



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD
PARA UNA PLANTA ELÉCTRICA DE EMERGENCIA DE 625 KVA, 480 VAC, *STAND-BY***

Ing. José Luis Mendóza Alvarado

Asesorado por el Mtro. en Tecnología y Sostenibilidad Energética

Ing. Sergio Roberto Soto Gallardo

Guatemala, agosto de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD
PARA UNA PLANTA ELÉCTRICA DE EMERGENCIA DE 625 KVA, 480 VAC, *STAND-BY***

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JOSÉ LUIS MENDÓZA ALVARADO

ASESORADO POR EL MTRO. EN TECNOLOGÍA Y SOSTENIBILIDAD
ENERGÉTICA ING. SERGIO ROBERTO SOTO GALLARDO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

JURADO EVALUADOR QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA

DECANA	Ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Ing. Rocío Carolina Medina Galindo
EXAMINADOR	Ing. Javier Fidelino García Tetzaguic
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD
PARA UNA PLANTA ELÉCTRICA DE EMERGENCIA DE 625 KVA, 480 VAC, STAND-BY**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha día 31 de julio de 2020.




Ing. José Luis Méndez Alvarado

DTG. 352.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD PARA UNA PLANTA ELÉCTRICA DE EMERGENCIA DE 625 KVA, 480 VAC, STAND-BY**, presentado por el Ingeniero José Luis Mendóza Alvarado, estudiante del programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, agosto de 2021

AACE/cc



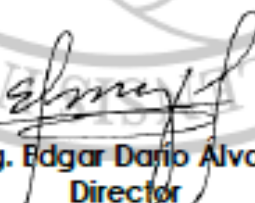
Guatemala, Agosto 2021

EEPI-1030-2021

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **"PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD PARA UNA PLANTA ELÉCTRICA DE EMERGENCIA DE 625 KVA, 480 VAC STAND BY"** presentado por el Ingeniero José Luis **Mendoza Alvarado** identifica con carné **008011991** correspondiente al programa de **Maestría en Ingeniería de Mantenimiento** apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director





Guatemala, Agosto 2021

EEPI-1031-2021

Como Coordinador del programa de Maestría en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: "PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD PARA UNA PLANTA ELÉCTRICA DE EMERGENCIA DE 625 KVA, 480 VAC, STAND BY" presentado por el Ingeniero José Luis Méndez Alvarado quien se identifica con el número de carné 008011991.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Mtra. Rocío Carolina Medina Galindo
Coordinadora de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado

ACTO QUE DEDICO A:

Mis nietos

Amelia Soto Mendóza y Juan Ignacio y José Luis
Mendoza Valdez.

Otras personas

A quienes aprecio, quiero y he querido siempre.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XVII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS	XIX
OBJETIVOS.....	XXIII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XXV
INTRODUCCIÓN	XXXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. ¿Qué es una planta eléctrica de emergencia?	1
1.2. Potencia eléctrica de una planta eléctrica de emergencia.....	3
1.3. Componentes principales de una planta eléctrica de emergencia.	5
1.4. Mantenimiento preventivo (PM).....	8
1.5. Mantenimiento correctivo (CM).....	10
1.6. El plan de mantenimiento	11
1.7. Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)	11
1.7.1. Las funciones y parámetros de funcionamiento	14
1.7.2. Fallas funcionales.....	14
1.7.3. Modos de falla	15
1.7.4. Efectos de falla.....	16
1.7.5. Las herramientas el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)	18

1.7.6.	Implementación del RCM	23
1.7.7.	La metodología de implementación del FMEA o análisis de modos y efectos de falla.....	26
1.8.	Criterios de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.....	26
1.9.	La curva P – F	28
1.10.	Análisis de criticidad	35
1.11.	Sistemas y subsistemas de una planta eléctrica de emergencia .	36
1.12.	Severidad	45
1.13.	Frecuencia.....	52
1.14.	El estándar SAE-JA1011 y la planta eléctrica de emergencia.....	61
1.15.	Diseño de una planta eléctrica de emergencia.....	67
1.15.1.	¿Qué se espera de una planta eléctrica de emergencia?	68
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	69
2.1.	Procedimiento vigente a la fecha	71
3.	PROCEDIMIENTO DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM.....	87
3.1.	Hoja de información.....	93
3.2.	Diagrama de decisión.....	97
3.3.	Hoja de decisión	100
3.4.	Procedimiento para la elaboración del plan de mantenimiento basado en el RCM II™ para una planta eléctrica de emergencia.....	105
3.5.	Hojas de información para una planta eléctrica de emergencia .	113
3.6.	Hojas de decisión para una planta eléctrica de emergencia	121
3.7.	Hojas de revisión o <i>checklist</i> para una planta eléctrica de emergencia.....	128

4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	135
4.1.	El mantenimiento preventivo y correctivo a la fecha de la planta eléctrica de emergencia.....	136
4.2.	Implementación de la metodología de divulgación de este trabajo.....	138
4.3.	Análisis externo	141
4.4.	Análisis interno	143
	CONCLUSIONES	145
	RECOMENDACIONES.....	147
	REFERENCIAS	149
	APÉNDICE.....	155

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Planta eléctrica de emergencia	1
2.	Triángulo de potencias	5
3.	Partes principales de una plana eléctrica de emergencia	6
4.	Diagrama de flujo de la elaboración del plan de mantenimiento basado en el análisis de fallos	19
5.	Los 5 por qué de TOYOTA	21
6.	La curva P - F	30
7.	Activos por mantener en una en una planta eléctrica de emergencia	36
8.	Matriz de criticidad.....	61
9.	Diagrama de flujo del procedimiento a la fecha.....	79
10.	Diagrama de decisión del RCM II™	98
11.	Diagrama de flujo del RCM II™ propuesto.....	114

TABLAS

I.	Criterios de severidad.....	46
II.	Criterios de frecuencia.....	59
III.	Procedimiento vigente a la fecha.....	71
IV.	Orden de servicio	82

