

**ESTUDIO Y DISEÑO DE UN PROGRAMA MCC (MANTENIMIENTO CENTRADO
EN CONFIABILIDAD) PARA EL SISTEMA DE AIRE DE INSTRUMENTACIÓN
DE UNA CENTRAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA CON MOTORES DE
COMBUSTIÓN A GAS NATURAL.**

NILSON FERNANDO BATANELO GARCÍA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2017

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN PROGRAMA MCC (MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD) PARA EL SISTEMA DE AIRE DE INSTRUMENTACIÓN DE UNA CENTRAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA CON MOTORES DE COMBUSTIÓN A GAS NATURAL.

NILSON FERNANDO BATANELO GARCÍA

Monografía de Grado, presentada como requisito para optar el título de Especialista en gerencia de mantenimiento

Director:

**Daniel Ortiz Plata
Ingeniero Mecánico**

Co – Director:

**Gonzalo Arturo Barbosa
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios, mi padre celestial, por permitirme estudiar la especialización
Y llevar a cabo esta monografía, en una importante empresa.

A mis padres Hernán y Gilma, por la vida y su apoyo incondicional.

A mi esposa Kelly y a mis hijos Juan y Karol porque son el motor de mi vida.

Nilson Batanelo

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que de una u otra forma me colaboraron en el desarrollo y presentación del presente trabajo.

Al señor Director y el Co-director, por sus enseñanzas y colaboración.

A mis amigos y familiares, por comprender mis ausencias y dar apoyo en el tiempo de la especialización.

A mis compañeros, profesores y colaboradores de la ASEDUIS y a todos mis compañeros de trabajo, por su ayuda en alcanzar esta meta personal.

Contenido	Pág.
INTRODUCCION	- 13 -
1. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	- 14 -
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	- 14 -
1.2 OBJETIVOS	- 15 -
1.2.1 Objetivo general	- 15 -
1.2.2 Objetivos Específicos	- 15 -
1.3 MARCO TEORICO	- 16 -
1.3.1 Mantenimiento centrado en confiabilidad – MCC.....	- 16 -
1.3.2 Redes de aire comprimido para instrumentación.....	- 17 -
1.4 MARCO CONCEPTUAL	- 18 -
1.4.1 Requerimientos del aire de instrumentación.....	- 18 -
1.4.2 Descripción del sistema de aire de instrumentación.....	- 20 -
1.4.3 Matriz DOFA del mantenimiento al sistema de aire de instrumentación.	- 22 -
2. DESARROLLO METODOLOGICO	- 24 -
2.1 SOLUCION DEL PROBLEMA (CASO DE ESTUDIO)	- 24 -
2.1.1 Selección del sistema de estudio y recopilación de información	- 24 -
2.1.2 Definición de las fronteras del estudio.	- 28 -
2.1.3 Descripción del sistema y sus componentes.	- 29 -
2.1.4 Funciones del sistema y fallas funcionales.	- 30 -
2.1.5 Análisis de modos de falla y sus efectos.	- 31 -
2.1.6 Análisis del árbol de decisión lógico.	- 33 -
2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESTUDIO	- 38 -
3.CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.
BIBLIOGRAFÍA	- 43 -
ANEXOS	- 45 -

Lista de Figuras

Figura 1. Típico sistema de aire para proceso industrial.....	- 18 -
Figura 2. Típica planta de generación con motores a gas natural.	- 20 -
Figura 3. Compresor + Secador de instrumentos marca Kaishan.	- 21 -
Figura 4. Taxonomía de los equipos de instrumentación.....	- 24 -
Figura 5. Red de suministro de aire de instrumentos.....	- 26 -
Figura 6. Esquema del compresor de aire de instrumentos.....	- 28 -
Figura 7. Diagrama de decisión.	- 33 -
Figura 8. Distribución de tareas por especialidad	- 38 -
Figura 9. Costo del riesgo de repuestos con mayor consumo.	- 39 -
Figura 10. Ventilación adecuada de sala de compresores.	- 40 -
Figura 11. Costo de repuestos con baja tasa de fallos.	- 41 -

Lista de tablas

Tabla 1. Requerimientos del aire de instrumentación.....	- 19 -
Tabla 2. Objetivos Estratégicos según Matriz DOFA.....	- 23 -
Tabla 3. Equipos del sistema de aire comprimido.....	- 25 -
Tabla 4. Valoración de consecuencias de fallos de equipos.....	- 26 -
Tabla 5. Escala de criticidad de equipos.....	- 27 -
Tabla 6. Evaluación de criticidad de equipos del sistema instrumentación.....	- 27 -
Tabla 7. Interfases de entrada y salida del compresor	- 28 -
Tabla 8. Elementos internos del compresor y sus funciones.	- 29 -
Tabla 9. Función principal y funciones secundarias del sistema.....	- 30 -
Tabla 10. Fallas funcionales del sistema	- 30 -
Tabla 11. Modos de falla que causan falla total.	- 31 -
Tabla 12. Modos de falla que causan falla parcial / Func. Erróneo.....	- 31 -
Tabla 13. Modos de falla de las funciones secundarias.....	- 32 -
Tabla 14. Escala de riesgos de los modos de fallo.	- 32 -
Tabla 15. Tareas de mantenimiento, según horas de funcionamiento.....	- 34 -

Anexos

Anexo A. Costos de modo de fallos - efectos.	- 45 -
Anexo B. Estimación riesgo de modos de fallo.	- 49 -

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO Y DISEÑO DE UN PROGRAMA MCC (MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD) PARA EL SISTEMA DE AIRE DE INSTRUMENTACIÓN DE UNA CENTRAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA CON MOTORES DE COMBUSTIÓN A GAS NATURAL.

AUTOR: Nilson Fernando Batanelo García.

PALABRAS CLAVES: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, RCM, Central de Generación a gas natural, Aire de instrumentación, Compresor de tornillo.

DESCRIPCIÓN:

En el desarrollo del presente trabajo de Monografía se aplican los conocimientos adquiridos en la especialización de gerencia de mantenimiento, relativos al análisis DOFA para la gestión actual del mantenimiento; la evaluación de criticidad de los equipos y el desarrollo de la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad - MCC según la norma SAE JA1011:1999 para los equipos críticos del sistema de aire de instrumentación de una central de generación de energía con motores de combustión a gas natural.

Las etapas que comprende el presente estudio son la fase de recolección de información, análisis de la situación actual de los equipos y el desarrollo de las siete preguntas que plantea la metodología RCM, para definir un programa de mantenimiento para evitar los modos de fallo predominantes en los equipos críticos del sistema de suministro de aire de instrumentación y así garantizar la confiabilidad y disponibilidad del servicio de aire comprimido; cumpliendo con las condiciones requeridas del proceso.

En la aplicación de la metodología se identificaron las funciones globales del equipo y las funciones específicas de cada uno de los subsistemas analizados, con lo cual se facilitó encontrar los modos de fallo, sus consecuencias y finalmente con el árbol de decisión lógica se definió que tipo de tarea es la más adecuada para evitar que dicho fallo ocurra y si ocurre que tenga un riesgo admisible o tolerable para la empresa.

¹ Monografía de Grado

² Facultad de Ingeniería Físico – Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.
Director: Daniel Ortiz Plata-Ingeniero Mecánico

ABSTRACT

TITLE: STUDY AND DESIGN OF A RCM (RELIABILITY CENTRED MAINTENANCE) PROGRAM FOR THE INSTRUMENTATION AIR SYSTEM OF A POWER PLANT OPERATED WITH NATURAL GAS COMBUSTION ENGINES.

AUTHOR: Nilson Fernando Batanelo García.

KEYWORDS: Reliability Centered Maintenance, RCM, Natural Gas Generation Plant, Instrumentation Air, Screw Compressor.

DESCRIPTION:

In the development of this work of Monograph, It is applied the knowledge acquired in the specialization of maintenance management, relative to the DOFA analysis for the current maintenance management; the critical equipment evaluation and the development of the Reliability Centered Maintenance (RCM) methodology according to SAE JA1011: 1999 for the critical equipment of the instrumentation air system of a power plant generation operated with natural gas combustion engines.

The stages included in this study are the data collection phase, analysis of the current situation of the equipment and development of the seven questions that the RCM methodology proposes, to define a maintenance program to avoid the predominant failure modes in the critical equipment of the air supply system of instrumentation and thus guarantee the reliability and availability of the service of compressed air; fulfilling the required conditions of the process.

In the application of the methodology, the global functions of the equipment and the specific functions of each of the subsystems analyzed were identified, which facilitated finding the failure modes, their consequences and finally with the logical decision tree, it was defined which type of the maintenance task is the most appropriate to avoid that such failure occurs and if it occurs that has a permissible or tolerable risk for the company.

1 Monografía de Grado

2 Facultad de Ingeniería Físico – Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.

Director: Daniel Ortiz Plata, Ingeniero Mecánico

INTRODUCCION

En el panorama industrial actual la demanda de energía representa un importante porcentaje en la estructura de costos de producción; de igual forma en términos de lucro cesante el paro inesperado de todo un proceso productivo acarrea altos costos inesperados, por ello algunas instalaciones que trabajan 24/7, tienen su propia planta de generación, la cual brinda estabilidad y confiabilidad en el suministro de la energía eléctrica requerida.

La central termoeléctrica objeto del presente estudio genera la energía para el consumo propio de una industria cementera y tiene una capacidad instalada de generación de 25 MWh mediante cinco motores de combustión interna a gas natural (ciclo Otto); debe garantizar un factor de confiabilidad mayor al 98% en los equipos de generación de electricidad y en lo corrido del 2017 ha cumplido con una confiabilidad del 99%.

En dicha planta de generación, el sistema de aire de instrumentación resulta esencial para el correcto desempeño de los equipos neumáticos que controlan el proceso de combustión de los motores, como son válvulas neumáticas, transductores de señal - I/P converters y actuadores, de tal forma que, si no cumplen adecuadamente su función, llegarán a ocasionar paradas de los equipos de generación, representando además del costo de la reparación, el costo del lucro cesante por no generación y una afectación la confiabilidad de la planta.

Con el desarrollo del presente trabajo, se busca definir un programa de mantenimiento para las causas de fallas predominantes en los equipos críticos del sistema de suministro de aire de instrumentación; para garantizar la confiabilidad y disponibilidad del servicio de aire comprimido cumpliendo con las condiciones requeridas del proceso.

1. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se plantea para la empresa la necesidad de evaluar el actual mantenimiento preventivo ejecutado a los equipos de esta red de suministro y evaluar la condición del sistema para garantizar la confiabilidad requerida en los equipos como el compresor, el secador y los sistemas de filtrado; teniendo en cuenta que para el correcto desempeño de la instrumentación según los fabricantes y la aplicación específica se deben garantizar los aspectos de la norma ISO 8573-1: 2010; clase 2.5.3 en los ítems de partículas sólidas, agua y aceite contenido en el aire.¹

El presente proyecto busca diseñar un programa de mantenimiento centrado en confiabilidad – MCC –, según la norma SAE JA1011:1999, para los equipos críticos del sistema de suministro de aire de instrumentación mediante el análisis inductivo de las fallas potenciales y la aplicación de diagramas de decisión lógica, (RCM – Reliability Centered Maintenance, Logic)² para definir la categoría de mantenimiento aplicable (predictivo, cambio sistémico, esperar a falla, etc.)

Con el establecimiento del programa de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad se busca evitar las paradas de los equipos de generación, por fallos asociados a pérdida del suministro o deficiencias en la calidad del aire de instrumentación, para continuar garantizando al cliente un factor de confiabilidad mayor al 98% en los equipos de generación de electricidad, lo cual contribuirá a reducir los costos directos en reparación de equipo y el costo del lucro cesante por no generación.

¹ **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.** References and citation to information resources, Number ISO 8573-1, Item 5, p. 9.

² SELVIK J. T, T. AVEN, **Reliability Engineering and System Safety**, University of Stavanger, Norway.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general. Diseñar y planear la implementación de un programa de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad – MCC según la norma SAE JA1011:1999 para los equipos críticos del sistema de aire de instrumentación de una central de generación de energía con motores de combustión a gas natural.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar las funciones y evaluar la condición y la criticidad de los equipos³ del sistema de aire de instrumentación de la central de generación de energía: (compresor, secador, filtros, válvulas, tanque pulmón, red de distribución y consumidores).
- Desarrollar la metodología MCC según la norma SAE JA1011:1999 para los equipos críticos del sistema de suministro de aire de instrumentación de la central de generación de energía.
- Definir el programa de mantenimiento para las causas de fallas predominantes en los equipos críticos del sistema de suministro de aire de instrumentación según la aplicación de diagramas de decisión lógica.

