 0.75

Con base en los datos tomados de la parametrización del sistema de bombeo tenemos lo siguiente:

P= 100 psi

Q= 161 GPM

$$Pot[Hp] = \frac{100psi * 161GPM}{1714 * 0.75} = 12,52 Hp$$

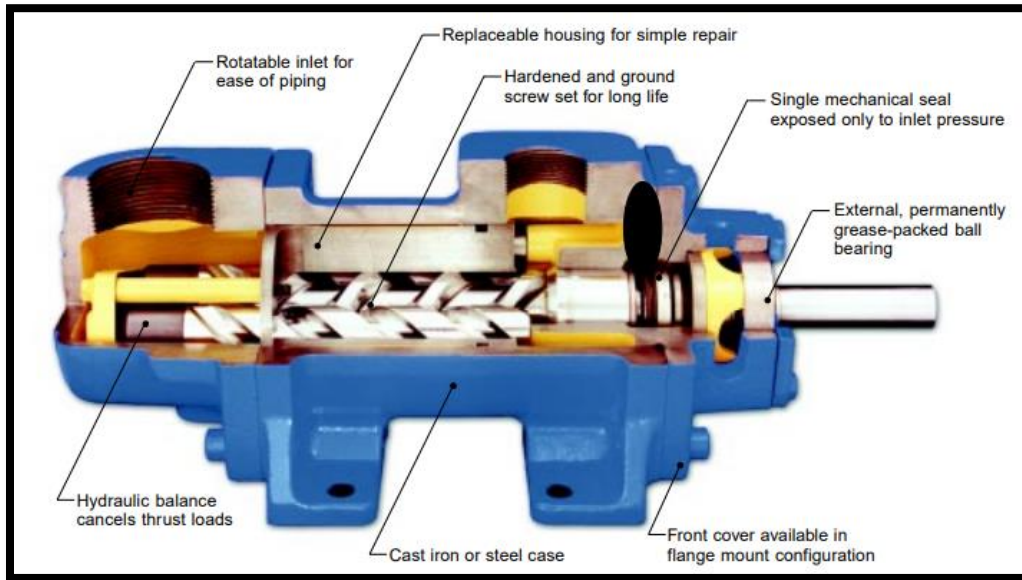
La potencia requerida de la bomba es de 12,52 Hp aproximadamente.

Para el proceso de selección de la bomba se encuentran variedad de marcas en el mercado siendo las más comunes para a región entre las marcas IMO, Allweiler y Hillmann, ya que son marcas utilizadas por la empresa y por tanto se tiene la posibilidad de un servicio postventa confiable.

Una de las opciones encontradas en el mercado con las especificaciones requeridas en el proyecto es la BOMBA DE ACEITE MARCA IMO PUMP serial 3D de tamaño 250, cumple con las siguientes condiciones:

- las rpm son 3600
- Tienen una presión máxima de 500psi vs 100psi que nosotros necesitamos
- El flujo máximo es de 192 GPM vs 161 GPM que es del sistema actual.

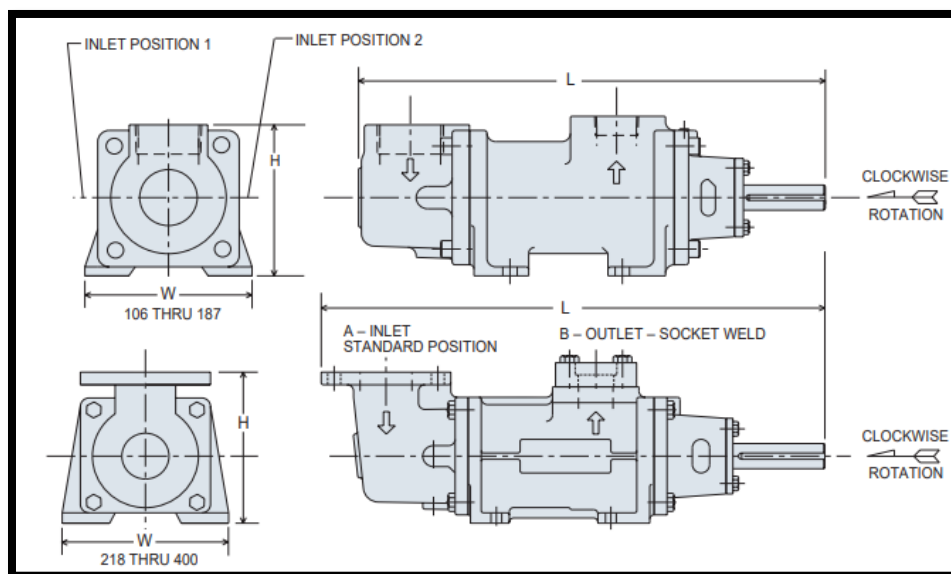
Figura 26: Bomba de Tornillo Marca IMO



Fuente: Manuel IMO PUMP – 3D SERIES

[file:///C:/Users/ASUS/Downloads/IMO-Series-3D-Screw-Pumps-Brochure%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ASUS/Downloads/IMO-Series-3D-Screw-Pumps-Brochure%20(1).pdf)