V.	Fotografías del proceso a la fecha del mantenimiento preventivo de la planta eléctrica de emergencia	83
VI.	Placa de características o ficha técnica del equipo.....	91
VII.	Hoja de información	94
VIII.	Hoja de decisión.....	101
IX.	Procedimiento para la elaboración del plan de mantenimiento basado en el RCM II™ para una planta eléctrica de emergencia.....	105
X.	Hoja de información MCI/general.....	116
XI.	Hoja de información MCI/enfriamiento	117
XII.	Hoja de información MCI/combustible.....	118
XIII.	Hoja de información MCI/escape	119
XIV.	Hoja de información sistema eléctrico/generador eléctrico	119
XV.	Hoja de información sistema eléctrico/tablero de control	120
XVI.	Hoja de información sistema eléctrico - eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia.....	121
XVII.	Hoja de decisión MCI/general	123
XVIII.	Hoja de decisión MCI/enfriamiento	124
XIX.	Hoja de decisión MCI/combustible	125
XX.	Hoja de decisión MCI/sistema de escape	126
XXI.	Hoja de decisión sistema eléctrico/generador eléctrico	126
XXII.	Hoja de decisión sistema eléctrico/tablero de control	127
XXIII.	Hoja de decisión sistema eléctrico/sistema eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia	127
XXIV.	Hoja de revisión o <i>checklist</i> para el subsistema general del MCI	129

XXV.	Hoja de revisión o <i>checklist</i> para el subsistema de enfriamiento del MCI.....	130
XXVI.	Hoja de revisión o <i>checklist</i> para el subsistema de combustible del MCI.....	130
XXVII.	Hoja de revisión o <i>checklist</i> para el subsistema del escape del MCI	131
XXVIII.	Hoja de revisión o <i>checklist</i> para el subsistema del generador eléctrico en la planta eléctrica de emergencia	131
XXIX.	Hoja de revisión o <i>checklist</i> para el subsistema del tablero de control en la planta eléctrica de emergencia	132
XXX.	Hoja de revisión o <i>checklist</i> para el subsistema eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia	132
XXXI.	Secuencia fotográfica del proceso de instrucción al Supervisor de Electricidad de la institución donde se encuentra en equipo	139

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
KW	Kilovatios, medida de la potencia real.
KVA	Kilovoltioamperios, medida de la potencia aparente.
KVAR	Kilovoltioamperios reactivos, medida de la potencia reactiva.
RCM II™	Segunda versión del RCM.

GLOSARIO

Análisis causa efecto	Forma de organizar y representar las diferentes teorías propuestas sobre las causas de un problema. Se conoce también como diagrama de Ishikawa o diagrama de espina de pescado y se utiliza en las fases de diagnóstico y solución de la causa.
Análisis VOSOA	Herramienta del monitoreo de condición (CBM). Es un procedimiento no invasivo de análisis sensorial para detectar una condición anormal inminente en máquinas, equipos, sistemas, instalaciones, entre otros, cuyo nombre deriva de las iniciales de Ver, Oír, Sentir, Oler y Actuar.
CBM	<i>Condition Based Maintenance</i> o mantenimiento basado en condiciones, monitoreo basado en condición, mantenimiento predictivo (Pdm), mantenimiento de condición (CM), administración de pronósticos y salud (PHM), monitoreo de salud de equipos (EHM) o simplemente como inspecciones de mantenimiento preventivo (PM).
CCA	<i>Cold Cranking Amps</i> o capacidad de arranque en frío de una batería eléctrica.

CM	<i>Corrective Maintenance</i> o mantenimiento correctivo.
CT	<i>Current Transformer</i> o transformador eléctrico de corriente. Es un equipo o instrumento de medición.
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyse, Improve, control</i> o definir, medir, analizar, mejorar, controlar.
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i> o análisis de efectos y modos de falla.
Generador eléctrico	Es una máquina rotativa que transforma energía mecánica de rotación, en energía eléctrica. Puede haberlos como monofásicos, bifásicos y trifásicos.
Kaizen	Término japonés compuesto de las palabras <i>Kai</i> = cambio y <i>Zen</i> = bueno, para mejorar, es decir, una Mejora Continua. Para el Kaizen, el mantenimiento engloba a todas aquellas actividades que tienen como fin conservar los actuales estándares de tecnología, administrativos y principalmente operacionales, para mejorarlos en todos los aspectos.
Motor de combustión interna	O MCI, Es un motor de explosión, mecánico y que transforma en movimiento la energía

calorífica obtenida de la explosión del combustible al explotar dentro de los cilindros de este. Está compuesto de un cigüeñal, bielas, pistones, inyectores de combustible, entre otros.

MTBF *Mean Time Between Failures* o tiempo medio entre fallas.

Pareto Vilfredo Federico Pareto, cuyo nombre original era Wilfried Fritz Pareto, nació en París, Francia el 15 de julio de 1848 y falleció en Céligny, Suiza el 19 de agosto de 1923. Fue ingeniero, sociólogo, economista y filósofo italiano.

PM *Preventive Maintenance* o mantenimiento preventivo.

RCA *Root Cause Analysis* o análisis causa raíz.

RCM *Reliability Centered Maintenance* o mantenimiento centrado en la confiabilidad.

Reporte de fallas Reporte cuyo objetivo es determinar las causas que han provocado determinadas fallas, defectos o averías (sobre todo las averías repetitivas y aquellas con un alto costo) que afectan la seguridad de las operaciones de un equipo, instalación, maquinaria, método, entre otros, para adoptar medidas preventivas que las eviten.

Six Sigma

Método organizado y sistemático para la mejora continua de la gestión del mantenimiento, basado en métodos estadísticos para reducir drásticamente el porcentaje de defectos.

Stand-by

Modo de espera, guardia, suspensión, entre otros. En equipos electrógenos se denomina a aquellas plantas de emergencia que deben arrancar solo en caso de emergencia, es decir, en caso de falla del servicio normal de la compañía suministradora.

Caterpillar dice al respecto: *'These ratings are applicable for supplying continuous electrical power (at variable load) in the event of a utility power failure. No overload is permitted on these ratings. When used at stand-by rating the alternator will be peak continuous rated.'* (Caterpillar® Generator Sets, s. f., p. 5). (Estas clasificaciones son aplicables para suministrar energía eléctrica continua (a carga variable) en caso de una falla de energía de la red pública. La sobrecarga no está permitida en estas clasificaciones. Cuando se usa en la clasificación de espera, el alternador tendrá una clasificación de pico continuo.).

TBM

Time Based Maintenance o mantenimiento basado en tiempo.

TQM	<i>Total Quality Management</i> o gestión de la calidad total.
VAC	<i>Volts Alternating Current</i> o voltios de corriente alterna.
VDC	<i>Volts Direct Current</i> o voltios de corriente directa.