³ **INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.** References and citation to information resources, ISO 14224:2006 – Item 3.13.p. 4.

1.3 MARCO TEORICO

En el desarrollo del presente estudio se utilizara la metodología definida por el modelo de las siete preguntas del mantenimiento centrado en confiabilidad según la norma SAE JA1011:1999 con el fin de establecer la mejor estrategia de mantenimiento que permita mantener una confiabilidad superior al 98% en las redes de aire comprimido, para lo cual es esencial conocer los principios de funcionamiento de los equipos del sistema y definir la de calidad del aire requerida en el sistema neumático de la planta.

Así que, se estudiarán los siguientes aspectos como principios básicos para iniciar el análisis y luego definir las funciones, los modos de fallo y las medidas preventivas y paliativas para que los modos de fallo no se materialicen o, si lo hacen, sea con la menor consecuencia posible.

1.3.1 Mantenimiento centrado en confiabilidad – MCC. El mantenimiento centrado en Confiabilidad (MCC) o Reliability Centered Maintenance (RCM), ha sido desarrollado para la industria de la aviación civil hace más de 30 años. El proceso permite determinar cuáles son las tareas de mantenimiento adecuadas para cualquier activo físico.

La norma SAE JA1011:1999 especifica los requerimientos que debe cumplir un proceso para poder ser denominado un proceso MCC. Según la norma las siete preguntas del proceso son: ⁴

I. ¿Cuáles son las funciones y estándares de ejecución asociados con el activo, en su actual contexto operacional?

⁴ **SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS.** Evaluation Criteria for Reliability-centered Maintenance (RCM) Processes, Society of Automotive Engineering. **SAE JA1011.** 1999. January Item 5, p. 6.

- II. ¿En qué forma falla el equipo, con respecto a la función que cumple en el contexto operacional? (Análisis de las fallas funcionales)
- III. ¿Qué causa la falla funcional? (Análisis de los modos de falla)
- IV. ¿Qué sucede cuando falla? (Análisis de efectos)
- V. ¿Qué ocurre (consecuencias) si falla? (Valoración de riesgos de cada falla).
- VI. ¿Qué puede hacerse para evitar la falla?
- VII. ¿Qué puede hacerse si no se conoce una tarea para evitar la falla?

Entre los beneficios de la implementación del MCC se tiene que debe llevar a equipos más seguros y confiables, reducciones de costos (directos e indirectos) porque se van a realizar menos correctivos y algunas tareas del mantenimiento periódico pasaran a ser tareas por condición, mejora en la calidad del producto y mayor cumplimiento de las normas de seguridad y medio ambiente.

El MCC también está asociado a beneficios humanos, como mejora en la relación entre distintas áreas de la empresa, fundamentalmente un mejor entendimiento entre mantenimiento y operaciones.

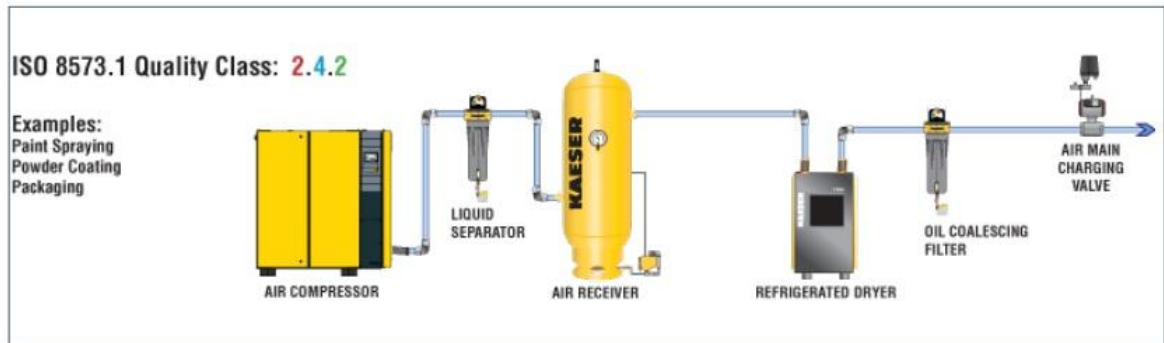
1.3.2 Redes de aire comprimido para instrumentación. El aire comprimido es una de las formas de energía más antiguas que conoce el hombre y en la actualidad ya no se concibe una moderna explotación industrial sin el aire comprimido. En los ramos industriales más variados se utilizan hoy en día aparatos neumáticos que requieren una alimentación continua y adecuada de aire para garantizar el exitoso y eficiente desempeño de los procesos involucrados en la producción.⁵

Dentro del sistema de redes de aire comprimido normalmente se resaltan los siguientes componentes básicos en el sistema de suministro: Compresor de aire,

⁵ **HINCAPIE, Esteban.** Redes de aire comprimido, Universidad nacional de Colombia, sede Medellín. (2003)

micro filtro con separador de líquidos, tanque pulmón, secador frigorífico, filtro coalescente para remover aceite y válvula de control de la descarga.

Figura 1. Típico sistema de aire para proceso industrial.



Fuente: Kaeser Compressors⁶

1.4 MARCO CONCEPTUAL

Para ubicar el contexto del proyecto se van a definir los requisitos de calidad del aire de instrumentación y se presentará la situación actual del mantenimiento al sistema de aire de instrumentación de la central de generación de energía, bajo el concepto de matriz DOFA. (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas).

1.4.1 Requerimientos del aire de instrumentación. La calidad del aire de instrumentos recomendada para los consumidores según la solicitud de la norma ISO 8573-1: 2010; clase 2.5.3 en los ítems de partículas sólidas, agua y aceite contenido en el aire. Lo cual exige un correcto funcionamiento del compresor para no dejar pasar aceite y de las purgas para sacar a tiempo los condensados de la tubería.

⁶ **KAESER COMPRESSORS.** Guía de instalación de sistemas de aire comprimido, 2015. p. 41.

Tabla 1. Requerimientos del aire de instrumentación.

The air quality before consumers has to comply with contaminants and purity class **2.5.3** as according to ISO 8573-1:2010. The requirements are the following:

- Solid particles: class 2
- Dew point: +7 °C
- Oil content: 1 mg/m³

Table 1, Instrument air requirements

ISO 8573-1:2010	Solid particles			Water		Oil	
	Maximum number of particles per m ³			Mass concentration	Vapour pressure dew point	Liquid	Total oil content (liquid, aerosol and mist)
	0.1-0.5 µm	0.5-1.0 µm	1-5 µm	mg/m ³	°C	g/m ³	mg/m ³
0	As stipulated by the equipment user, stricter requirements than class 1						
1	≤ 20 000	≤ 400	≤ 10	-	≤ -70	-	0.01
2	≤ 400 000	≤ 6 000	≤ 100	-	≤ -40	-	0.1
3	-	≤ 90 000	≤ 1000	-	≤ -20	-	1
4	-	-	≤ 10 000	-	≤ +3	-	5
5	-	-	≤ 100 000	-	≤ +7	-	-
6	-	-	-	≤ 5	≤ +10	-	-
7	-	-	-	5-10	-	≤ 0.5	-

Fuente: Power plant Instructions. ⁷

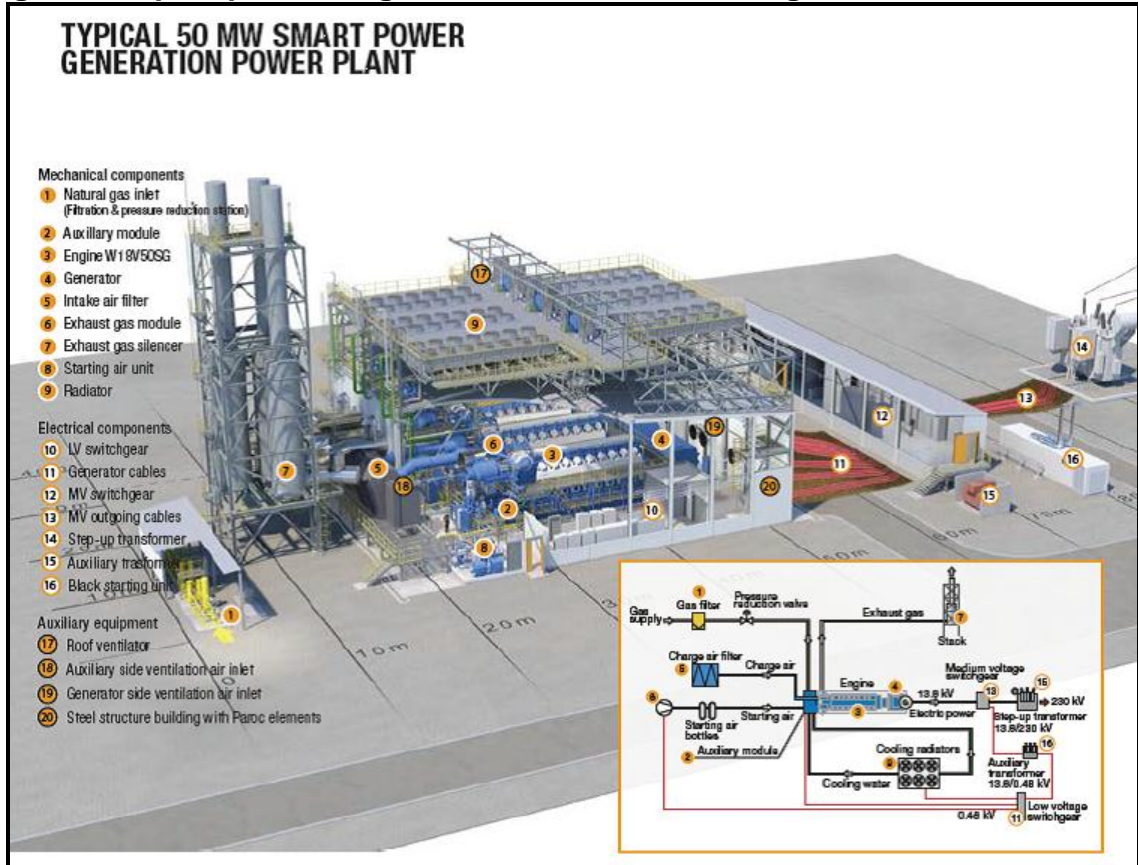
Igualmente, para evitar pérdidas de calidad durante mantenimientos o fallas en la unidad compresora, es buena práctica tener un compresor de reserva, (Back up operation). Para no recurrir a otra fuente de aire, por ejemplo, compresores de tipo pistón que tienen mayor pasó de aceite hacia el sistema. Los requisitos de la filtración y circulación del aire dentro del cuarto de compresores, se deben garantizar para evitar incrementar la temperatura en el interior del cuarto y evitar material particulado que desgaste los elementos móviles del compresor.

⁷

POWER PLANT INSTRUCTIONS FOR OPERATORS AND OWNERS. Instrument air system maintenance. p. 2. May, 2016

1.4.2 Descripción del sistema de aire de instrumentación. Para ubicar el contexto, el equipo central de la planta, es el motor de combustión a gas natural acoplado a un generador eléctrico, fabricado en Europa, en la foto se representa de color azul y está ubicado en el centro del hangar principal.

Figura 2. Típica planta de generación con motores a gas natural.



Fuente: Power plant solutions.⁸

Los demás equipos son auxiliares o equipos comunes que facilitan el correcto funcionamiento de los generadores. Como se tienen 5 generadores en línea, una eventual parada de alguno, no resulta crítico, ya que los otros 4 asumen la carga; pero los equipos comunes, si resultan críticos para todos los generadores.

⁸ **POWER PLANT SOLUTIONS.** Smart Power plant generation for Owners. 2016. p.8.

El sistema de control neumático y, específicamente el compresor que genera el aire de control, es de vital importancia para toda la instalación. Por esta razón la central de generación de energía en estudio, la cual está en funcionamiento desde el año 1997, adquirió un nuevo compresor + secador + filtro separador de líquidos de la marca KAISHAN, en marzo del año 2017.

Figura 3. Compresor + Secador de instrumentos marca Kaishan.



Dicha unidad está realizando actualmente el suministro de aire de instrumentación para la central de generación y la unidad anterior de la marca TAMROTOR, que venía funcionando, se encuentra fuera de línea por reparación total, para ser utilizada más adelante como equipo de respaldo.