Figura 27: Dimensiones de la Bomba de Tornillo Marca IMO



Fuente: Manuel IMO PUMP – 3D SERIES

[file:///C:/Users/ASUS/Downloads/IMO-Series-3D-Screw-Pumps-Brochure%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ASUS/Downloads/IMO-Series-3D-Screw-Pumps-Brochure%20(1).pdf)

Tabla 9: Dimensiones Bomba de Tonillo Marca IMO 250

Size	A		B		H		L		W		WEIGHT	
	INCH	MM	INCH	MM	INCH	MM	INCH	MM	INCH	MM	LBS	KG
106	1	25.4	1	25.4	5 5/8	143	14 7/16	367	6	153	41	18.6
118	1 1/2	38.1	1	25.4	5 7/8	150	15 1/4	388	6 1/4	159	44	20
137	1 1/2	38.1	1	25.4	6 1/8	156	16 11/16	424	6 1/2	166	50	22.7
156	2	50.8	1 1/2	38.1	6 1/2	166	18 5/8	474	7	178	66	30
187, Y, M	2 1/2	63.5	1 1/2	38.1	6 3/4	172	20 5/16	516	7 1/2	191	82	37.3
218,L	3	76.2	2	50.8	9	229	29 3/16	742	9	229	154	70
250,P	4	101.6	2 1/2	63.5	10 3/4	273	32 1/4	820	10	254	202	91.8
275,E	4	101.6	3	76.2	11 1/8	283	32 11/16	831	11	280	246	112
312,P	4	101.6	3	76.2	11 3/4	299	35 1/4	896	12	305	281	128
337,350	5	127	4	101.6	13 1/4	337	38 9/16	980	13	331	410	186
400,P	6	152.4	4	101.6	16	407	41 5/8	1058	14	356	601	273

Fuente: Manuel IMO PUMP – 3D SERIES

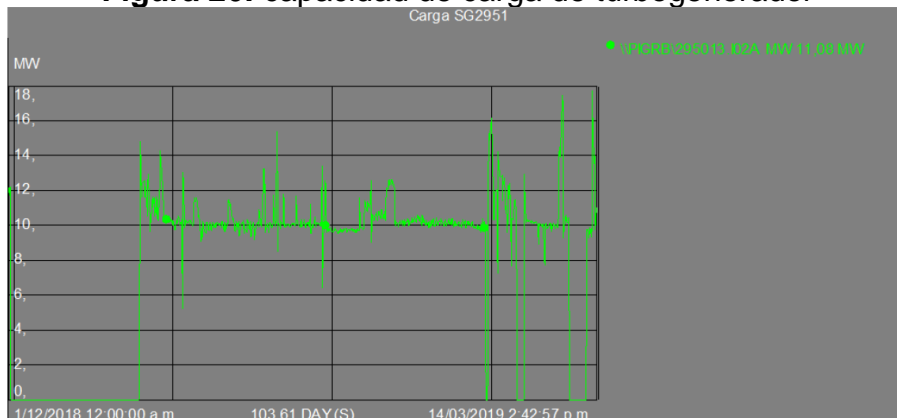
[file:///C:/Users/ASUS/Downloads/IMO-Series-3D-Screw-Pumps-Brochure%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ASUS/Downloads/IMO-Series-3D-Screw-Pumps-Brochure%20(1).pdf)

5. RESULTADOS

El presente ítem tiene como objetivo mostrar los hallazgos encontrados tras la realización del proyecto.

- El primer hallazgo encontrado se basa en que las normas bajo las cuales fue diseñado o montado el turbogenerador han venido actualizándose, sin embargo, la instalación no ha sufrido ese efecto de actualización, por tal motivo evaluar la confiabilidad con los estándares actuales es bastante complicado.
- Otro hallazgo de gran relevancia se trata de la falta de la construcción de una curva de desempeño del turbogenerador con el cual se logre establecer a través del análisis de weibull, el punto en el cual se encuentre el grado de envejecimiento del equipo y con ello hacer análisis de factibilidad más precisos, ya que hasta ahora solo se cuenta con el monitoreo de la carga del turbogenerador como se muestra en la figura 26, siendo ello un parámetro limitado.