RESUMEN

En casi toda la industria y algunos comercios de Guatemala, es recurrente que se aplique el mantenimiento correctivo, es decir, se hacen trabajar los equipos hasta llevarlos a la falla y luego repararlos. En algunos casos ya se migró al mantenimiento preventivo, y en otros muy escasos se ha implementado el mantenimiento centrado en la confiabilidad o RCM cuya falta de conocimiento de sus beneficios es el punto de partida de este trabajo de graduación, realizado de mayo de 2019 a octubre de 2020, que propone un plan de mantenimiento, según los preceptos del RCM para una planta eléctrica de emergencia de 625 KVA, 480 VAC, *Stand-by*, localizada en una institución del Estado cuya falta de mantenimiento preventivo adecuado pueda afectar la disponibilidad de esta a la hora de un corte de energía eléctrica por parte de la compañía municipal de electricidad, con los consiguientes paros en la prestación de sus servicios.

De lo anterior se puede argumentar que el mantenimiento a la fecha para las plantas eléctricas de emergencia en el país es preventivo mayoritariamente y no asegura la disponibilidad del equipo ante una eventual falla debida a la naturaleza de este mantenimiento. La solución elaborada es un plan de RCM, basado en el monitoreo de condición, que asegura el servicio. Se encontraron previamente las causas de las fallas, indicando su modo de solución, de cómo evitarlas o reducirlas al mínimo, economizando con ello recursos por medio de un análisis pormenorizado y propio para el equipo, se definieron sus sistemas y subsistemas constructivos, se obtuvo información de sus fallas, y se propusieron decisiones para evitar su apareamiento planteando finalmente un nuevo programa de mantenimiento basado en la confiabilidad, que es el RCM.

El resultado es un plan de mantenimiento acorde al equipo y a sus características técnico constructivas que influirá en su confiabilidad y disponibilidad. Esto representa ventajas económicas como la reducción de inventarios de materiales, repuestos y de recursos humanos porque el personal dedicado a atender eventuales emergencias de mantenimiento correctivo podrá dedicarse a otras tareas que propicie la adquisición de un nivel cognitivo técnico más elevado. En este proceso debe involucrarse todo el personal, desde los mandos más altos de la institución o empresa hasta el nivel técnico. De esta forma se logran los beneficios del RCM, son conscientes de acciones que haya que tomar durante el proceso y están de acuerdo con ellas. En este proceso se invierte tiempo, pero el trabajo está hecho y se espera contar con la voluntad necesaria y debida concientización de las ventajas de este sistema de mantenimiento para echarlo a andar o aplicarlo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

El problema identificado es que frecuentemente las fallas de mantenimiento correctivo no se puedan prever. Como consecuencia los empresarios, el personal de mantenimiento y principalmente los usuarios del servicio del equipo sufren los inconvenientes de un paro imprevisto del equipo debido a fallas que se pudieron detectar con anticipación mediante la aplicación de los procedimientos recomendados por el RCM. Por ejemplo, las fallas prematuras de fajas de transmisión, sellado de las mangueras de lubricación, falla del termostato o de la resistencia de precalentamiento del agua del bloque del motor, o aún la falla del termostato del tapón del radiador, podrían haberse detectado aplicando herramientas del RCM con el apoyo del RCA.

A la fecha de investigación, la carencia de información adecuada, relevante y debidamente detallada que se enfoque en el RCM II™ para plantas eléctricas de emergencia y que no se rija a un procedimiento predeterminado, como aquellos tradicionales, afecta directamente al plan de mantenimiento y distorsiona o se pierde la línea de toma de decisiones adecuadas y que a mediano y largo plazo permitan obtener el beneficio principal del RCM II™ que es determinar las acciones necesarias a realizar para que la maquinaria, equipo, entre otros siga proporcionando el servicio que sus usuarios desean en sus buenas condiciones actuales, evitando aquellas fallas que cuenten con alguna probabilidad de ocurrir y por lo tanto ocasionen consecuencias graves, en otras palabras, aumentar la disponibilidad y disminuir los costos de mantenimiento.

Este trabajo se limita al equipo electrógeno descrito, es decir, una planta eléctrica de emergencia de 625 KVA, 480 VAC, con una clasificación *Stand-by*, localizada en una institución dedicada a la promoción de eventos sociales de todo tipo, ubicada dentro del perímetro de la ciudad de Guatemala.

Al realizar esta investigación se les presentará a los usuarios del equipo una ruta para implementar un plan de mantenimiento efectivo, actualizado a las últimas tendencias del mantenimiento que permitirá disponer de un equipo con una disponibilidad aceptable. En contraposición, si no se realiza, la tendencia se mantendrá, es decir, seguirá igual y estar sujetos a las fallas repentinas o súbitas, en cualquier momento o en aquellas circunstancias de realización de un evento social, que pudieran prevenirse mediante la implementación adecuada del RCM.

Pregunta central de investigación

¿Cómo se puede garantizar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de una planta eléctrica de emergencia (*Stand-by*) de una potencia de 625 KVA, 480 VAC?

Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es el procedimiento dentro del mantenimiento que se aplica a la fecha para obtener buenos resultados, aplicado a una planta eléctrica de emergencia?
- ¿Cuáles son los procedimientos adecuados que pueden aplicarse en el mantenimiento de una planta eléctrica de emergencia?

- ¿Cuáles rutinas del RCM II™ pueden incluirse, si no están aplicándose ya, en el plan de mantenimiento para una planta eléctrica de emergencia?
- ¿Cómo se dará a conocer a los encargados de mantenimiento, los conceptos o procedimientos del RCM II™ para una planta eléctrica de emergencia de 625 KVA, 480 VAC, tipo *Stand-by*?

OBJETIVOS

Objetivo general

Proponer un programa de mantenimiento centrado en la confiabilidad o RCM periódico para un sistema electrógeno de emergencia de una capacidad de 625 KVA, 480 VAC, *Stand-by*.