La central de generación maneja una planeación de mantenimiento centralizado y para ello cuenta con un software para la administración del mantenimiento: MÁXIMO de la cadena IBM, que es administrado desde una ciudad capital y en el

cual se generan las órdenes de trabajo de forma periódica, para ser ejecutadas en campo por los ingenieros y técnicos de mantenimiento.

1.4.3 Matriz DOFA del mantenimiento al sistema de aire de instrumentación.

ANALISIS INTERNO

Fortalezas

F1 - Empresa que pertenece a una corporación global

F2 - Empresa certificada en calidad por DNV

F3 - Personal calificado y bien remunerado

F4 - Adquisición de equipo nuevo para suministro de aire de instrumentos

Debilidades

D1 - Mitad del personal nuevo en la empresa, en fase de entrenamiento

D2 - Software de mantenimiento, en fase de maduración

D3 - Algunos equipos en etapa cercana al final de ciclo de vida

D4 - Filtración del aire dentro del cuarto de compresores

ANALISIS EXTERNO

Oportunidades

O1 - Suministro local de repuestos para equipo nuevo de red de aire comprimido

O2 - Renovación de contrato de operación y mantenimiento con el cliente

O3 - Soporte externo desde casa matriz para solución de problemas

Amenazas

A1 - Contaminación por material particulado de fábrica de cemento

A2 - Imagen ante el cliente por paro de equipos

A3 - Competencia con empresas del sector operación y mantenimiento.

Como se observan existen aspectos internos favorables como es la estructura corporativa de la empresa, pero con debilidades como personal en formación y que la planta está en proceso de renovación de equipos, (bien mantenidos) con más de 10 años de funcionamiento. Así, con base en las condiciones externas de

costos de repuestos en mercado local y la necesidad de mantener la imagen positiva de confiabilidad ante el cliente se plantean los siguientes cuatro objetivos:

Tabla 2. Objetivos Estratégicos según Matriz DOFA

MATRIZ DOFA	Oportunidades	Amenazas
		O1,O2,O3
Fortalezas	Objetivo FO:	Objetivo FA:
F1,F2,F3,F4	Involucrar al personal operativo calificado en el modelo de mantenimiento.	Diseñar un modelo de mantenimiento que sostenga la imagen positiva ante el cliente.
Debilidades	Objetivo DO:	Objetivo DA:
D1,D2,D3,D4	Compra de repuestos en el mercado local como ventaja.	Establecer tareas que favorezcan la confiabilidad de equipos.

Objetivo FO: Se debe involucrar al personal experto en el modelo de mantenimiento seleccionado, capacitándolo en las tareas predictivas o de inspección que puedan surgir como resultado del presente estudio.

Objetivo FA: El modelo de mantenimiento seleccionado debe mantener la confiabilidad de la planta con los indicadores actuales, para lograr la renovación del contrato de operación y mantenimiento con el cliente.

Objetivo DO: Se debe aprovechar que se tiene suministro nacional para los repuestos del nuevo compresor Kaishan y realizar solo las compras necesarias, sin tener alto stock en bodega de planta.

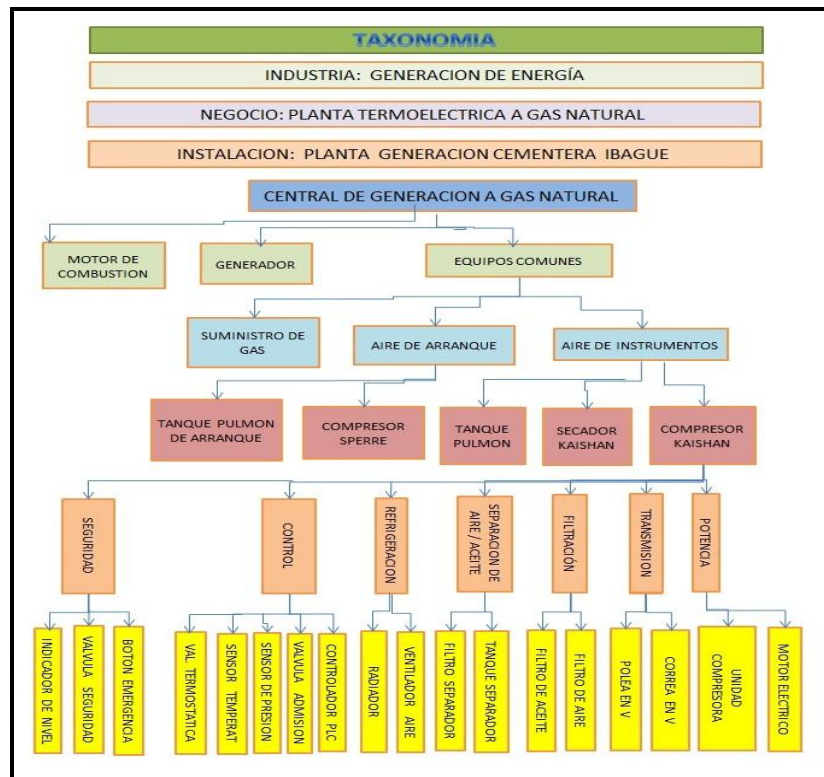
Objetivo DA: Se deben aumentar las tareas de inspección por personal operativo para detección temprana de condiciones anormales, tanto ambientales como del equipo propiamente.

2. DESARROLLO METODOLOGICO

2.1 SOLUCION DEL PROBLEMA (CASO DE ESTUDIO)

2.1.1 Selección del sistema de estudio y recopilación de información. El sistema seleccionado resulta el punto de partida para la aplicación de la metodología MCC, Mantenimiento centrado en confiabilidad. En la sección 1.4.2 se describió la importancia del sistema de aire de instrumentación, el cual presenta la siguiente taxonomía para la planta de generación.

Figura 4. Taxonomía de los equipos de instrumentación.



El sistema de aire comprimido está definido por los siguientes equipos, los cuales tienen diferente año de fabricación y cumplen una función específica en la red, bajo unas condiciones operacionales específicas:

Tabla 3. Equipos del sistema de aire comprimido

EQUIPO	MARCA	REFERENCIA	FECHA FABRICACIÓN	FUNCION	CONDICIONES OPERACIONALES
COMPRESOR	KAISHAN	KRSE10-115	01/12/2015	Mantener el tanque de aire lleno con el volumen de aire requerido para los consumidores	10 hp, 115 psi - 7,8 bar, 42,38 CFM
SECADOR	KAISHAN	KRD-40	01/12/2015	Mejorar la calidad del aire comprimido, reduciendo el punto de rocío del aire comprimido	R134a , 101-232 psi,42 CFM, Temp entrada menor 60°C, Temp punto rocío 2 a 10°C
FILTRO DE CONDENSADOS	KAISHAN	KLF - 60 - KA	01/12/2015	Remover la suciedad, aceite y condensados de agua generados en la red de aire comprimido	Oil and Water Filter (Coalescer): 0.01 µ de Partículas solidas, 0.01mg/m3 de Contenido de aceite remanente a 21°C, Presión Max 16 bar.
VALVULAS	YOUKA	20 mm	01/10/1997	Realizar el corte del flujo de aire en la red de suministro.	Presion de trabajo - 6 a 10 bar.
TANQUE PULMON	Wartsila	WD-TR-020	09/11/1995	Reservorio de almacenamiento que da soporte y estabilidad al despacho de aire comprimido hacia los consumidores	Presion de trabajo max. 10 bar, Acero Galvanizado, 200 litros
RED DE DISTRIBUCION	Wartsila	WD-TR-021	01/10/1997	Dirigir el suministro de aire hacia los consumidores, con la menor caída de presión posible.	Tuberia de Acero Galvanizado de 20 mm con uniones roscadas
CONSUMIDOR - TRANSDUCTOR CORRIENTE /PRESIÓN	FAIRSHIELD	T - 6000	01/10/2013	Realizar los controles proporcionales para los actuadores neumaticos de la planta de generación.	Entrada: 1,5 a 8,0 bar. Salida: 0,2 a 1,0 bar

Las funciones de los equipos del sistema de aire de instrumentación de la central de generación de energía: (compresor, secador, filtros, válvulas, tanque pulmón, red de distribución y consumidores), se evaluará siguiendo la metodología de criticidad cualitativa. Es de anotar que en la planta de generación se está realizando un mantenimiento preventivo a los equipos a continuación evaluados y que el registro de fallos históricos está asociado como causa raíz de problemas subsecuentes de las unidades de generación y de la parada de toda planta.

A continuación, se presenta el aspecto de la red de aire de instrumentos, tubería, válvulas, filtro y tanque pulmón:

Figura 5. Red de suministro de aire de instrumentos.



Para continuar con la definición del equipo crítico se realizó la tabla de evaluación de criticidad en escala de 1 a 4 de los diferentes aspectos para la planta de generación como son consecuencias humanas, ambientales, costos e imagen.

Tabla 4. Valoración de consecuencias de fallos de equipos

VALORACIÓN		HUMANAS	AMBIENTALES	COSTOS	IMAGEN
Catastrófica	4	Incapacidad permanente	Efectos pueden ser controlados en 1 MES	Mayor a 100 MCOP	Global
Critico	3	Incapacidad temporal	Efectos pueden ser controlados en 1 SEM	Mayor a 10 MCOP	Nacional
Representativo	2	Lesiones leves	Efectos pueden ser controlados en 1 DIA	Mayor a 1 MCOP	Departamental
Menor	1	Ninguna	No afecta el medio ambiente	Menor a 1 MCOP	Local en la empresa

Para definir la probabilidad de falla, en las escalas: A – entre 1 y 3 años, B – entre 6 meses y 1 años, C – cada mes, se utilizaron datos de reparaciones, años de servicio del equipo, régimen de carga del equipo y fallas en el periodo 2016-2017.

Tabla 5. Escala de criticidad de equipos.

CONSECUENCIA		PROBABILIDAD		
		1 a 3 Años	6 meses a 1 año	1 mes
		A	B	C
Catastrofica	4			
Crítico	3			
Representativo	2			
Menor	1			

COLOR	CRITICIDAD
	Muy alta
	Alta
	Media
	Baja

Luego de la evaluación cualitativa de la criticidad se evidencia que el equipo que tiene alta criticidad es el compresor; sin embargo, es de resaltar que toda la red o el sistema de control neumático tiene una criticidad media para el correcto desempeño de la central de generación.

Tabla 6. Evaluación de criticidad de equipos del sistema instrumentación.

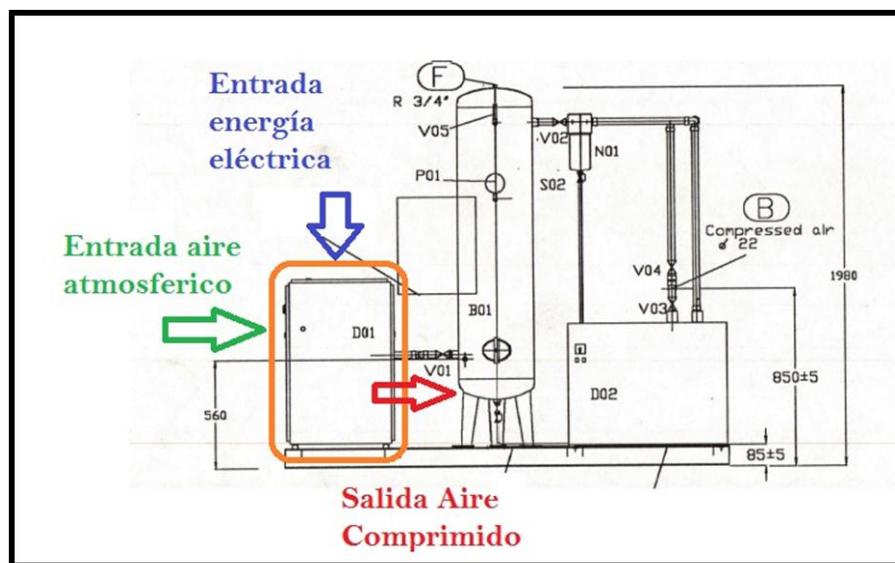
EQUIPO	PROBABILIDAD DE FALLA	CONSECUENCIAS				Promedio Consecuencias	Posición Matriz	Nivel de Criticidad
		HUMANAS	AMBIENTALES	COSTOS	IMAGEN			
COMPRESOR	B	3	2	4	4	3,3	B3	Alta
SECADOR	A	2	2	3	3	2,5	A2	Media
FILTRO DE CONDENSADOS	B	2	1	3	3	2,3	B2	Media
VALVULAS	A	2	1	2	2	1,8	A2	Media
TANQUE PULMON	A	3	1	3	3	2,5	A2	Media
RED DE DISTRIBUCION	A	2	1	2	2	1,8	A2	Media
CONSUMIDOR - TRANSDUCTOR CORRIENTE	B	2	1	2	2	1,8	B2	Media