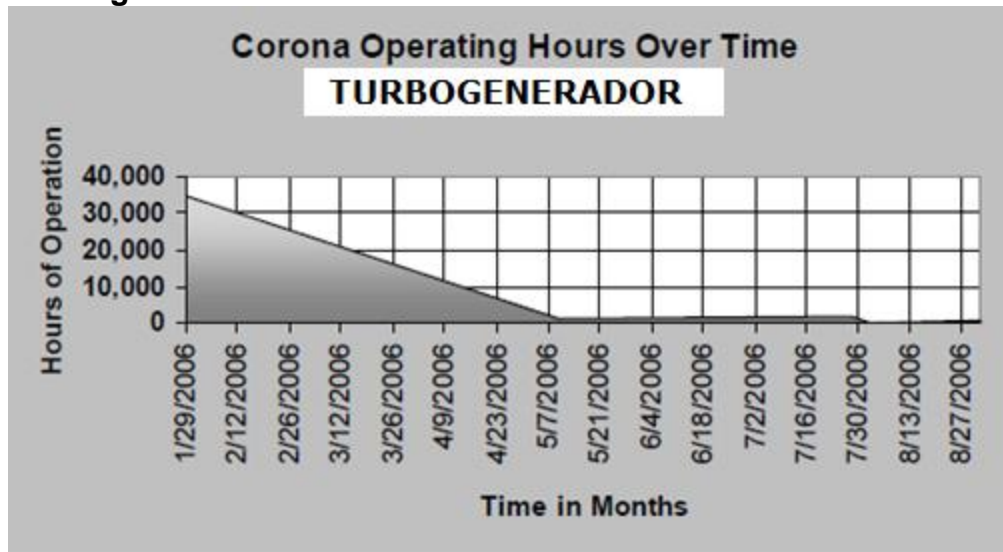
Figura 26: capacidad de carga de turbogenerador



Fuente: tomado de Refinería

- Con la implementación de un nuevo diseño en el sistema sin fin corona, se pretendía dar solución al mal actor que se venía presentando, sin embargo, según informe de los especialistas se logra apreciar en la figura 27, que dicha solución no ha podido satisfacer la necesidad 100%, ya que aún se siguen presentando fallas con el nuevo diseño, aunque se haya reducido considerablemente.

Figura 27: tendencia de falla con modificación sinfín-corona.



Fuente: tomado de, Informe de especialistas

- Los procedimientos de operación y puesta en servicio del Turbogenerador, al igual que los procedimientos de montaje del sistema de acoplamiento sinfín-corona y del mantenimiento general que se realizan en la actualidad han sido mejorados y cuentan con la aprobación de los especialistas de fabrica.
- El tipo de aceite que está utilizando el sistema de lubricación ISO 32 MOBIL DTE 832 con aditivos de media presión cumple con los requerimientos y estándares establecidos en la norma API614.

- A pesar de todas las mejoras que se han realizado en los mantenimientos, en correcciones del alineamiento, en procedimientos de operación y puesta en servicio, se ha logrado mejorar el TMEF, pero la falla en el sistema de transmisión sinfín-corona continua.
- Aunque las bombas auxiliares existentes cumplen con los requerimientos del sistema de lubricación para las necesidades del turbogenerador, dichas bombas no cumplen con las características sugeridas por la norma API614.
- En el análisis realizado al turbogenerador se evidenció que existen dos turbogeneradores contiguos, que presentan el mismo tipo de falla, por tal motivo la solución planteada en este proyecto puede ser aplicada a los tres turbogeneradores.
- Los equipos conductores existentes de las bombas de lubricación suministran la potencia requerida por las bombas de tornillos que se sugieren instalar.