Objetivos específicos

- Determinar el procedimiento utilizado a la fecha para realizar el mantenimiento de una planta eléctrica de emergencia de 625 KVA, 480 VAC, *Stand-by*, localizada en una institución semiautónoma del Estado.
- Establecer los procedimientos o rutinas precisas y adecuadas enmarcadas dentro del RCM II™ que pueden aplicarse al mantenimiento de una planta eléctrica de emergencia, a través de la aplicación de procedimientos del RCA, Monitoreo de Condición y eventualmente análisis o monitoreos VOSOA.
- Establecer un medio de difusión, o socialización, de los resultados (procedimientos) de este trabajo a los involucrados en el mantenimiento de un sistema electrógeno de emergencia.
- Dar a conocer a los encargados de mantenimiento, los conceptos y procedimientos del RCM II™ para la planta eléctrica de emergencia de 625 KVA, 480 VAC, tipo *Stand-by*.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

En este apartado se explicará el diseño de la investigación, el tipo de estudio, las variables e indicadores y las fases de investigación para el análisis de este trabajo, siendo el resultado de la aplicación sistemática y lógica de los conceptos y fundamentos a exponer en el marco teórico.

Se incluye la información recolectada, el diseño del estudio y el procedimiento para llevarlo a cabo como ya se indicó arriba, la técnica de análisis utilizada, los enfoques tomados en cuenta y la muestra del estudio y de la información recolectada.

Diseño de la investigación

El enfoque aplicado en la realización de este estudio fue de índole cualitativo porque se consideran condiciones puramente de corte circunstancial o que refieren a situaciones actuales y propuestas sobre la constitución electromecánica de una planta eléctrica de emergencia, tomando alguna información de equipos similares más, principalmente, la inspección visual, el historial del equipo y la experiencia del autor.

Este enfoque cualitativo se realizó mediante la redacción de las hojas sugeridas por el RCM, como lo son las hojas de información, diagrama de decisión y hojas de decisión contenidas todas estas en la bibliografía de Moubray (2004), y las hojas de revisión o *checklist* redactadas por el autor, tomando los estándares y normas como las de ISO y SAE-JA como referencias para los procedimientos, por ejemplo.

Finalmente se realizó una infografía para socializar ante el personal que se dedica a ejecutar (externo) y a supervisar la puesta en marcha del RCM, una vez sea aprobada por el siguiente nivel jerárquico superior a la supervisión de la institución o empresa en donde se encuentra el equipo.

Tipo de estudio

El estudio presentado refiere al mantenimiento de una planta eléctrica de emergencia desarrollando toda aquella documentación sugerida por el RCM para presentar un estudio adaptado específicamente al equipo en cuestión permitiendo llevar a cabo un análisis comparativo entre el mantenimiento preventivo que se le realiza a la fecha al equipo y aquel diseñado exclusivamente para dicho equipo tomando en cuenta sus características propias, mostrándose los logros obtenidos con la documentación ya enunciada y recomendada por Moubray (2004).

VARIABLES E INDICADORES

En este inciso se muestran las variables del estudio, así como los indicadores que sirvieron para medirlas.

VARIABLES

Las variables de este estudio son el reporte de la situación actual del mantenimiento al equipo, es decir, el preventivo. También el reporte de procedimientos o rutinas a alcanzar con este estudio. Asimismo, las rutinas de inspección según el monitoreo de condición y eventualmente el RCA para finalmente llegar a los procedimientos (hojas) del RCM.

Indicadores

Los indicadores de este trabajo se muestran tal como el procedimiento del mantenimiento preventivo a la fecha, la recopilación y formas para llevar a cabo las rutinas del RCM para la planta eléctrica de emergencia, o sea, la inspección visual en campo, la recopilación de información bibliográfica y la experiencia del autor, para tener finalmente el informe de los procedimientos y metodología aplicables del RCM.

Fases de investigación

- Fase 1. La revisión documental consistió en la selección, lectura y adecuación de literatura de los antecedentes del problema y el Marco Teórico relativo al mismo.
- Fase 2. Se determinaron los procedimientos a la fecha de la investigación, del mantenimiento preventivo y correctivo, tanto mecánico como eléctrico, para una planta eléctrica de emergencia y resolver si es lo que se espera de ellos cuando se efectúan estos mantenimientos, desde el reporte y su forma de redacción, para reportar este mantenimiento, así como las técnicas empleadas, si es que se tiene alguna.
- Fase 3. Se precisaron los procedimientos o rutinas del RCM que podrían aplicarse al caso específico del mantenimiento preventivo, tanto mecánico como eléctrico, para una planta eléctrica de emergencia, previéndose un enfoque tipo descriptivo de procedimientos en la elección y adecuación de lineamientos de funcionamiento del equipo.

- Fase 4. Enlistar las rutinas adecuadas y enmarcadas dentro del RCM, por medio de la aplicación de procedimientos del Monitoreo de Condición y eventualmente análisis VOSOA para la propuesta final o redacción de un plan de RCM para implementarlo en el mantenimiento, tanto mecánico como eléctrico, de una planta eléctrica de emergencia, así como crear órdenes de trabajo y hojas de verificación o *checklist*.

Una vez finalizada la etapa descrita anteriormente, quedará la socialización del estudio y principalmente con las personas del nivel jerárquico superior a la Supervisión para su conocimiento y autorización del plan y de su aplicación o ejecución en el equipo ya indicado.

El enfoque aplicado en la realización de este estudio es de tipo cualitativo, o sea, consistió en un análisis cualitativo porque se realizó mediante la selección y revisión de la información de antecedentes que se tienen a la fecha sobre el mantenimiento que se le proporciona a la planta eléctrica de emergencia y en la elección y adecuación de lineamientos de funcionamiento de estos equipos, referenciándolo al marco teórico. También se evidenció que no se aplica un análisis previo al equipo para determinar sus necesidades reales de mantenimiento. Posteriormente se analizó, según lo indicado en el marco teórico, el análisis de los dos sistemas del equipo, a saber, el MCI y el sistema eléctrico, determinando cada uno de sus componentes susceptibles de análisis, la revisión en campo del equipo y la inspección de sus subsistemas para tener la información exacta de ellos.

Después, se enlistaron las rutinas adecuadas y enmarcadas dentro del RCM, por medio de la aplicación de procedimientos del RCA, monitoreo de condición y eventualmente análisis VOSOA para la propuesta final o redacción de una hoja de revisión o *checklist* de RCM para implementarlo en el

mantenimiento, tanto mecánico como eléctrico, de una planta eléctrica de emergencia.

Con esta información se redactaron las hojas de información, hojas de decisión (según el diagrama de decisión del RCM II™) para finalmente concluir en las hojas de revisión o *checklist*.

Una vez finalizada la etapa descrita anteriormente, quedará la socialización del estudio y principalmente de las conclusiones alcanzadas con las personas del área administrativa para su conocimiento y autorización del Programa y de su aplicación o ejecución en el equipo ya indicado.

INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación y análisis se centró en el diseño de un programa de mantenimiento adecuado para garantizar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de una planta de emergencia que consiste en motor de combustión interna y su generador eléctrico, ambos con toda la aparamenta necesaria para su control, regulación y protección. Dicho equipo tiene una clasificación *Stand-by*, con una capacidad de generación de potencia de 625 KVA, generando en 480 VAC, dicho en otras palabras, es un emprendimiento al tema del RCM para plantas eléctricas de emergencia. Es necesario aclarar que no se incluye en este trabajo la transferencia automática (ATS) porque este tema escapa al alcance del trabajo.

A la fecha no se encontraron investigaciones anexas que se refieran al tema de esta investigación, siendo esto en lo que radica la utilidad del presente trabajo, porque aportó los conocimientos o bases para futuros trabajos relacionados al tema. Adicionalmente se utilizó como base para la elaboración del programa de mantenimiento el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), que es otra innovación en aportes técnicos y literarios de este tipo.

La problemática por trabajar consistió en estructurar un plan de RCM para aplicarlo a una planta de emergencia, el cual no existe a la fecha, existiendo carencia de información relevante a este propósito para plantas de emergencia.

Se considera que este estudio aporta la propuesta de un sistema de mantenimiento que explica qué debe hacerse para asegurar que la planta eléctrica de emergencia continúe trabajando adecuadamente como sus usuarios

quieren que lo haga en el contexto de su situación actual, considerando como premisa que el objetivo del RCM es aumentar la disponibilidad y disminuir costos de mantenimiento de un equipo, maquinaria, instalación, entre otros. En otras palabras, preservar la función del equipo, yendo más allá de quedarse con la cuantía de información de fallas, su origen y tiempo de duración que es la información que tradicionalmente se obtiene del mantenimiento preventivo contratado y aplicado al equipo, a la fecha.

Además, todas las personas que se involucren en el grupo de trabajo que participa en el acopio de información alcanza un alto aprendizaje para el mantenimiento y operación de la planta eléctrica de emergencia.

Aporta los conocimientos o bases para futuros trabajos relacionados al RCM, debido a que este proceso se llevó a cabo en forma adecuada, completa y correcta, es decir, con el rigor científico necesario.

Se aclara que cada plan de RCM es exclusivo para el equipo analizado, por lo que este trabajo podrá aportar los conocimientos, bases o referencias para futuros trabajos relacionados al tema, pero nunca como una guía fiel a seguir.

Para alcanzar los resultados esperados de este trabajo, se levantó una ficha técnica del equipo, es decir, del motor de combustión interna y del generador eléctrico, luego se analizaron los registros existentes, es decir, las listas de verificación o *checklist*, de las intervenciones de mantenimiento preventivo cuatrimestral que existen para luego, tomando como referencia estos y los reportes de esporádicos mantenimientos correctivos que se han tenido, se desarrollarán las herramientas (documentos) de control, registro y seguimiento sugeridos por el RCM, que como principal componente de auxilio cuenta con el monitoreo de condición.

En el capítulo I, se desarrollaron los conceptos fundamentales de una planta eléctrica de emergencia, es decir, la potencia que puede generar, sus equipos constitutivos, sus sistemas o equipos periféricos de control, de medición y de suministro de combustible, lubricante y refrigerante. Asimismo, los conceptos de mantenimiento preventivo, correctivo, mantenimiento centrado en la confiabilidad o RCM, sus herramientas, funciones, parámetros de funcionamiento, fallas funcionales, modos y efectos de falla, sus herramientas e implementación.

En el capítulo II se desarrolló la investigación, en ella se identificó y determinó el mantenimiento aplicado a la planta eléctrica de emergencia a la fecha de este proceso. Este procedimiento consta de un mantenimiento preventivo estándar aplicable a todas las empresas que contratan estos servicios y que no evalúa los aspectos específicos del equipo.

En el capítulo III se desarrolló el procedimiento de implementación del RCM, tomando como fundamento el aporte técnico-teórico expuesto en el Capítulo I acerca de los sistemas y subsistemas del equipo. En él se desarrollaron las hojas de información, se mostró el diagrama de decisión del RCM, las hojas de decisión y con esta información se procedió a elaborar el plan de mantenimiento basado en el RCM II™. Se redactaron sus hojas de información, y hojas de decisión para diseñar las hojas de revisión o *checklist* para el equipo.

Finalmente, en el capítulo IV se discuten los resultados acerca del mantenimiento preventivo y correctivo a la fecha. Luego, se discute y plantea la implementación de la metodología de divulgación de este trabajo, agregándole la discusión del análisis externo y análisis interno encontradas en el desarrollo del trabajo, para darle la factibilidad y sustentación metodológica necesaria debido a que se cuenta con el conocimiento y suficiente habilidad en la puesta en práctica de las herramientas pertinentes del RCM.

1. MARCO TEÓRICO

Se presenta el fundamento teórico que respalda a esta investigación. Permite conocer el desarrollo de los conceptos teóricos y prácticos para la implementación del RCM a una planta eléctrica de emergencia.

1.1. ¿Qué es una planta eléctrica de emergencia?

Una planta eléctrica de emergencia, o sistema electrógeno de emergencia, es una maquinaria o equipo capaz de ser transportado y que transforma energía mecánica de un motor diésel estacionario, por ejemplo, en energía eléctrica lista o disponible para su uso.

Figura 1. **Planta eléctrica de emergencia**



Fuente: Caterpillar.com. *Grupo Electrónico Diésel de 500 a 600 KW*. Consultado el 2 de junio de 2019. Recuperado de https://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/electric-power/diesel-generator-sets/1000028985.html.

Una planta de emergencia no crea energía eléctrica, utiliza la rotación de las partes internas (cigüeñal) de su motor de combustión interna para alcanzar el

movimiento de cargas eléctricas (motores eléctricos, transformadores, entre otros) en el circuito eléctrico conectado a ella. (Mayatrac, S. A. octubre, 1991, curso *Aplicación e Instalación de Generadores Caterpillar*. Curso llevado a cabo en la ciudad de Guatemala, Guatemala).