2.1.2 Definición de las fronteras del estudio. Definir las fronteras del elemento de estudio, en este caso el compresor, resulta esencial para lograr que se cumplan las funciones principales del equipo y para saber su interacción con el medio que lo rodea, que entra y que sale. Las principales interacciones del elemento se pueden listar así:

Tabla 7. Interfases de entrada y salida del compresor

INTERFASES (Entradas/Salidas)		
ENTRADAS:	SALIDAS:	CONDICIONES AMBIENTALES
AIRE DEL CUARTO DE COMPRESORES	DESCARGA DE AIRE COMPRIMIDO AL SECADOR	EQUIPO EN UN CUARTO CERRADO DE COMPRESORES
ENERGIA ELECTRICA DE POTENCIA	SEÑAL DE FUNCIONAMIENTO PARA SALA DE CONTROL	ENTRADA DE AIRE CON FILTRACION PARA EVITAR INGRESO DE POLVO
SEÑAL DE ARRANQUE DESDE SALA DE CONTROL	SEÑAL DE PRESION PARA DISPLAY LOCAL	EXTRACCION DE AIRE CALIENTE DEL CUARTO CON EXTRACTOR
ACTIVACION MANUAL DEL PARO DE EMERGENCIA	SEÑAL DE TEMPERATURA PARA DISPLAY LOCAL	TEMPERATURA AMBIENTE 30°
POSIBLE CONTAMINACION POR POLUCION PLANTA DE CEMENTO	CALOR RADIANTE	HUMEDAD RELATIVA 66%
ADICION DE ACEITE LUBRICANTE DEL OPERADOR	RUIDO	altura 1016 msnm

Figura 6. Esquema del compresor de aire de instrumentos.



2.1.3 Descripción del sistema y sus componentes. Como se describió en la taxonomía figura No 4. El compresor se divide en siete sistemas: Potencia, Transmisión, filtración, separación aire / aceite, Refrigeración, control de funcionamiento y seguridad.

Cada sistema tiene sus elementos con funciones específicas dentro del compresor, las cuales se deben conocer a detalle para rastrear los modos de falla.

Tabla 8. Elementos internos del compresor y sus funciones.

SISTEMA	ELEMENTO	REFERENCIA KAISHAN	FUNCION	FUNCIÓN INTERNA / EXTERNA	CONDICIONES OPERACIONALES
POTENCIA	MOTOR ELECTRICO DE ACCIONAMIENTO	620074663332	Entregar energía mecánica a la unidad compresora	INTERNA	10 hp, 3500 RPM, 460 VAC, 60 HZ
	UNIDAD COMPRESORA DE TORNILLO	36102	Generar la corriente de aire comprimido	EXTERNA	115 PSI - 42 CFM
TRANSMISIÓN	POLEA EN V MOTOR ELECTRICO	18121802038	Transmitir la potencia	INTERNA	10 hp
	POLEA EN V UNIDAD COMPRESORA	18120802022			
	CORREAS TRANSMISION	18080096200			
FILTRACION	FILTRO DE ADMISIÓN DE AIRE	56002100080	Filtrar la admision de aire	INTERNA	0,01 micras
	FILTRO DE ACEITE	77099417200	Filtrar el aceite de proceso	INTERNA	0,3 micras
SEPARACIÓN AIRE / ACEITE	TANQUE SEPARADOR DE ACEITE	975100201000	Mantener una fase de separacion de la mezcla aire aceite	INTERNA	*
	ELEMENTO SEPARADOR AIRE / ACEITE	77042009621	Separar el aceite del aire	INTERNA	micras
REFRIGERACIÓN	VENTILADOR DE AIRE	72113500940	Suministrar el flujo de aire de refrigeracion del sistema	INTERNA	CFM
	RADIADOR AIRE/ACEITE	9751005010	Enfriar el aceite de recirculacion del compresor	INTERNA	*
CONTROL	CONTROLADOR PLC, MAM 970	28110264467	Controla y supervisa el funcionamiento del compresor	EXTERNA	*
	VÁLVULA DE ADMISIÓN	16080400600	Permitir el paso y corte de aire para la unidad compresora.	INTERNA	*
	SENSOR DE PRESION	28100350700	Medir la presión de salida de aire del compresor	EXTERNA	0 - 16 bar
	SENSOR DE TEMPERATURA	28101000400	Medir la temperatura de salida de aire del compresor	EXTERNA	0 - 200°C
SEGURIDAD	BOTON DE EMERGENCIA	28270205400	Realizar el corte de suministro de energía y parada inmediata del equipo	EXTERNA	*
	VALVULA DE SEGURIDAD	16011510001	Realizar descarga al medio cuando la presión supera el valor preestablecido	EXTERNA	10 bar
	INDICADOR DE NIVEL DE ACEITE	1331503002	Indicar visualmente el nivel de aceite	EXTERNA	*

2.1.4 Funciones del sistema y fallas funcionales. Al considerar el compresor como un todo y bajo las condiciones operacionales mencionadas en la sección 2.1.2 se definen las funciones del compresor de la siguiente forma: Una función principal y tres funciones secundarias.

Tabla 9. Función principal y funciones secundarias del sistema

PRIORIDAD	Cód Fun.	FUNCIONES
FUNCION PRIMARIA	FP1	ENTREGAR FLUJO CONTINUO DE AIRE COMPRIMIDO CON LAS CONIDICIONES SOLICITADAS AL SECADOR (103 PSI - 42 CFM)
FUNCION SECUNDARIA	FS1	GENERAR LA SEÑAL DE FUNCIONAMIENTO PARA LA SALA DE CONTROL
FUNCION SECUNDARIA	FS2	ILUSTRAR LOS VALORES DE PRESION Y TEMPERATURA EN EL DSIPLAY LOCAL
FUNCION SECUNDARIA	FS3	REALIZAR EL PARO FORZADO POR ACTIVACION MANUAL DEL OPERADOR

En relación con las fallas funcionales, para la función primaria se agrupan en tres secciones, A- Fallo total, B- Fallo parcial, C-Fallo erróneo.

Tabla 10. Fallas funcionales del sistema

FUNCION PRINCIPAL	FALLA FUNCIONAL
Entregar flujo continuo de aire comprimido con las condiciones solicitadas al secador (103 PSI - 42 CFM)	A - FALLA TOTAL - Compresor detenido B - FALLA PARCIAL - Perdida de capacidad del compresor C - FUNCIONAMIENTO ERRONEO - Compresor sigue cumpliendo la función pero con fallos menores.
FUNCION SECUNDARIA	FALLA FUNCIONAL
Generar la señal de funcionamiento para la sala de control	No genera la señal de funcionamiento
Ilustrar los valores de presión y temperatura en el display local	No ilustra los valores de presión y temperatura
realizar el paro forzado por activación	No realiza el paro forzado

2.1.5 Análisis de modos de falla y sus efectos. Con base en las fallas funcionales descritas en la sección anterior, se definen un total de 30 posibles modos de fallo, los cuales se asociaron a una diferente parte, grupo y sistema del compresor, lo anterior se consultó con personal operativo y de mantenimiento de la instalación y los resultados son los siguientes:

Tabla 11. Modos de falla que causan falla total.

FUNCION PRINCIPAL	FALLA FUNCIONAL	SISTEMA EN FALLA / EVIDENCIA	GRUPO	PARTE	ITEM	CODIGO	MODOS DE FALLO	
ENTREGAR FLUJO CONTINUO DE AIRE COMPRIMIDO CON LAS CONDICIONES SOLICITADAS AL SECADOR (103 PSI - 42 CFM)	A - FALLA TOTAL - COMPRESOR DETENIDO	FALLA DE POTENCIA / COMPRESOR NO ARRANCA, INDICA DEFICIENCIA ESTRUCTURAL Y FALLAS CON DAÑO DE COMPONENTES	MOTOR ELECTRICO	BOBINADO	1	BOB-MOT-AIS	Bobinado del motor eléctrico quemado por desgaste del aislamiento.	
				RODAMIENTOS DESTRUIDOS	2	ROD-MOT-LUB	rodamientos del motor eléctrico frenados por falla de película lubricante	
				CABLEADO	3	CON-MOT-DEFE	conexiones del cableado del motor eléctrico desajustadas por vibración normal del equipo	
		FALLA EN LA TRANSMISIÓN /INDICA QUE SOLO SE MUEVE	UNIDAD COMPRESORA DE TORNILLO	TORNILLOS HELICOIDALES	4	TOR-COM-LUB	tornillos helicoidales de la unidad compresora desgastados por falla de película lubricante	
				COJINETES	5	COJ-COM-DESA	cojinetes de la unidad compresora desgastados por desalineación	
		DISPARO POR SISTEMA DE CONTROL / INDICA FALLOS ESTANDO EN FUNCIONAMIENTO EL COMPRESOR QUE PUEDEN LLEGAR A OCASIONAR DISPARO O PARADA DE PROTECCION.	CORREAS TRANSMISION	CORREAS TRANSMISION	6	COR-TRA-DESA	correas de transmisión rotas por desalineación	
				CONTROL DE TEMPERATURA	REFRIGERACION	7	FIL-VEN-OBST	filtro del ventilador obstruido por suciedad, disparo de alta temperatura.
				CONTROL DE TEMPERATURA	LUBRICACION	8	FUG-COM-ROT	nivel de aceite bajo por fugas en mangueras del sistema, disparo de alta temperatura
				CONTROL DE TEMPERATURA	SENSOR DE TEMPERATURA	9	SEN-TEM-DEFE	sensor de temperatura RTD - defectuoso por daño interno , disparo de alta temperatura
				CONTROL DE PRESION	FILTRO DE ACEITE	10	FIL-ACE-OBST	filtro de aceite obstruido por suciedad, disparo de sobre presión
				CONTROL DE PRESION	VALVULA DE SEGURIDAD	11	VAL-SEG-DESC	válvula de seguridad descalibrada, disparo de sobre presión
				CONTROL DE PRESION	SENSOR DE PRESION	12	SEN-PRE-DEFE	sensor de presión - defectuoso por daño interno , disparo de sobre presión
				VALVULA DE ADMISIÓN	DISCO DE SELLO	13	VAL-ADM-DESG	válvula de admisión desgastada por suciedad, disparo de sobre presión

Tabla 12. Modos de falla que causan falla parcial / Func. Erróneo.

FUNCION PRINCIPAL	FALLA FUNCIONAL	SISTEMA EN FALLA / EVIDENCIA	GRUPO	PARTE	ITEM	CODIGO	MODOS DE FALLO	
ENTREGAR FLUJO CONTINUO DE AIRE COMPRIMIDO CON LAS CONDICIONES SOLICITADAS AL SECADOR (103 PSI - 42 CFM)	B - FALLA PARCIAL PERDIDA DE CAPACIDAD DEL COMPRESOR	FALLA DE POTENCIA - PERDIDA DE VELOCIDAD Y PERDIDA DE CAUDAL, AUMENTO DE CORRIENTE	MOTOR ELECTRICO	BREAKER	14	FAS-MOT-BRK	Motor eléctrico con baja velocidad por caída de una de las fases del breaker principal.	
				RODAMIENTOS DESGASTADOS	15	ROD-MOT-LUB	Rodamientos del motor eléctrico desgastados por falla de película lubricante.	
		FALLA EN LA TRANSMISIÓN/ PERDIDA DE PRESION	CORREAS TRANSMISION	CORREAS TRANSMISION	16	COR-TRA-DESG	correas de transmisión sueltas por desgaste normal.	
		FALLA DE FILTRACION/ PERDIDA DE CAUDAL	SUCCION DE AIRE	FILTRO DE ADMISION	17	FIL-AIR-OBST	filtro de aire obstruido por suciedad	
	C - FUNCIONAMIENTO ERRONEO - COMPRESOR SIGUE FUNCIONANDO CON FALLAS	FALLA EN LA SEPARACION / EXCESO DE ACEITE EN LA DESCARGA	SEPARACION AIRE/ACEITE	SEPARACION AIRE/ACEITE	ELEMENTO SEPARADOR	18	FIL-SEP-DEFE	Filtro del elemento separador roto internamente.
					FALLA EN VALVULA DE ADMISION / BAJA PRESION DEL COMPRESOR, DEAJUSTES DE LOS TIEMPOS DE CARGA Y DESCARGA	CONTROL DE PRESION	SOLENOIDE	19
			FALLA EN VALVULA DE SOBREPRESION / BAJA PRESION DEL COMPRESOR	CONTROL DE PRESION	SELLO DE VALVULA DE SEGURIDAD	20	VAL-SEG-DEFE	sello de válvula de seguridad con fuga por suciedad
			VENTILADOR DE AIRE CON BAJO CAUDAL / ALARMA DE SOBRECALENTAMIENTO	CONTROL DE TEMPERATURA	REFRIGERACION	21	VENT-AIR-DEF	ventilador de aire con bajo caudal por alta temperatura del cuarto de compresores
			RADIADOR OBSTRUIDO / ALARMA DE SOBRECALENTAMIENTO	CONTROL DE TEMPERATURA	REFRIGERACION	22	RAD-ACE-OBST	radiador obstruido por suciedad interna del aceite
			TERMOSTATO PEGADO / ALARMA DE SOBRECALENTAMIENTO	CONTROL DE TEMPERATURA	REFRIGERACION	23	TER-ACE-DESG	termostato pegado por desgaste normal

Tabla 13. Modos de falla de las funciones secundarias.