6. CONCLUSIONES

- Con la caracterización de los componentes existentes del sistema de lubricación se logra concluir que, no todos los componentes que están instalados actualmente en el sistema de lubricación, cumplen con los lineamientos de la norma API 614.
- Con el análisis de causa raíz que se logró identificar una falla en el proceso de arranque del turbogenerador, que dejó ver la falta de un procedimiento técnico idóneo que sirviera a la preparación de los operadores que arrancaron inicialmente el equipo.
- El parámetro más importante al momento de analizar las variables de operación del sistema de lubricación es la capacidad de operación de la bomba, ya que es el corazón del sistema de lubricación y a partir de ello se puede seleccionar los demás componentes.
- Eliminar el sistema de transmisión sinfín-corona, y cambiar la bomba principal incorporada por una bomba principal y otra bomba auxiliar externas que cumplan con las recomendaciones de las normas API614 y las características de diseño que requiere el sistema de generación.
- Con la elaboración del taller RCA con los ingenieros de confiabilidad del área de Servicios Industriales de la empresa que posee el turbogenerador se concluye satisfactoriamente el proyecto, dando a conocer los resultados de un metódico que logro identificar serias problemáticas en el indicador de confiabilidad del turbogenerador de vapor.

7. RECOMENDACIONES

- La causa raíz real de la falla aunque fue identificada aún no ha sido corregida, por tal motivo la solución planteada en la investigación sugiere aislar el equipo donde se ve reflejada la falla, por otro equipo externo que cumpla las mismas funciones de operación
- Se recomienda realizar un análisis de factibilidad técnica y económica que permita evaluar la pertinencia de cambiar todos los componentes instalados que no cumplan con los estándares establecidos por la norma API 614.
- De los tipos de bombas sugeridas por la Norma API614 para un sistema de lubricación, la más usada y recomendada por los fabricantes de turbomaquinaria a nivel mundial son las bombas rotativas tipo Tornillo, las cuales hay gran variedad de fabricantes y diseños en el mercado que cumplen con los requerimientos y necesidades del sistema de generación existente.
- Se recomienda actualizar periódicamente y detalladamente todos los procedimientos de arranque de los turbogeneradores que se encuentren operando, con el fin de actualizar aspectos que involucren la confiabilidad y la integridad del equipo.
- Mejorar la confiabilidad de la bomba de parada de emergencia, donde incluya un banco de baterías auxiliar y un plan de mantenimiento periódico a todos los componentes del sistema.
- Se recomienda un estudio de factibilidad para el diseño e instalación de un tanque elevado que suministre aceite a los cojinetes del sistema de

generación en caso tal de falla de arranque de la bomba de parada de emergencia como un sistema de seguridad redundante.

- Aunque los dos equipos conductores existentes del sistema de lubricación (Motor AC y Turbina a Vapor), cumplen con los requerimientos de funcionalidad para las bombas de tornillo sugeridas, se recomienda realizar el cambio de turbina a vapor por un motor eléctrico AC y realizar las modificaciones de alimentación eléctrica de dicho motor según norma API 614.
- Para aplicar la solución planteada en este proyecto a los otros dos turbogeneradores se recomienda estandarizar los sistemas de gobernación y control en las tres máquinas, instalando sistemas independientes del acoplamiento sinfín-corona.
- La propuesta planteada en el proyecto tiene un énfasis educativo y está desarrollado bajo lineamientos de las Unidades Tecnológicas de Santander para tal fin, por esta razón, se recomienda a la Empresa que posee el turbogenerador de estudio desarrollar todos los Análisis financieros y de ingeniería que impliquen la implementación de esta propuesta.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, M. (2000). *Rotating Machinery Vibration from Analysis to Troubleshooting*. New York: Marcel Dekker.
- Albarracin . (2002). *Lubricación de Turbinas de Vapor*. Barrancabermeja: Ecopetrol GRB,.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. (2008). *Petroleum, Petrochemical and Natural Gas*. Washinton: API.
- Anderson, A. (2006). *Power System Protection*. Arizona: Wiley-IEEE.
- API. (s.f.). *INSTITUTO AMERICANO DEL PETROLEO* .
- Crespo, P. V. (s.f.). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Revista chilena de ingeniería - Scielo* .
- Girdhar, P. (2005). *Practical Centrifugal Pumps Design Operation and Maintenance*. Oxford: Elsevier.
- Gonzalez, A. (2016). *Coordinacion de protecciones en redes electricas con generacion distribuida*. Mexico : El Sevier.
- J. Guadalupe Gonzales, I. T. (01 de Marzo de 2008). Vista general del mantenimiento preventivo. *Virtual Pro- procesos Industriales* .
- Montane, P. (2016). *coordinación de los relés de protección digitales*. Barcelona: Politecnico de Madrid.
- NTC. (1998). *Norma Tecnica Colombiana* .
- Piedraita, J. A. (2016). *IMPLEMENTACION PARA UNA RUTINA DE LUBRICACION PARA LAS MAQUINAS DE TEJER DE TEXTILES OMNES*. PEREIRA: UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA.
- RETIE. (2008). *REGLAMENTO TECNICO DE INSTALCIONES ELECTRICAS* .
- RIVI, G. t. (2017). *Lubricacion industrial y aplicaciones especiales de fluidos* . Zaragoza: Grupo tecnico RIVI.
- Soto, A. H. (2018). *diseño de un sistema automatico de lubricacion para el grupo de arrastre y la mesa de oscilaciones de la maquina de colado continuo de la empresa sidoc S.A*. SANTIAGO DE CALI: Universidad Autonoma de Occidente.
- Vallejo, J. A. (2007). *Coordinacion de proteccciones en sistemas de distribucion con generacion distribuida*. Mexico : Instituto Politecnico Nacional .
- willian Olarte, M. B. (2010). *TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA* . *Scientia et Technica Año XVI*.
- Zambrano, A. (2011). *Turbina de gas* . Barquisimeto : Universidad Nacional Experimental Plitecnica de la Fuerza Armada. .