Las plantas de emergencia también se emplean frecuentemente en localidades en desarrollo (pueblos apartados de las grandes ciudades y por lo mismo de las líneas de transmisión principales de energía eléctrica comercial) y otras áreas no conectadas a la red eléctrica. También se utilizan en lugares donde los cortes de energía eléctrica son frecuentes o donde una falla en el suministro eléctrico puede causar problemas significativos o peligrosos, como en laboratorios aeroespaciales, estaciones de policía y bomberos, entidades de atención de emergencias, excavaciones bajo tierra, entre otros. (Mayatrac, S. A. octubre, 1991, curso *Aplicación e Instalación de Generadores Caterpillar*. Curso llevado a cabo en la ciudad de Guatemala, Guatemala).

También pueden servir como fuentes principales o complementarias de energía durante las horas pico de uso cuando resulta más barato generar a través de estos equipos que utilizar el servicio comercial de energía eléctrica.

Finalmente, la ubicación de una planta de emergencia:

- Deberá estar cerca de los edificios a respaldar.
- No causará molestias por el ruido y las posibles vibraciones.
- Deberá garantizársele un suministro adecuado de aire para enfriamiento, tanto en cantidad como en temperatura y limpieza.

- Tener facilidades para el suministro de combustible.
- Tener buena accesibilidad al área.
- El acceso al local de la planta eléctrica de emergencia estará limitado solamente a personal autorizado. (Blandino, 2013, p. 23)

1.2. Potencia eléctrica de una planta eléctrica de emergencia

Generalmente las plantas eléctricas de emergencia, al igual que los transformadores eléctricos, se designan, entre otros pero principalmente, por la potencia eléctrica que pueden generar, que es una característica fundamental a la hora de la compra, y sabiéndose que la mayoría de estos equipos y el que interesa en este trabajo son trifásicos, debe hacerse un análisis de un sistema de potencia trifásico que básicamente es un arreglo de dos vectores en cuadratura como lo son la Potencia Real (KW) y la Potencia Reactiva (KVAR), siendo su vector suma la Potencia Aparente (KVA).

Debe entenderse que la potencia real \vec{P} , es la potencia expresada o medida generalmente en watts o kilowatts, que las cargas reciben, entendiéndose por estas aquellos equipos o máquinas eléctricas que demandan energía eléctrica para proporcionar el servicio para el que fueron diseñadas, mientras que la potencia reactiva \vec{Q} , es la potencia que no llega a las cargas ya descritas, sino que se pierde en procesos de magnetización de campos magnéticos de motores, transformadores, entre otros. Y como ya se dijo antes, la suma vectorial de estas dos potencias, representadas geométricamente como vectores, es la potencia aparente \vec{S} .

El ángulo φ es aquel que mide la abertura, o separación angular, entre el vector de la potencia real y el vector de la potencia aparente, y su coseno es

llamado factor de potencia, fp, que puede asumirse como una medida de eficiencia debido a que mientras mayor sea su valor, o en otras palabras, el valor escalar de la potencia aparente se acerque más al valor escalar, también, de la potencia real (y el ángulo entre ambas potencias sea menor) la carga eléctrica tendrá menos pérdidas por magnetización, es decir, consumirá menos potencia reactiva y por lo tanto el uso de la potencia será más eficiente.

De lo anterior se infiere que el vector de la potencia aparente (KVA) es el vector de la potencia total que consume un equipo eléctrico (KW + KVAR), es decir:

$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q}$$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$$

Para sistemas trifásicos, esta será:

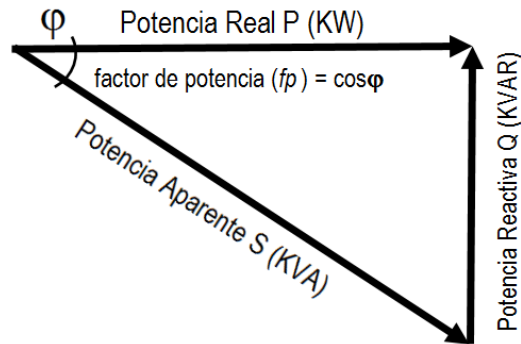
$$S = V \times I \times \sqrt{3}$$

Ahora, del triángulo de potencias se deduce que:

$$P = S \times \cos \varphi = V \times I \times \sqrt{3} \times \text{fp}$$

Una ecuación muy útil para el cálculo de los kilovatios consumidos por una determinada carga inductiva.

Figura 2. Triángulo de potencias



Triángulo de potencias

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Edminister. (s.f.) *Circuitos eléctricos*.

Ahora ¿por qué se designan las plantas de emergencia por su potencia aparente y no por la real o reactiva? La respuesta es que se considera que en un sistema eléctrico con componentes inductivos (motores, transformadores) y capacitivos (condensadores o capacitores, líneas de transmisión muy largas, entre otros) los fasores de corriente y voltaje no giran al mismo tiempo, o en fase, sino con cierto desfase entre ambos. Este desfase se generará, en las plantas de emergencia por la acción de los equipos inductivos y capacitivos de las cargas eléctricas conectadas a ellas.

La diferencia de fase permite que una parte de la energía generada no llegue a las cargas eléctricas conectadas a la planta de emergencia (sistemas de iluminación, motores, entre otros) sino que las cargas inductivas y capacitivas la absorban y liberen continuamente.

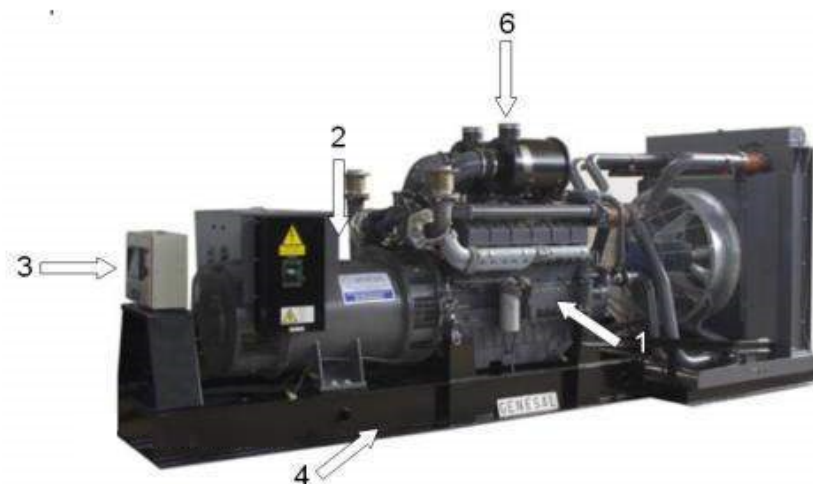
1.3. Componentes principales de una planta eléctrica de emergencia

Una planta de emergencia es una máquina compuesta esencialmente por dos equipos, a saber: un motor de combustión interna tipo diésel o a gasolina y

un generador eléctrico generalmente trifásico, acoplados mediante el eje del cigüeñal del primero al eje del rotor del segundo y de una potencia eléctrica generada desde unas pocas decenas de kilovoltamperios (KVA) hasta varios miles de ellos (MVA).