FUNCION SECUNDARIA	FALLA FUNCIONAL	SISTEMA EN FALLA / EVIDENCIA	GRUPO	PORTE	ITEM	CODIGO	MODOS DE FALLO
GENERAR LA SEÑAL DE FUNCIONAMIENTO PARA LA SALA DE CONTROL	NO GENERA LA SEÑAL DE FUNCIONAMIENTO	FALLA EN SENSOR DE FUNCIONAMIENTO/ NO SE GENERA LA SEÑAL	CONTROLADOR PLC	SENSOR DE FUNCIONAMIENTO	24	SEN-FUN-DEFE	sensor de funcionamiento desajustado por vibración normal del equipo
		FALLA EN CONTROLADOR PLC / NO SE DETECTA LA SEÑAL DE FUNCIONAMIENTO	CONTROLADOR PLC	CONEXIONES ELECTRICAS	25	CON-PLC-DEFE	conexiones eléctricas del controlador desajustadas por vibración normal del equipo
ILUSTRAR LOS VALORES DE PRESION Y TEMPERATURA EN EL DSIPLAY LOCAL	NO ILUSTRAR LOS VALORES DE PRESION Y TEMPERATURA	FALLA EN SENSOR DE TEMPERATURA/ NO SE GENERA LA SEÑAL EN PLC	CONTROL DE TEMPERATURA	SENSOR DE TEMPERATURA	26	SEN-TEM-CON	Sensor de temperatura desajustado por suciedad de contactos o condiciones ambientales.
		FALLA EN SENSOR DE PRESION/ NO SE GENERA LA SEÑAL EN PLC	CONTROL DE PRESION	SENSOR DE PRESION	27	SEN-PRE-CON	Sensor de presión desajustado por suciedad de contactos o condiciones ambientales.
		FALLA EN CONTROLADOR PLC / DISPLAY LOCAL DESENERGIZADO	CONTROLADOR PLC	CONEXIONES ELECTRICAS	28	CON-DIS-DEFE	conexiones eléctricas del display local desajustadas por vibración normal del equipo.
REALIZAR EL PARO FORZADO POR ACTIVACION MANUAL DEL OPERADOR	NO REALIZA EL PARO FORZADO	FALLA EN BOTON DE EMERGENCIA/ NO SE GENERA LA SEÑAL DE FUNCIONAMIENTO	BOTON DE EMERGENCIA	BOTON DE EMERGENCIA	29	BOT-EME-DEFE	botón de emergencia desajustado por vibración normal del equipo.
		FALLA EN CONTROLADOR PLC / NO SE DETECTA LA SEÑAL DE FUNCIONAMIENTO	CONTROLADOR PLC	CONEXIONES ELECTRICAS	30	CON-PLC-DEFE	conexiones eléctricas del controlador desajustadas por vibración normal del equipo.

A continuación, se estima un costo total de cada modo de fallo, a partir de sus efectos ocasionados, como la suma de los siguientes aspectos: Costo repuesto deteriorado + costo de mano de obra + costo del lucro cesante + costo ambiental + siso +costo parada del cliente de la molienda de cemento. Estos resultados se presentan en el **Anexo A. Costos de modo de fallos - efectos.**

Posteriormente se realiza el estudio de estimación del riesgo ante cada uno de estos 30 modos de fallos, para ello se utilizó la Tabla No 4 de Valoración de consecuencias de fallos de equipos para la empresa en los aspectos de humanos, ambientales, costos e imagen. Igualmente, la probabilidad del modo de fallo se estima con la siguiente tabla:

Tabla 14. Escala de riesgos de los modos de fallo.

CONSECUENCIA		PROBABILIDAD		
		1 a 3 Años	6 meses a 1 año	1 mes
		A	B	C
Catastrfica	4			
Critico	3			
Representativo	2			
Menor	1			

COLOR	RIESGO
	Inadmisible
	Inaceptable
	Tolerable
	Aceptable

En los resultados: se obtienen 8 tareas con riesgo B4, Inadmisible, Los resultados se presentan en el **Anexo B. Estimación riesgo de modos de fallo.**

2.1.6 Análisis del árbol de decisión lógico. Para la definición de las tareas a ejecutar en cada uno de los 30 modos de fallo, se sigue el árbol - figura 16 de la norma SAE JA1012; donde se define cuales fallas son ocultas y cuales son evidentes para el operador en condiciones normales, luego ante cada repuesta se evalúan las consecuencias en la seguridad de las personas, luego en las condiciones ambientales y finalmente la afectación en la capacidad operacional o aspecto económico de la organización. Esto se presenta en la tabla No 15 de la sección 2.1.7.

Figura 7. Diagrama de decisión.

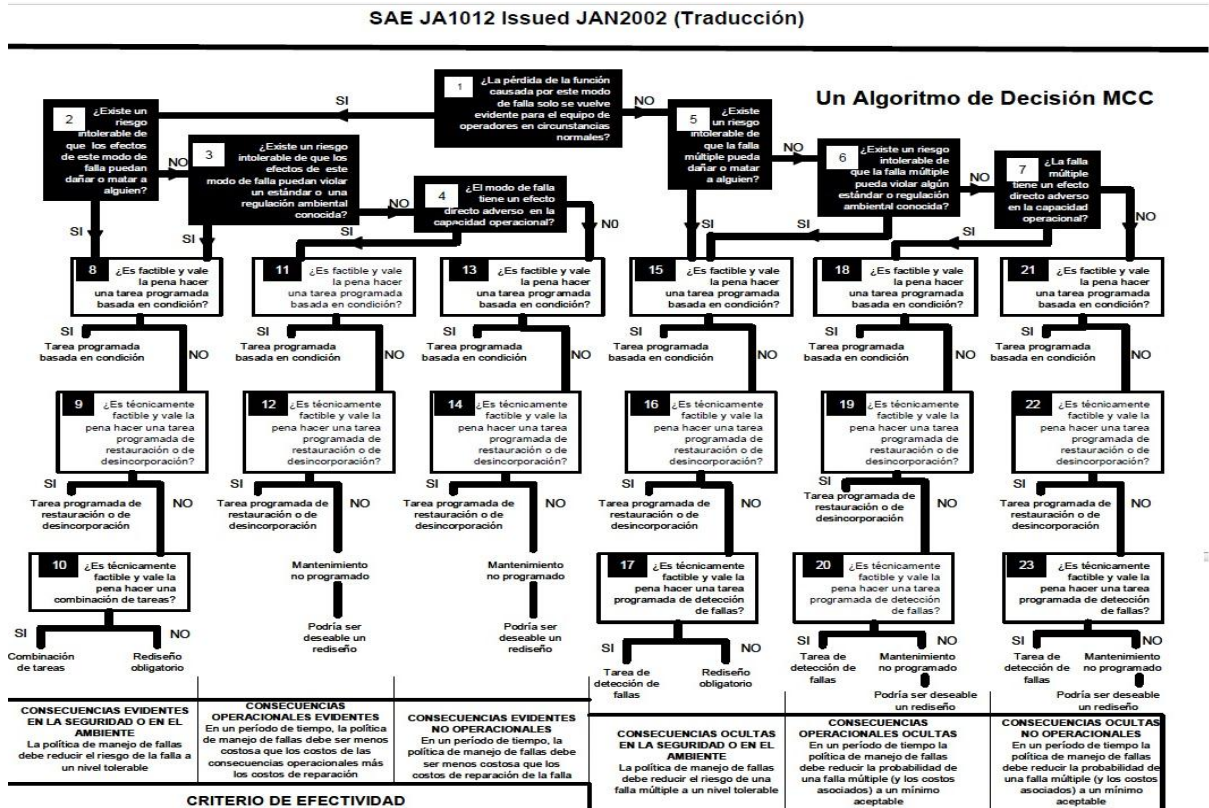


FIGURA 16— PRIMER EJEMPLO DE DIAGRAMA DE DECISIÓN

Fuente: SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. A Guide to the Reliability-centered Maintenance (RCM) Processes, SAE JA1012.2002. January 2002

2.1.7 Selección de tareas del mantenimiento.

A partir del tipo de tarea que arroja el diagrama de decisión, se plantean si corresponde a actividades de inspección rutinaria, tarea sistémica del mantenimiento preventivo como cambio de componentes sin importar su condición o inspecciones periódicas por ejemplo de conexiones eléctricas y finalmente para algunas fallas ocultas para el operador tareas de predictivo como análisis de aceite para conocer el grado de contaminación del aceite dentro del compresor y consumo de corrientes por fase, para saber si el motor eléctrico está cargado.

Tabla 15. Tareas de mantenimiento, según horas de funcionamiento.

Tareas Preventivas de inspección, 24 Horas.

TIPO DE DECISIÓN, FIGURA 16 - SAE JA1012	TIPO DE MANTENIMIENTO	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA horas de funcionamiento	RECURSOS	Cód. Tarea
11.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Verificar el nivel de aceite y el estado de las magueras del compresor.	24	Equipo funcionando, Personal. Operador de campo, mecanico, Material, EPP + manguera nueva, Herramienta, Linterna, llaves manuales.	INSP-FUG-COM-ROT
11.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Verificar el nivel de aceite y sello de la valvula de seguridad de sobre presión.	24	Equipo funcionando, Personal. Operador de campo, mecanico, Material, EPP + valvula de seguridad nueva, Herramienta, Linterna, llaves manuales.	INSP-VAL-SEG-DEFE
11.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO, PREDICTIVO	Verificar la temperatura dentro del cuarto de compresores con Pistola Infraroja. y suciedad en el filtro de ventilador.	24	Equipo funcionando, Personal. Operador, Material, EPP + filtro del ventilador nuevo, Herramienta, Linterna, llaves manuales. Pistola Infraroja.	INSP-VENT-AIR-DEF

Tareas Preventivas de mantenimiento, 1500 Horas.