9. ANEXOS

ANEXO 1

CAUSA BASICA 1:DESALINEACIÓN DURANTE MONTAJE

Causa 1.1: Procedimiento Inadecuado Montaje Corona: Confuso o Incompleto

Solución: Modificar procedimiento de montaje, unificando los existentes para emitir un único procedimiento oficial.

Ejecutada 100%: *Se discutieron varios procedimientos con diferentes herramientas, finalmente se concluyó que el procedimiento descrito en el manual Original (enviado en enero de 2006 por los especialistas del equipo) es el que debe seguirse: Básicamente Alinear 0-0 en altura (sin fin- corona), con Juego entre dientes de 0.012"-0.016" y distancia entre centros de 6.250" (+/- 0.001").*

No se obtuvieron mejoras importantes utilizando otros procedimientos, sin embargo, sí se ganaron algunas lecciones durante su aplicación:

- *La corona puede estar ligeramente más alta, pero si está por debajo se reduce su tiempo de vida.*
- *Si la distancia entre centros está muy cerrada y el Juego entre dientes es menor de 0.012" hay un desgaste prematuro. Si el Juego entre dientes es inferior a 0.008" la vida de la corona es menor a 1 semana.*
- *Si la distancia entre centros está muy abierta y el Juego entre dientes es mayor a 0.016", el ruido de la corona se incrementa y puede incluso no haber engrane homogéneo. La corona puede tener una vida inferior a 15 días y es posible que la máquina se dispare, aunque exista poco desgaste.*
- *La dirección del chorro de aceite debe verificarse en cada montaje, pues un chorro mal dirigido puede reducir la vida de la corona en menos de 24 horas.*

Causa 1.2: Personal no entrenado

Solución: Contratar Técnico de Servicios del Fabricante para entrenamiento a personal que opera el turbogenerador.

Ejecutada 100%: *Se gestionó contrato de técnicos especialistas en turbinas con el fabricante del equipo. La asistencia en campo se desarrolló en los meses de agosto septiembre para ayudar a supervisar el montaje de coronas y el armado del Turbogenerador.*

Se obtuvo una mejora de los procedimientos de montaje, se analizaron otras causas posibles de las fallas de corona y se actualizaron de la máquina.

Causa 1.3: Esfuerzos Excesivos por Tuberías de vapor

Solución: Realizar estudio de flexibilidad y ejecutar las recomendaciones procedentes del mismo.

En ejecución: *Discutido y recomendado por los especialistas en septiembre de 2006. Se realizó inspección por parte de especialista de equipo estático, generando recomendaciones que llevaron al inicio de un estudio de ingeniería desde el 22 de junio de 2007.*

Causa 1.4: Desgaste Guías de Carcasa (MPMNE)

Solución: Incluir mantenimiento de guías de carcasa dentro de overhaul de turbogeneradores.

En planeación: *Actividad sugerida por los especialistas, requiere retirar la turbina de su base. El trabajo se incluyó en las especificaciones de mantenimiento del turbogenerador entregadas en junio del 2007.*

Para los otros dos turbogeneradores, que tuvieron reciente overhaul, pero sin mantto a guías de carcasa, resultaría más costo-efectivo instalar gobernadores electrónicos y esperar el próximo overhaul para hacer el mantenimiento.

Causa 1.5: Daño o Cedencia del Grouting (MPMNE)

Solución: Incluir cambio de grouting y nivelación posterior de turbina y generador (re-instalación del equipo).