Figura 3. Partes principales de una planta eléctrica de emergencia

1. Motor
2. Alternador
3. Cuadro eléctrico de mando y control
4. Una bancada de apoyo
5. Sistema de combustible
6. Un sistema de gases de escape



Fuente: Blandino. *Diseño de sistema eléctrico con planta eléctrica de emergencia con planta eléctrica de emergencia controlado por PLC en los laboratorios de computación pabellón 11 y electrónica pabellón 21 de la facultad de ciencias e ingenierías de la UNAN-MANAGUA.*

Consultado el 14 de agosto de 2019. Recuperado de <http://repositorio.unan.edu.ni/5367/1/14711.pdf>.

Según explica Blandino (2013) una planta eléctrica de emergencia cuenta con varios equipos auxiliares o periféricos que le ayudan a proporcionar un servicio seguro y bajo condiciones controladas, tales como:

En el motor estacionario de combustión interna: principalmente,

- Un sistema de refrigeración o radiador para enfriar, por medio de una fuerte corriente de aire al agua que a su vez enfría el motor.
- Un sistema de escape que consta de tubería y accesorios desde el turbocargador, un tubo flexible o amortiguador de vibraciones, el silenciador y finalmente el tubo de descarga para los gases de escape hacia el exterior.
- Generalmente, dos baterías de 24 VDC cada una y una CCA de alrededor de 1,100 Amperios, medida a -18° C.
- Un tanque de combustible y/o un 'tanque diario' generalmente ubicado este en un marco metálico, en el medio de la estructura metálica de la base de la planta.
- Una trampa de agua a la entrada de la planta para el combustible.
- El sistema de filtrado que consiste en un filtro para combustible, uno para aceite y otro para aire, entre otros.

En el generador eléctrico:

- Un generador eléctrico que tiene conectados tres transformadores de corriente, CT o donas, que transforman la corriente generada a valores seguros para su medición.
- También cuenta con conexiones eléctricas debidamente aisladas y,

- Conexiones de salida hacia el tablero de control.

Cuenta con varios equipos auxiliares o periféricos que le ayudan a proporcionar un servicio seguro y bajo condiciones controladas, tales como:

Equipos periféricos:

- Un cargador automático de baterías que monitorea constantemente el nivel de carga de estas y cuando este cae de cierto nivel, comienza a cargarlas.
- Un tablero de control que recoge parámetros tanto eléctricos como mecánicos, es decir, voltaje de las baterías, voltaje de salida del generador, RPM del generador y temperatura de la camisa de agua del bloque del motor de combustión interna.
- Un interruptor termomagnético a la salida hacia la transferencia automática o ATS por sus siglas en inglés.

1.4. Mantenimiento preventivo (PM)

Este tipo, o clase, de mantenimiento consiste en que los operarios realicen tareas básicamente de lubricación, limpieza y revisiones a la maquinaria o equipo a su cargo mientras esta está en funcionamiento con el fin de preservar su vida útil.

Se hace por recomendaciones de los fabricantes después de un determinado tiempo de uso, por normas de uso de carácter legal o por inspección de técnicos expertos. La prevención en el mantenimiento de cualquier tipo de

herramienta resulta fundamental para garantizar su buen funcionamiento y alargar su vida útil.

Mejía (2020) aclara que el objetivo fundamental del mantenimiento preventivo es prolongar la vida útil de los equipos, previniendo a tiempo las fallas e incidencias que se puedan presentar por falta de mantenimiento. Generalmente consiste en el cambio de piezas que presentan desgaste, el cambio de lubricantes, calibración, pintura y demás materiales anticorrosivos.

Siguiendo con Mejía (2020), las características principales del mantenimiento preventivo son las siguientes:

- Se realiza de forma periódica y rutinaria.
- Es un tipo de mantenimiento cuyas tareas y presupuestos son planificadas. Tiene un tiempo de inicio y de culminación.
- Se realiza en condiciones de control total para evitar accidentes, mientras el equipo está parado.
- Se busca anticipar las futuras fallas o daños de los equipos.
- El fabricante generalmente recomienda cuándo hacerlo, a través de manuales técnicos.
- Las actividades que se realizan siguen un programa previamente elaborado.
- Ofrece la posibilidad de actualizar la configuración técnica de los equipos.

Desde el punto de vista del RCM, el mantenimiento preventivo tiene dos subclasificaciones, a saber:

- *Reacondicionamiento cíclico*: consiste en realizar ajustes de torsión, presión, tensión, entre otros, a un elemento mecánico de manera constante y cíclica.
- *Sustitución cíclica*: consiste en realizar cambios de piezas de manera periódica y cíclica.

1.5. Mantenimiento correctivo (CM)

Este tipo de mantenimiento, que se conoce también como mantenimiento reactivo, en general se realiza posteriormente a haber ocurrido una falla en alguna maquinaria o equipo detectada mediante una revisión y tiene como objetivo corregir los daños ocurridos en este.

Una vez ha sucedido la falla, el trabajo relativo a este tipo de mantenimiento consiste en cambiar la, o las, piezas dañadas o en ejecutar las reparaciones que se necesiten para poner en funcionamiento de nuevo, y en el menor tiempo posible, la maquinaria o equipo.

Este tipo de mantenimiento es útil en empresas con poca carga de producción y donde no se produzcan muchas averías por la naturaleza del trabajo. En estos casos sería más caro realizar planes de mantenimiento que el beneficio que se obtendría de ellos. (Aroca, 2019, sin página)

1.6. El plan de mantenimiento

El primer paso para elaborar un plan de mantenimiento, en general, es conocer cuáles son los equipos a los que se les desea realizar mantenimiento. Para una planta eléctrica de emergencia, se considera que está compuesta, básicamente, de un motor diésel de combustión interna o MCI, un generador eléctrico y su panel de control.

Para tener un mejor concepto y referencia y comprender así qué es un plan de mantenimiento centrado en la Confiabilidad o RCM, será de ayuda considerar primero qué es la implementación del RCM y luego los criterios de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad.