TIPO DE DECISIÓN, FIGURA 16 - SAE JA1012	TIPO DE MANTENIMIENTO	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA horas de funcionamiento	RECURSOS	Cód. Tarea
11.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Verificar ajuste de contactores y cables del motor eléctrico.	1500	Equipo Detenido por mantenimiento, Electricista, Material, EPP, Multímetro, Terminales eléctricos, Herramientas, Atornilladores, llaves manuales.	INSP-CON-MOT-DEFE
12.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Cambio del filtro del ventilador del compresor.	1500	Equipo Detenido por mantenimiento, Personal. mecanico, Material, EPP + filtro nuevo, Herramienta, llaves manuales, torque.	CAMB-FIL-VEN-OBST
12.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Cambio de aceite y filtro de aceite del compresor.	1500	Equipo Detenido por mantenimiento Personal. mecanico, Material, EPP + aceite y filtro nuevo, Herramienta, llaves manuales, torque.	CAM-FIL-ACE-OBST
20.Tarea de detección de fallas	PREVENTIVO	Toma de registro de consumos e inspección de conexiones de bornera de motor.	1500	Equipo Detenido por mantenimiento, Electricista, Material, EPP, Multímetro, Terminales eléctricos, Herramientas, Atornilladores, llaves manuales.	INSP-FAS-MOT-BRK
19.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Verificar el estado y tensión de las correas.	1500	Equipo Detenido por mantenimiento Personal. mecanico, Material, EPP + correas nuevas, Herramienta, llaves manuales, torque.	INSP-COR-TRA-DESG
19.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Cambio de filtro de aire de succión del compresor.	1500	Equipo Detenido por mantenimiento Personal. mecanico, Material, EPP + filtro succion nuevo, Herramienta, llaves manuales, torque.	CAMB-FIL-AIR-OBST
11.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Desmontaje y prueba funcional de la valvula de admisión.	1500	Equipo Detenido por mantenimiento Personal. mecanico, Material, EPP + Banco de pruebas neumaticas, Herramienta, llaves manuales, torque.	TEST-SOL-ADM-DEFE
12.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Verificar el estado de conexión y condición externa del sensor de temperatura	1500	Equipo Detenido por mantenimiento, Electricista, Material, EPP, Multímetro, Terminales eléctricos, Herramientas, Atornilladores, llaves manuales.	INSP-SEN-TEM-CON
12.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Verificar el estado de conexión y condición externa del sensor de presión.	1500	Equipo Detenido por mantenimiento, Electricista, Material, EPP, Multímetro, Terminales eléctricos, Herramientas, Atornilladores, llaves manuales.	INSP-SEN-PRE-CON
15.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Ajuste y verificación de conexiones del Boton de parada de emergencia.	1500	Equipo Detenido por mantenimiento, Electricista, Material, EPP, Multímetro, Terminales eléctricos, Herramientas, Atornilladores, llaves manuales.	INSP-BOT-EME-DEFE
15.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Ajuste y verificación de conexiones del Controlador PLC.	1500	Equipo Detenido por mantenimiento, Electricista, Material, EPP, Multímetro, Terminales eléctricos, Herramientas, Atornilladores, llaves manuales.	INSP-CON-PLC-DEFE

Tareas Preventivas de mantenimiento, 3000 Horas.

TIPO DE DECISIÓN, FIGURA 16 - SAE JA1012	TIPO DE MANTENIMIENTO	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA horas de funcionamiento	RECURSOS	Cód. Tarea
11.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Desmontaje y prueba funcional del sensor de temperatura RTD.	3000	Equipo Detenido por mantenimiento, Personal, Instrumentista, Material, EPP, Simulador de señales, Herramienta, llaves manuales.	TEST-SEN-TEM-DEFE
8.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Desmontaje y prueba funcional del sensor de presión.	3000	Equipo Detenido por mantenimiento, Personal, Instrumentista, Material, EPP, Simulador de señales, Herramienta, llaves manuales.	TEST-SEN-PRE-DEFE
12.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Desmontaje y prueba funcional de la valvula de admisión. Cambiar los sellos de ser necesario.	3000	Equipo Detenido por mantenimiento, Personal, Mecanico, Material, EPP, Banco de Prueba neumatica, Herramienta, llaves manuales.	TEST-VAL-ADM-DESG
19.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Cambio de aceite y filtro de separación del compresor.	3000	Equipo Detenido por mantenimiento Personal. mecanico, Material, EPP + aceite y filtro de separación, Herramienta, llaves manuales, torque.	CAMB-FIL-SEP-DEFE
19.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Desmontaje y prueba del termostato. Limpieza de la tuebria de retorno al radiador.	3000	Equipo Detenido por mantenimiento, Instrumentista, Mecanico, Material, EPP, Simulador de señales, Herramienta, llaves manuales.	TEST-TER-ACE-DESG
14.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Ajuste y verificación de conexiones del sensor de funcionamiento según condición.	3000	Equipo Detenido por mantenimiento, Instrumentista, Material, EPP, Multimetro, Simulador de señales, Herramienta, llaves manuales.	INSP-SEN-FUN-DEFE
14.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Ajuste y verificación de conexiones de entradas al PLC según condición.	3000	Equipo Detenido por mantenimiento, Instrumentista, Material, EPP, Multimetro, Simulador de señales, Herramienta, llaves manuales.	INSP-CON-PLC-DEFE

Tareas de Predictivo, 1000 Horas.

TIPO DE DECISIÓN, FIGURA 16 - SAE JA1012	TIPO DE MANTENIMIENTO	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA horas de funcionamiento	RECURSOS	Cód. Tarea
8. Tarea programada basada en condición.	PREDICTIVO	Análisis de vibraciones al motor eléctrico.	1000	Equipo funcionando, Personal.Tecnico en vibraciones, Material, EPP, Herramienta, Equipo SKF.	PRED-ROD-MOT-LUB
8.Tarea programada basada en condición.	PREDICTIVO	Análisis de aceite en el compresor.	1000	Equipo funcionando, Personal.Operador, Material, EPP, Frascos de muestreo, Herramienta, Kit de analisis en campo.	PRED-TOR-COM-LUB
11.Tarea programada basada en condición.	PREDICTIVO	Análisis de vibraciones a la unidad compresora.	1000	Equipo funcionando, Personal.Tecnico en vibraciones, Material, EPP, Herramienta, Equipo SKF.	PRED-COJ-COM-DESA
20.Tarea de detección de fallas	PREDICTIVO	Análisis de aceite en el compresor.	1000	Equipo funcionando, Personal.Operador, Material, EPP, Frascos de muestreo, Herramienta, Kit de analisis.	PRED-TOR-COM-LUB

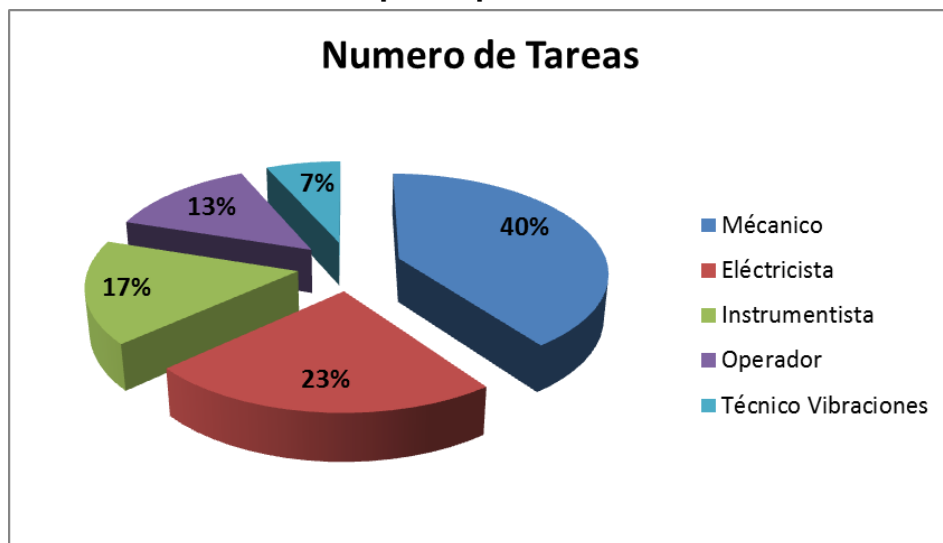
Tareas Preventivas de mantenimiento, 6000 Horas.

TIPO DE DECISIÓN, FIGURA 16 - SAE JA1012	TIPO DE MANTENIMIENTO	DESCRIPCIÓN TAREA	FRECUENCIA horas de funcionamiento	RECURSOS	Cód. Tarea
8. Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Realizar prueba de resistencia de aislamiento del motor eléctrico.	6000	Equipo Detenido por mantenimiento, Personal. Electricista, Material, EPP, Herramienta, MEGGER,, llaves manuales.	TEST-BOB-MOT-AIS
12.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Cambio de las correas de transmisión.	6000	Equipo Detenido por mantenimiento, Personal. mecanico, Material, EPP + correas nuevas, Herramienta, llaves manuales, torque.	CAMB-COR-TRA-DESA
8.Tarea programada basada en condición.	PREVENTIVO	Desmontaje y prueba de funcionamiento a la valvula de seguridad.	6000	Equipo Detenido por mantenimiento, Personal. mecanico, Material, EPP + Banco de pruebas neumaticas, Herramienta, llaves manuales, torque.	TEST-VAL-SEG-DESC
19.Tarea programada de restauración.	PREVENTIVO	Lubricacion con grasa en los rodamientos del motor eléctrico.	6000	Equipo Detenido por mantenimiento, Personal. mecanico, Material, EPP + grasa MOBIL SHC 100, Herramienta, llaves manuales, grasera.	CAMB-ROD-MOT-LUB
14.Mantenimiento no programado	CORRECTIVO	correr a fallo, Cambio del display local por deterioro por vibración.	NA	Equipo Detenido por mantenimiento, Personal. Operador de campo, Electricista, Material, EPP + DDISPLAY NUEVO, Herramienta, llaves manuales.	CORRER A FALLO

2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESTUDIO

A partir de las tareas y su periodicidad definida anteriormente, se procede a realizar un análisis de las tareas por especialidad del personal, para conocer que personal debe estar más familiarizado con el mantenimiento del equipo y que tareas le serán asignadas al operador para que sea correctamente involucrado como primer responsable de mantener las condiciones básicas de limpieza, ajuste y lubricación del equipo.

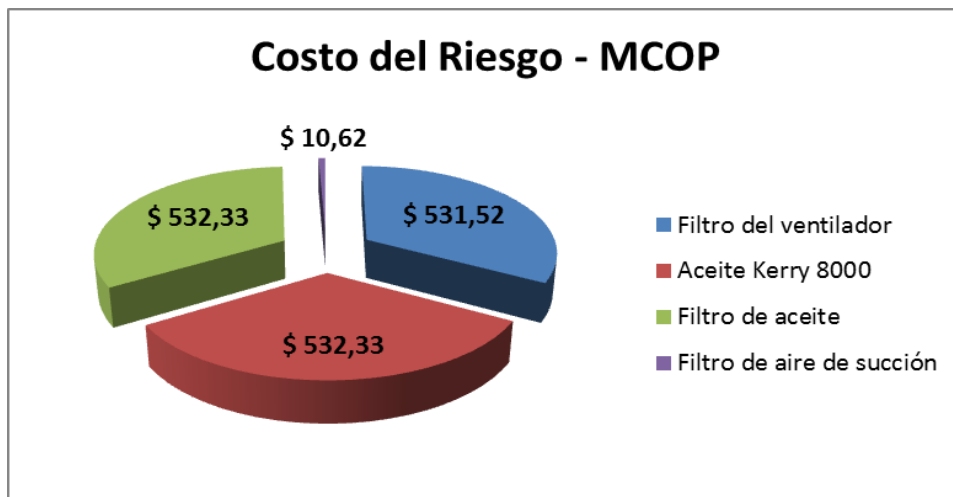
Figura 8. Distribución de tareas por especialidad



Como se puede observar la principal naturaleza de los fallos del compresor es de tipo mecánico, por lo cual se debe reforzar el entrenamiento del personal de operaciones en el funcionamiento y las posibles fallas mecánicas del equipo para realizar identificación temprana de los modos de falla, con el seguimiento de las variables presión y temperatura. Esto se relaciona con el objetivo FO de la sección 1.4.3 para hacer que el personal mecánico experto, comparta su conocimiento con el operador en calidad de aprendiz. En lo relativo a las tareas del electricista,

también se recomienda hacer esta socialización de conocimiento del equipo, siempre que el aprendiz tenga conocimientos certificados en el área eléctrica. Igualmente se realiza un análisis de los repuestos más usados en las tareas de mantenimiento según la frecuencia de recambios (cada 1500 horas) y ante las consecuencias de sus posibles fallos (1,5 horas de producción y posible paro de la planta del cliente), se consideran como repuestos malos actores del compresor.

Figura 9. Costo del riesgo de repuestos con mayor consumo.

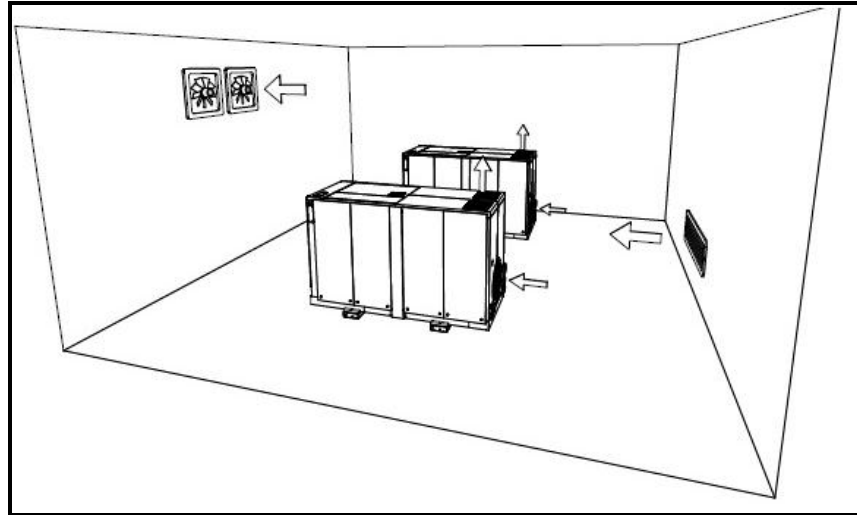


Así se observa que mantener la calidad del aceite Kerry 8000 es un aspecto fundamental, ya que los costos globales del riesgo superan los \$500 MCOP por lo cual se debe iniciar la tarea de muestreo y respectivo análisis periódico de la calidad del aceite del compresor de tornillo, para evitar también taponamientos del filtro de aceite, bien sea por contaminación de polvo del ambiente como por elementos de desgaste, con lo cual se podrá llevar control y patrones del desgaste de componentes como cojinetes de contacto con el parámetro cobre y de los elementos de rodadura con el parámetro hierro.