En planeación: *Actividad sugerida por los especialistas, requiere retirar la turbina de su base. Se realizó una primera inspección por especialistas civiles, quienes conceptuaron que no se notaba deterioro excesivo pero que las medidas de nivelación que se tomaron mostraban diferencias importantes que deben ser reevaluadas y corregidas una vez se retire la turbina.*

El trabajo se incluyó en las especificaciones técnicas del turbogenerador entregadas en junio del 2007.

Causa 1.6: Procedimiento Inadecuado o Inexistente para Alineación de internos (MPMNE)

Solución: La alineación de internos debe tener en cuenta la posición con respecto a la corona. Debe asegurarse procedimiento con el fabricante e incluirse como actividad crítica del overhaul.

En planeación: *Actividad sugerida por PTB. La alineación de los componentes internos de turbina no es descrita en el manual y es posible hacerla en diferentes formas si todos los componentes están totalmente nivelados. En caso contrario, deben tomarse referencias de los elementos más sensibles (como la corona). Los contratos realizados para overhaul de máquinas no han involucrado el fabricante en esta etapa y los resultados muestran que sigue existiendo desalineación con respecto a la corona. Para desarrollar el procedimiento y ponerlo en práctica, se incluyó dentro de las especificaciones técnicas para el mantenimiento del turbogenerador entregadas en junio del 2007.*

CAUSA 2: LUBRICACIÓN INADECUADA

Causa 2.1: Especificación Insuficiente del Aceite

Solución: Revisar las especificaciones del aceite actual, revisar la severidad del sistema y especificar el aceite que debe utilizarse en los turbogeneradores de la unidad.

Ejecutada 100%: *Se realizó revisión y se especificó nuevo aceite mineral TIPO II según ASTM. El aceite seleccionado fue el ISO 32 MOBIL DTE 832 con aditivos de media presión que lograron incrementar, por el momento, los TMEF de coronas desde 25 días (1mes) hasta 95 días (3meses).*

Causa 2.2: Contaminación Con Agua- Escape de Vapor por Sellos

Solución: Programar el cambio de sellos de vapor de la turbina principal Incluir dentro del alcance del Overhaul del Turbogenerador.

En planeación: *Actividad sugerida por PTB y confirmada por los especialistas, requiere destapar la turbina. Esta es la razón por la que el Turbogenerador requiere máquina termojet 24 horas continuas. El trabajo se incluyó en las especificaciones técnicas para el mantenimiento del turbogenerador entregadas en junio del 2007, mientras que los otros dos turbogeneradores ya tuvieron esta mejora.*

Causa 2.3: Contaminación con Agua- Retiro Deficiente de Agua

Solución: Establecer Mantenimiento Preventivo para el aceite de lubricación que incluya las ventanas operativas, operaciones debe asegurar la ejecución de las recomendaciones y mejorar el cuidado básico de los equipos (drenaje).

Ejecutada 100%: *PTB emitió instructivo en Julio de 2007, que incluye los mantenimientos, análisis y ventanas operativas que aplican para el aceite de los Turbogeneradores.*

La coordinación del área de servicios industriales viene aplicando desde entonces las recomendaciones del documento, lo cual ha contribuido a aumentar el TMEF de las coronas y a su vez preservar la integridad del aceite.

Causa 2.4: Contaminación con Agua- Enfriador roto o con fugas

Solución: Programar inspección y reparación de enfriadores de aceite, realizando pruebas hidrostáticas que garanticen la eliminación de fugas de agua de enfriamiento.

Ejecutada 100%: *Entre Julio y agosto de 2006 se ejecutaron estas actividades que permitieron disminuir la contaminación de agua de enfriamiento. El Turbogenerador no pudo evidenciar la mejora por cuanto la contaminación de vapor seguía emulsionando el aceite.*

La contaminación excesiva de agua, por sí sola, reduce la vida de la corona hasta un tiempo que varía de 15 a 30 días, dependiendo del grado de contaminación.

Causa 2.5: Contaminación con Partículas Sólidas – (MPMNE)

Solución: Establecer procedimiento de limpieza y flushing para diferentes estados operativos: Paradas de planta, reparaciones parciales y paradas no programadas.

Ejecutada 100%: *Incluidas dentro del instructivo en Julio de 2007.*

La coordinación del área de servicios industriales viene aplicándolo rigurosamente desde entonces.

Causa 2.6: Bajo Flujo de Aceite – Filtros Inadecuados

Solución: Revisar Especificaciones de los Filtros de Lubricación, comprarlos y reemplazarlos realizando la actualización en el sistema.

Ejecutada 100%: *Esta fue la primera evidencia encontrada ya que los filtros colapsaban en una semana de operación. Se revisaron las especificaciones y se*

encontró que se venía trabajando con un filtro de fabricación nacional que no cumplía las especificaciones del fabricante sobre el sistema de lubricación. En agosto de 2006 se pudieron obtener los filtros originales cuyas especificaciones son: Filtro Parker FP 718 – 10 micrones.

Causa 2.7: Bajo Flujo de Aceite – Chorro de Aceite Desviado

Solución: Incluir dentro del procedimiento de montaje la verificación del baño de aceite en la transmisión una vez finalizado el montaje.

***Ejecutada 100%:** Esta actividad fue incluida en el procedimiento después de marzo de 2007 cuando, bajo la supervisión de un técnico especialista de fábrica, se desgastó la corona en 24 Horas (se había utilizado coronas de diferentes dimensiones).*

CAUSA 3: PÉRDIDA DE BACK LASH EN OPERACIÓN

Esta causa básica presenta varias causas raíz que han sido relacionadas anteriormente como lo es el esfuerzo generado por tuberías de vapor y el deterioro del grouting. A continuación, se señalan las causas y soluciones relacionadas en este ítem y que no han sido discutidas hasta ahora en este documento.

Causa 3.1: Solturas Mecánicas (MPRIM)

Solución: Revisión de la soportaría de las tuberías de las bombas principales de lubricación e incluir las verificaciones en el procedimiento de montaje de las coronas.

***Ejecutada 100%:** Ejecutada en marzo de 2007, se encontraron las líneas de la bomba principal de lubricación sin una adecuada suportación en todos los tres turbogeneradores.*

Se realizó recomendación por parte de PTB, se ajustaron los soportes existentes y se crearon nuevos. Esta mejora no tuvo incidencia significativa para aumentar la vida de las coronas.

CAUSA 4: PROCESO INADECUADO DE MANUFACTURA

Causa 4.1: Cambios del Material de la Corona

Solución1: Enviar Muestras al laboratorio para verificar las propiedades físico mecánicas de las coronas “New Design” con respecto a las de las coronas “Old Design”.

***Ejecutada 100%:** En marzo de 2006, cuando recién se manifestó el problema de las coronas, la empresa evidenció que los nuevos repuestos de coronas eran*

dimensionalmente diferentes y que el material de fabricación era más blando que el diseño original llamado “Old Design”.

PTB realizó identificación de metales encontrándolos diferentes, razón por la cual se enviaron al laboratorio (agosto de 2006) muestras de los dos diseños “Old Design” (para designar el diseño original de la máquina) y “New Design” (para significar el diseño de los repuestos obtenidos después de 2006). De acuerdo con el reporte del laboratorio (diciembre de 2006), las propiedades “Old Design” se encontraron de mejores características mecánicas que las “New Design”; esto generó un reclamo formal a fábrica para entregar a la empresa repuestos bajo fabricación “Old Design”.

Solución2: Solicitar a casa matriz la fabricación de nuevos repuestos con las especificaciones “Old Design”.

Ejecutada 100%: *En reunión realizada en diciembre de 2006, la casa matriz acordó entregar a la empresa Coronas “Old Design” sin costo alguna de fabricación o montaje. La dificultad de fabricar coronas “Old Design” por restricciones de adquisición de material y proveedores, fue el argumento de la fábrica para desarrollar un nuevo diseño (“New Design”) con materiales más fáciles de conseguir en el mercado.*

En marzo de 2007 se instalaron las dos coronas del material original (verificado por laboratorio) sin que se obtuvieran mejoras significativas en la vida de las coronas; razón por la que se descartó el material de las coronas como causa raíz.

Causa 4.2: Control de Calidad deficiente

Solución: Realizar control de calidad dimensional de cada repuesto antes de instalarlo.

Ejecutada 100%: *Al menos en tres ocasiones, una durante el año 2006 y dos durante el año 2007, se encontró que la falla prematura de las coronas se debió a defectos de fabricación o empaqueo de los sets de corona:*

- *Corona y sin fin forman un set único, algunas veces pueden venir empacados sets diferentes. Este evento se presentó en julio de 2007 en el Turbogenerador, la corona fallada y el sin fin venían estampados como set #16 y #15 respectivamente (deben ser iguales).*
- *En algunas ocasiones los espesores de la corona no fueron los de diseño, lo cual hace variar el procedimiento de montaje para encontrar los centros. Esto sucede porque existen dos diseños de corona, una delgada y asimétrica (“old design”) y otra gruesa y simétrica (“New Design”), la empresa logró que fábrica definiera números de parte diferentes y hoy día se compran todas*

“New Design” ya que son menos costosas, los tiempos de entrega son más cortos y el cambio de diseño fue descartado como causa raíz.