Adicionalmente para el caso particular, como la central generación está en una planta cementera, se requiere cambio de filtros de aire de succión del compresor

cada 1500 horas, pero adicional se deben garantizar las condiciones adecuadas de filtración y flujo de aire para el cuarto de compresores, como se ilustra en la siguiente figura.

Figura 10. Ventilación adecuada de sala de compresores.

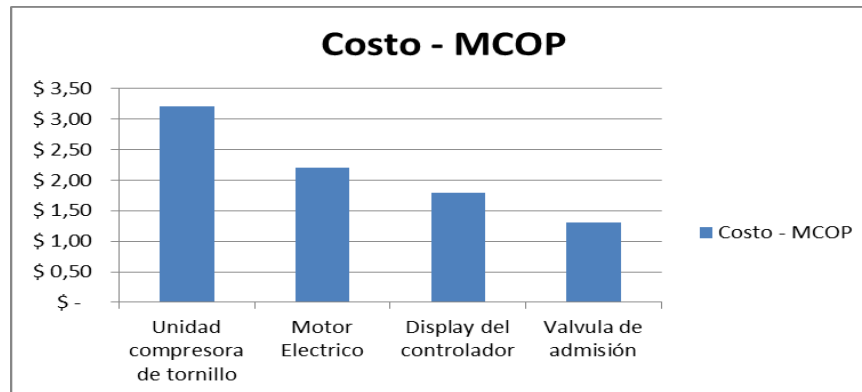


Fuente: Manual del compresor KAISHAN - KRSE10-115⁹

Finalmente, otro aspecto es garantizar el adecuado stock de repuestos de consumibles de aceite lubricante y filtro de aceite, lo cual se relaciona con el objetivo DO de la sección 1.4.3 para hacer las compras necesarias y tener siempre los repuestos vitales del equipo, disponibles por suministro nacional como son la unidad compresora de tornillo, Motor eléctrico, Display del controlador y válvula de admisión. Cuyo costo no es representativo frente al costo de lucro cesante por hora de producción que es de 6,8 MCOP/h.

⁹ **ROTARY SCREW AIR COMPRESSOR.** Manual del compresor, KAISHAN - KRSE10-115, Release, 2015.

Figura 11. Costo de repuestos con baja tasa de fallos.



3. CONCLUSIONES

- Con el desarrollo de la metodología MCC según la norma SAE JA1011:1999, se permitió la interacción del personal operativo con el funcionamiento del compresor de tornillo, (Componente más crítico del sistema en estudio), lo cual afectará positivamente su interacción y compromiso con la detección de posibles fallas tempranas del equipo.
- La evaluación de criticidad de los componentes del sistema, permitió evidenciar que el componente más crítico es la fuente de aire o compresor de tornillo con un 3.3 de nivel de consecuencia, por lo cual se sugiere realizarle el MCC y toda la red de suministro de aire de instrumentación tiene un nivel de criticidad media para el correcto desempeño de la central de generación; por lo cual se debe continuar con la ejecución de las tareas del mantenimiento preventivo de los demás componentes como: secador, filtros, tanque y válvulas; según las instrucciones de los fabricantes de cada equipo particular.
- En la aplicación de la metodología se identificaron las funciones globales del equipo y las funciones específicas de cada uno de los subsistemas

analizados, con lo cual se facilitó encontrar los modos de fallo, sus consecuencias y finalmente con el árbol de decisión lógica se definió que tipo de tarea es la más adecuada para evitar que dicho fallo ocurra y si ocurre que tenga un riesgo admisible o tolerable para la empresa. Dicho listado de tareas con la periodicidad y recursos adecuados conformaron el programa de mantenimiento MCC.

- El análisis de costos del plan de mantenimiento MCC a 6000 horas, resume un valor total de 13,8 MCOP, para evitar los fallos totales del equipo crítico de la red de instrumentación, lo cual es un valor representativo frente al costo de lucro cesante por hora de producción que es de 6,8 MCOP/h, pero irrelevante frente al costo global del riesgo de parada del cliente de \$521 MCOP.
- Finalmente se realizó un análisis de los resultados del estudio, donde se observa que las tareas planteadas del programa de mantenimiento están alineadas con los objetivos de la planificación DOFA para las labores del mantenimiento. En el cumplimiento de cada objetivo de la siguiente forma:

Fortaleza / Oportunidad: Involucramiento del personal tanto experto como operador aprendiz, al personal experto se le debe capacitar en uso de equipos de predictivo como vibraciones e interpretación de análisis de aceites lubricantes y el operador aprendiz debe acompañar los mantenimientos del personal experto.

Fortaleza / Amenaza: Las tareas del modelo de mantenimiento se definieron para mantener la confiabilidad de la planta con los indicadores actuales, para lograr la renovación del contrato de operación y mantenimiento con el cliente actual.

Debilidad / Oportunidad: Se definieron los malos actores o repuestos que traen asociado una mayor consecuencia de falla y ante los cuales se debe realizar una

adecuada gestión de compra de repuestos, para tener un mínimo de seguridad. Su costo es irrelevante frente al costo de lucro cesante por hora de producción.

Debilidad / Amenaza: Se plantearon tareas con frecuencia 24 horas, como rutinas de inspección a desarrollar por el personal operativo para detección temprana de condiciones anormales, ambientales como de temperatura del cuarto, obstrucción de filtros de ventilación y aspectos del equipo como presión, nivel de aceite y evidencia de fugas.

Es de anotar que implementar el plan de mantenimiento antes propuesto para el equipo crítico (compresor de tornillo); está sujeto a decisión por parte de la empresa, quien a través de sus estrategias corporativas y visión del negocio evaluará la conveniencia de su implementación.

BIBLIOGRAFÍA.

1. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2010). *ISO 8573 - 1 Compressed air, Contaminants and purity classes*. Switzerland: ISO copyright office.
2. Selvik, J. T., and T. Aven. 2011. "A Framework for Reliability and Risk Centered Maintenance." *Reliability Engineering and System Safety* 96 . Elsevier: 324–331.
3. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (2006). *ISO 14224, Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. Switzerland: ISO copyright office.
4. SAE JA1011, Evaluation Criteria for Reliability-centered Maintenance (RCM) Processes, Society of Automotive Engineering, 1999.
5. HINCAPIE, Esteban. (2003) *Redes de aire comprimido*, Universidad nacional de Colombia, sede Medellín. *Redes de aire comprimido*.

6. Guía de instalación de sistemas de aire comprimido – Kaeser Compressors, Inc. 2015.
7. Instrument air system maintenance. Wartsila Instructions Technical services – WV92Q248 - Issue 1, May 2016.
8. Power plant solutions. Wartsila Commercial. Smart Power plant generation for Owners. Page 8. (2016).
9. Manual del compresor KAISHAN - KRSE10-115, Rotary Screw Air Compressor, Release 2015, Version C.
10. ORTIZ, D. (2016). *Mantenimiento Centrado en confiabilidad - RCM, Memorias*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
11. MOUBRAY, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Edición en Español*. Lutterwoth, United Kingdom: Aladon Ltd.
12. NOWLAN, S. F. (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. Chicago, IL, USA: United Airlines - San Francisco CA., Department of Defense - Washington DC.
13. Norma SAE SAE JA1012 “A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard” emitida en agosto 2011.

ANEXOS

Anexo A. Costos de modo de fallos - efectos.

COSTO DEL LUCROCESANTE / HORA			
PESOS/kWh	PESOS/MWh	PESOS/h	MCOP/h
275	275000	6875000	6,875

COSTO DE MANO DE OBRA - CORRECTIVO		
Mec./MCOP/h	Elec./MCOP/h	Mec + Elec./MCOP/h
0,013	0,025	0,038

ITEM	Modo de Falla	Descripción Efectos	costo repuesto deteriorado	costo de mano de obra	costo del luocrosante	costo ambiental + siso	costo parada del cliente de la molienda de cemento	COSTO TOTAL
1	Bobinado del motor eléctrico quemado por desgaste del aislamiento.	Humo, Sobrecorriente, Requiere cambio del motor electrico, Mecanico + Electricista, 8 horas de reparación + 1,5 hora de producción, Riesgo de electrocución, no afecta medio ambiente. Posible paro de la planta del cliente.	\$ 2,00	\$ 0,30	\$ 10,31	\$ -	\$ 521,00	\$ 533,62
2	Rodamientos del motor eléctrico frenados por falla de película lubricante	Sobrettemperatura, Sobrecorriente, Requiere cambio de rodamientos, Mecanico + Electricista, 10 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva. No afecta medio ambiente. Posible paro de la planta del cliente.	\$ 0,30	\$ 0,38	\$ 10,31	\$ -	\$ 521,00	\$ 531,99
3	conexiones del cableado del motor eléctrico desajustadas por vibración normal del equipo	Cortocircuito, Humo, Sobrecorriente, Requiere inspeccion de electricista, 1 hora de reparación + 1,5 hora de producción, Riesgo de electrocución. No afecta medio ambiente. Posible paro de la planta del cliente.	\$ 0,20	\$ 0,03	\$ 10,31	\$ -	\$ 521,00	\$ 531,54
4	Tornillos helicoidales de la unidad compresora desgastados por falla de película lubricante	Breaker disparado, Sobrettemperatura, Aumento de vibraciones, Sobrecorriente, Requiere cambio de la unidad compresora, Mecanico + Electricista, 10 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva. Posible derrame interno de 2 galones de aceite. Posible paro de la planta del cliente.	\$ 3,20	\$ 0,38	\$ 10,31	\$ 0,80	\$ 521,00	\$ 535,69
5	Cojinetes de la unidad compresora desgastados por desalineación	Breaker disparado, Sobrettemperatura, Sobrecorriente, Requiere cambio de la unidad compresora, Mecanico + Electricista, 10 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva.Posible derrame interno de 2 galones de aceite. Posible paro de la planta del cliente.	\$ 3,20	\$ 0,38	\$ 10,31	\$ 0,80	\$ 521,00	\$ 535,69
6	Correas de transmisión rotas por desalineación	Motor electrico gira en vacio, No hay entrega de caudal de aire, Requiere cambio de las dos correas, Mecanico, 2 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva. no afecta medio ambiente. Posible paro de la planta del cliente.	\$ 0,60	\$ 0,03	\$ 10,31	\$ -	\$ 521,00	\$ 531,94
7	Filtro del ventilador obstruido por suciedad.	Se observa filtro del ventilador principal contaminado. Ocasiona Disparo por alta temperatura, Requiere cambio del elemento filtrante del ventilador, Mecanico, 0,5 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva. no afecta medio ambiente.	\$ 0,20	\$ 0,01	\$ 10,31	\$ -	\$ 521,00	\$ 531,52
8	Nivel de aceite bajo por fugas en mangueras del sistema.	Se observan fugas de aceite hacia el exterior del compresor. Ocasiona Disparo por alta temperatura, Requiere cambio de mangueras defectuosas, Mecanico, 1,0 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva.Posible derrame interno de 2 galones de aceite.	\$ 0,30	\$ 0,01	\$ 10,31	\$ 0,80	\$ 521,00	\$ 532,43
9	Sensor de temperatura RTD - defectuoso por daño interno.	Fallo de señal erronea. Ocasiona Disparo por alta temperatura, Requiere cambio del sensor, Electricista, 0,5 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva. no afecta medio ambiente. Posible paro de la planta del cliente.	\$ 0,40	\$ 0,01	\$ 10,31	\$ -	\$ 521,00	\$ 531,73
10	Filtro de aceite obstruido por suciedad.	Se observan datos anormales de presión. Ocasiona Disparo por sobre presión, Requiere cambio de filtro de aceite, Mecanico, 1,0 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva.Posible derrame interno de 2 galones de aceite. Posible paro	\$ 0,20	\$ 0,01	\$ 10,31	\$ 0,80	\$ 521,00	\$ 532,33
11	Válvula de seguridad descalibrada.	Se observan datos anormales de presión. Ocasiona Disparo por sobrepresión, Requiere cambio de valvula de seguridad, Mecanico, 1,0 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva.Posible derrame interno de 2 galones de aceite. Posible paro	\$ 0,40	\$ 0,01	\$ 10,31	\$ 0,80	\$ 521,00	\$ 532,53
12	Sensor de presión - defectuoso por daño interno.	Fallo de señal erronea. Ocasiona Disparo por sobre presión, Requiere cambio del sensor, Electricista, 0,5 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva. no afecta medio ambiente. Posible paro de la planta del cliente.	\$ 0,40	\$ 0,01	\$ 10,31	\$ -	\$ 521,00	\$ 531,73
13	Válvula de admisión desgastada por suciedad.	Se observan datos anormales de presión. Ocasiona Disparo por sobre presión, Requiere cambio de valvula de admisión, Mecanico, 3,0 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva.Posible derrame interno de 2 galones de aceite. Posible paro	\$ 0,80	\$ 0,04	\$ 10,31	\$ 0,80	\$ 521,00	\$ 532,95

ITEM	Modo de Falla	Descripción Efectos	costo repuesto deteriorado	costo de mano de obra	costo del lucrocresante	costo ambiental + siso	costo parada del cliente de la molienda de cemento	COSTO TOTAL
14	Motor eléctrico con baja velocidad por caída de una de las fases del breaker principal.	Perdida de velocidad, Disminuye el caudal entregado y produce aumento en las corrientes de fases. Requiere inspeccion del sistema electrico, Electricista, 1,5 hora de inspección. Riesgos de la labor de inspeccion. no afecta medio ambiente. + 1,5 hora de producción.		\$ 0,04	\$ 10,31			\$ 10,35
15	Rodamientos del motor eléctrico desgastados por falla de película lubricante.	Perdida de velocidad, Aumento de la vibracion, Disminuye el caudal entregado. Requiere inspeccion del tecnico de vibraciones y toma de muestra de aceite para analisis, Mecanico, 1,5 hora de inspección. Riesgos de la labor de inspección. No afecta medio ambiente. + 1,5	\$ 0,50	\$ 0,02	\$ 10,31			\$ 10,83
16	Correas de transmisión sueltas por desgaste normal.	Perdida de velocidad, Aumento de la vibracion, Disminuye el caudal y presión entregado. Requiere inspeccion del tecnico de vibraciones, Mecanico, Posible cambio de correas elongadas, 1,5 hora de inspección. Riesgos de la labor de inspección. no afecta medio	\$ 1,10	\$ 0,02	\$ 10,31			\$ 11,43
17	Filtro de aire obstruido por suciedad	Perdida de velocidad, Aumento en las corrientes de fases, Disminuye el caudal y presión entregado. Requiere inspeccion del compresor por tecnico, Posible cambio de filtro de aire, Mecanico, 0,5 hora de inspección. Riesgos de la labor de inspección. no afecta medio	\$ 0,30	\$ 0,01	\$ 10,31			\$ 10,62
18	Filtro del elemento separador roto internamente.	Exceso de aceite en la salida de aire comprimido. Requiere inspeccion del tecnico y toma de muestra de aceite para analisis, Mecanico, 1,5 hora de inspección. Posible cambio del elemento separador, Riesgos de la labor de inspección. no afecta medio ambiente. + 1,5 hora de	\$ 0,60	\$ 0,02	\$ 10,31			\$ 10,93
19	Solenoides de válvula de admisión no energiza por soldadura o falla en su conexión eléctrica	Se observan valores de presion de descarga irregulares, No cierra correctamente el paso de aire hacia la válvula de admisión. Requiere inspeccion del sistema electrico, Electricista, Posible cambio de bobinas, 1,5 hora de inspección. Riesgos de la labor de inspeccion. no	\$ 0,40	\$ 0,04	\$ 10,31			\$ 10,75
20	Sello de válvula de seguridad con fuga por suciedad	Se observan fugas de aceite hacia el exterior del compresor. Valvula con fuga permanente, Requiere inspeccion de tecnico, Mecanico, 1,0 horas de inspeccion, Posible cambio valvula de seguridad, Riesgos de la labor de inspección. Posible derrame interno de 2 galones de aceite.	\$ 0,40	\$ 0,01	\$ 10,31	\$ 0,80		\$ 11,52
21	Ventilador de aire con bajo caudal por alta temperatura del cuarto de compresores	Se evidencia Alta temperatura dentro del cuarto de compresores, Se observan valores de presion de descarga irregulares, Requiere inspeccion de tecnico, Posible cambio de elementos filtrantes del ventilador, Mecanico, 1,0 horas de inspeccion, Riesgos de la labor de	\$ 0,30	\$ 0,01	\$ 10,31			\$ 10,63
22	Radiador obstruido por suciedad interna del aceite	Se evidencia alta temperatura en la salida de aire, el aceite no se refrigera y el ventilador estaría en funcionamiento continuo. Requiere inspeccion de tecnico y Limpiza interna del radiador, Mecanico, 4,0 horas de inspeccion, Riesgos de la labor de inspección. Posible derrame	\$ 0,50	\$ 0,05	\$ 10,31	\$ 0,20		\$ 11,06
23	Termostato pegado por desgaste normal	Se evidencia alta temperatura en la salida de aire, el aceite no se refrigera y el ventilador estaría en funcionamiento continuo. Requiere inspeccion de tecnico y posible cambio del termostato, Mecanico, 4,0 horas de inspeccion, Riesgos de la labor de inspección. Posible derrame	\$ 0,30	\$ 0,05	\$ 10,31	\$ 0,20		\$ 10,86
24	Sensor de funcionamiento desajustado por vibración normal del equipo	El operador de sala evidencia ausencia de señal y se genera alarma de compresor detenido, como es una señal falsa y el equipo queda operando normalmente. no afecta ni el equipo ni el entorno. Requiere inspeccion del sistema electrico, Electricista, 0,5 horas de inspección,	\$ 0,40	\$ 0,01				\$ 0,41
25	Conexiones eléctricas del controlador desajustadas por vibración normal del equipo	El operador de sala evidencia ausencia de señal y se genera alarma de compresor detenido, como es una señal falsa y el equipo queda operando normalmente. no afecta ni el equipo ni el entorno. Requiere inspeccion del sistema electrico, Electricista, 0,5 horas de inspección,	\$ 0,40	\$ 0,01				\$ 0,41

ITEM	Modo de Falla	Descripción Efectos	costo repuesto deteriorado	costo de mano de obra	costo del lucrocesante	costo ambiental + siso	costo parada del cliente de la molienda de cemento	COSTO TOTAL
26	Sensor de temperatura desajustado por suciedad de contactos o condiciones ambientales.	Fallo de señal errónea para el DISPLAY. Ocasiona pérdida del dato para lectura del operador en campo, Posible aceite o polvo dentro del compresor. Requiere inspección del sistema eléctrico, Electricista, Posible cambio del sensor, 1,5 hora de inspección. Riesgos de la labor	\$ 0,40	\$ 0,04				\$ 0,44
27	Sensor de presión desajustado por suciedad de contactos o condiciones ambientales.	Fallo de señal errónea para el DISPLAY. Ocasiona pérdida del dato para lectura del operador en campo, Posible aceite o polvo dentro del compresor. Requiere inspección del sistema eléctrico, Electricista, Posible cambio del sensor, 1,5 hora de inspección. Riesgos de la labor	\$ 0,40	\$ 0,04				\$ 0,44
28	Display local desajustado por vibración normal del equipo	Fallo de señal errónea para el DISPLAY. Ocasiona pérdida del dato para lectura del operador en campo, Posible alta vibración en el compresor. Requiere inspección del sistema eléctrico, Electricista, Posible cambio del display, 1,5 hora de inspección. Riesgos de la labor de inspección.	\$ 0,80	\$ 0,04				\$ 0,84
29	Botón de emergencia desajustado por vibración normal del equipo	FALLA OCULTA, el operador quiere parar el equipo y no para. Requiere inspección del sistema eléctrico, Electricista, 0,5 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva. genera efectos al medio ambiente si hay una fuga de aceite y afecta al personal si esta atrapada una persona y el equipo no para Posible paro de la planta del cliente. Valoración de incapacidades totales y permanente.	\$ 0,20	\$ 0,01	\$ 10,31	\$ 120,00	\$ 521,00	\$ 651,53
30	Conexiones eléctricas del controlador desajustadas por vibración normal del equipo	FALLA OCULTA, el operador quiere parar el equipo y no para. Requiere inspección del sistema eléctrico, Electricista, 0,5 horas de reparación + 1,5 hora de producción. Riesgos de la labor correctiva. genera efectos al medio ambiente si hay una fuga de aceite y afecta al personal si esta atrapada una persona y el equipo no para Posible paro de la planta del cliente. Valoración de incapacidades totales y permanente.	\$ 0,20	\$ 0,01	\$ 10,31	\$ 120,00	\$ 521,00	\$ 651,53

Anexo B. Estimación riesgo de modos de fallo.

Item	Modo de Falla	Falla oculta	R. Humano	R. Ambiental	R. Ecónom	R. Imagen
1	Bobinado del motor eléctrico quemado por desgaste del aislamiento.	NO	A3	A1	A4	A4
2	Rodamientos del motor eléctrico frenados por falla de película lubricante	NO	A3	A1	A4	A4
3	conexiones del cableado del motor eléctrico desajustadas por vibración normal del equipo	NO	B3	B1	B4	B4
4	Tornillos helicoidales de la unidad compresora desgastados por falla de película lubricante	NO	A3	A2	A4	A4
5	Cojinetes de la unidad compresora desgastados por desalineación	NO	A3	A2	A4	A4
6	Correas de transmisión rotas por desalineación	NO	A3	A1	A4	A4
7	Filtro del ventilador obstruido por suciedad.	NO	B2	B1	B4	B4
8	Nivel de aceite bajo por fugas en mangueras del sistema.	NO	B3	B2	B4	B4
9	Sensor de temperatura RTD - defectuoso por daño interno.	NO	A3	A1	A4	A4
10	Filtro de aceite obstruido por suciedad.	NO	A3	A2	A4	A4
11	Válvula de seguridad descalibrada.	NO	A3	A2	A4	A4
12	Sensor de presión - defectuoso por daño interno.	NO	A3	A1	A4	A4
13	Válvula de admisión desgastada por suciedad.	NO	A3	A2	A4	A4
14	Motor eléctrico con baja velocidad por caída de una de las fases del breaker principal.	SI	A2	A1	A3	A3
15	Rodamientos del motor eléctrico desgastados por falla de película lubricante.	SI	A2	A1	A3	A3
16	Correas de transmisión sueltas por desgaste normal.	SI	B2	B1	B3	B4
17	Filtro de aire obstruido por suciedad	SI	B2	B1	B3	B4
18	Filtro del elemento separador roto internamente.	SI	B2	B1	B3	B3

Item	Modo de Falla	Falla oculta	R. Humano	R. Ambiental	R. Ecónom	R. Imagen
19	Solenoides de válvula de admisión no energiza por soldadura o falla en su conexión eléctrica	NO	B3	B1	B3	B4
20	Sello de válvula de seguridad con fuga por suciedad	NO	A2	A2	A3	A3
21	Ventilador de aire con bajo caudal por alta temperatura del cuarto de compresores	NO	B2	B1	B3	B4
22	Radiador obstruido por suciedad interna del aceite	NO	B2	B2	B3	B4
23	Termostato pegado por desgaste normal	NO	A2	A2	A3	A3
24	Sensor de funcionamiento desajustado por vibración normal del equipo	NO	A3	A1	A1	A3
25	Conexiones eléctricas del controlador desajustadas por vibración normal del equipo	NO	B3	B1	B1	B3
26	Sensor de temperatura desajustado por suciedad de contactos o condiciones ambientales.	NO	A3	A1	A1	A3
27	Sensor de presión desajustado por suciedad de contactos o condiciones ambientales.	NO	A3	A1	A1	A3
28	Display local desajustado por vibración normal del equipo	NO	B3	B1	B1	B3
29	Botón de emergencia desajustado por vibración normal del equipo	SI	A4	A1	A4	A4
30	Conexiones eléctricas del controlador desajustadas por vibración normal del equipo	SI	A4	A1	A4	A4