- *En otras ocasiones el estampado de la corona se encontró del lado equivocado (en coronas asimétricas “old design”), lo cual hizo centrar equivocadamente la corona y llevó a su falla prematura. Esto ocurrió en marzo de 2007, durante el montaje que uno de los técnicos especialistas realizó de las coronas “Old Design” que la misma fábrica entregó sin costo a la empresa.*

La verificación dimensional se convirtió en un paso estandarizado del montaje de las coronas y las coronas que no lo cumplan no deben ser instaladas. Estos problemas no han vuelto a presentarse desde junio de 2007

Anexo 2

Avisos y2 creados para fallas del turbogenerador.

Cl.	Aviso	Orden	Fecha de aviso	Ubicación técnica	Descripción	Campo de clasificación	Denominación de la ubicación técnica	Equipo	GP
Y	200124715	20326265	09.03.2019	RFB-2950-SGEN-IELE-SG2951	MANTTO CAMBIO DE CORONA-SIN FIN SG2951	MTUV00000487	Tg2951 20 Mw	10136416	SIB
Y2	200092490	20215658	14.06.2018		Mantto cambio de corona-sin fin SG2951	MTUV00000487	Tg2951 20 Mw	10136416	SIB
Y2	200135778	20392878	30.05.2019		CAMBIO CORONA SG2951 2020 (2)	MTUV00000487	Tg2951 20 Mw	10136416	SIB
Y2	200135800	20393380	30.05.2019		CAMBIO CORONA SG2951 2020 (3)	MTUV00000487	Tg2951 20 Mw	10136416	SIB
Y2	200135775	20392879	30.05.2019		CAMBIO CORONA SG2951 2020 (1)	MTUV00000487	Tg2951 20 Mw	10136416	SIB
Y2	200153676	20429440	16.10.2019		Corregir escape de vapor por prensaempaq	MTUV00000487	Tg2951 20 Mw	10136416	SIB
Y2	200154291	20431985	22.10.2019		Reparar aislamiento térmico	MTUV00000487	Tg2951 20 Mw	10136416	SIB
Y2	200063747	20129956	09.10.2017		Transportar rotor de repuesto del SG2951	MTUV00000487	Tg2951 20 Mw	10136416	SIB
Y1	100848238	10789902	27.02.2020		Reengrase tren de valvula	MTUV00000487	Tg2951 20 Mw	10136416	SIB

Anexo 3

Formato de firma de asistencia de reuniones

Tema o Nombre del Evento:									
Revisión de seguimiento a RCA (Análisis de Causa Raíz) del SG2951 y realización de avances del proyecto para el diseño de un sistema integrado de lubricación para eliminar la falla de la bomba incorporada del Turbogenerador, con el propósito de confiabilidad del área de Servicio Industriales Balance.									
Responsable del Evento:			Área:			Empresa:			
LUIS ALEXANDER ROJAS GARAVITO			MANTENIMIENTO PROACTIVO						
Ubicación Evento:			Piso/Oficina:						
Edificio /Lugar:			REUNION VIRTUAL POR TEAMS						
Hora - Ciudad - Fecha:		Hora Inicio:		Hora Fin:		Ciudad:		Fecha: dd/mm/aaaa:	
		4:00 pm		5:30 pm		Barrancabermeja		27/07/2020	
Tipo de Evento:									
(Marque X)									
Charla		Inducción		Curso		Taller		Reunión	
								X	
Operación		Sistemática		Otro					
Nombre del Asistente			Registro / Cédula		Área / Empresa		Teléfono o Correo Electrónico		Firma/ Iniciales
SERGIO ANOES JAIMES PINEDA			E0283571		Ing. Confiabilidad Servicios Balance		sergioanoes@csceatrol.com.co		
KAROL JOHANA SUAREZ VASCO			1096236423		Ex-estudiante Ing. Electromecánica		karolsuarez_35@hotmail.com		
LUIS ALFREDO GARCIA RODRIGUEZ			13748487		Estudiante Ing. Electromecánica		luisalfredogarcia@hotmail.com		
LUIS ALEXANDER ROJAS GARAVITO			13514410		Estudiante Ing. Electromecánica		luis.rojas42@csceatrol.com.co		