1.7. Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)

El viejo paradigma del mantenimiento decía, entre otras cosas, que el mantenimiento se ocupa de la preservación de los activos físicos. Luego el concepto cambió a algo más moderno como que el mantenimiento se ocupa de la preservación de las funciones de los activos de la empresa. (Moubray, 2004, p. 7)

Con el advenimiento, o desarrollo del concepto de RCM que registra su origen allá por los años 60s y 70s, en la industria de la aviación de los Estados Unidos de América, como una técnica de confiabilidad y que comenzó a definirse en forma detallada en 1978 por los ingenieros Howard Heap y Stanley Nowlan de *United Airlines* para el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual. (PdM Tech, 2017, sin página).

El proceso de RCM formula siete preguntas acerca del sistema o activo que se intenta revisar:

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ¿En qué sentido es importante cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Ahora, previo a desglosar las funciones del activo a analizar, se debe conocer el contexto en el que funciona el equipo, por ejemplo, indicando cuál es su régimen de operación, los objetivos de calidad, medio ambiente y seguridad industrial, la mano de obra y repuestos disponibles, qué sucedería si el equipo no estuviese disponible, entre otros. (Moubray, 2004, p. 7)

Posteriormente, esta filosofía evolucionó al RCM II™, que principalmente:

- Cambia para hacer énfasis en los riesgos a la salud y al medio

ambientales.

- Aclara la forma para definir las Funciones de los equipos.
- Desarrolla reglas más exactas para escoger las tareas e intervalos de los mantenimientos.
- Agrega criterios de cuantificación de los riesgos que se aplican directo a la fijación de los intervalos de tareas de búsqueda de fallas.

Actualmente se está migrando al RCM3, desarrollando reglas más precisas para elegir las tareas e intervalos de mantenimiento e incorporando criterios cuantitativos de riesgo aplicable directamente a la fijación de los intervalos de tareas de búsqueda de fallas.

RCM II™ y RCM3 tienen varios cambios en las preguntas que se hacen y la forma en la que abordan la forma de responder a esas preguntas, la manera de identificar las fallas, consecuencias de fallas, modos de falla y cómo enfocarlo en el proceso para conseguir un exitoso programa de mantenimiento. A pesar de que hay diferencias significativas en los diferentes puntos y principalmente en la manera que abordan y tratan el riesgo de fallas, el objetivo y principio del RCM sigue siendo el mismo: alcanzar la confiabilidad de los equipos, es decir, hacer que los equipos continúen haciendo lo que los usuarios quieren que hagan.

Los cambios principales están en el enfoque y trato que se le da al riesgo de falla (va en un nivel más detallado sobre cómo identificar, categorizar y tratar las fallas y sus consecuencias) y en la intención de asociar esta actualización de la metodología con estándares ISO como ISO 55000 (Gestión de activos) e ISO 31000 (Gestión de riesgos).

1.7.1. Las funciones y parámetros de funcionamiento

Previo a decidir qué debe hacerse para que cualquier maquinaria o equipo siga ejecutando lo que se espera de él en su situación actual, son necesarias dos cosas:

- Determinar exactamente qué es lo que los usuarios desean que ejecute y,
- Asegurarse que la maquinaria o equipo es capaz de ejecutar lo que se espera que haga.

El primer inciso puede dividirse en dos categorías, a saber:

- Funciones primarias o sea la razón de la compra de la maquinaria o equipo, es decir, velocidad, producción, capacidad, servicio al cliente, entre otras.

Funciones secundarias o aquellas adicionales a las primarias.
(Moubray, 2004, p. 8)

1.7.2. Fallas funcionales

Son los estados de falla, cuando las máquinas y equipos no pueden cumplir su función de acuerdo con el parámetro que el usuario espera o considera aceptable.

El RCM requiere que es necesario definir todas las fallas que una maquinaria o equipo pueden sufrir:

- Determinar qué circunstancias ocurrieron para llevar a la falla a la maquinaria o equipo.
- Deben identificarse aquellas circunstancias o eventos que pudieron ser la causa que la maquinaria o equipo fallara.

Esta función, en el RCM, incluye fallas totales (pérdidas totales) y parciales que son aquellas que una vez aparecidas permiten el funcionamiento de las máquinas y equipos, pero con un desempeño inaceptable, lo cual es claro luego de haber puesto en blanco y negro las funciones y parámetros del funcionamiento de la maquinaria y equipos. (Moubray, 2004, p. 9).

1.7.3. Modos de falla

Son los eventos, circunstancias o hechos por medio de los cuales se manifiesta la falla e indica el proceso en que las fallas ocurren, o pueden ocurrir.

Estos modos de falla deben ser razonablemente posibles e incluyen fallas ya acaecidas en equipos similares que trabajan bajo las mismas circunstancias, fallas que en este momento están siendo prevenidas y fallas que no han acaecido pero que a través de las inspecciones son consideradas de ocurrencia muy probable. No debe pasarse por alto las fallas causadas por errores humanos, así como errores de diseño. (Moubray, 2004, p. 9)

1.7.4. Efectos de falla

Estos indican lo que ocurre en cada modo de falla en términos de sus consecuencias. Esta metodología puede aplicarse de forma proactiva como reactiva, es decir, a fallas que no han sucedido previniendo fallos más severos o potenciales y fallas ya manifiestas de las cuales se conocen sus consecuencias.

Es importante considerar los siguientes aspectos a evaluar:

- ¿La falla presenta síntomas evidentes antes de manifestarse?
- ¿Se despliega alguna(s) alarma(s) durante el fallo?
- Velocidad de degradación de la falla.
- ¿La falla pone en riesgo la seguridad de las personas o del equipo?
- ¿Existen riesgos de explosión o electrocución?
- ¿La falla pondría en riesgo el prestigio de la empresa o a la misma empresa?
- ¿Podría haber consecuencias en el medio ambiente?
- ¿Es fácil de detectar la falla?

El RCM ve que las consecuencias de las fallas son más importantes que sus características técnicas. De lo anterior se consideran cuatro tipos de consecuencias.

Estas son:

- Consecuencias de fallas ocultas o no evidentes, no se advierte que han sucedido o que están presentes, sino se evidencian hasta la hora de requerir la función del equipo afectado, por ejemplo, el interruptor de tiro de una alarma contra incendios, que por falta de mantenimiento no ha sido accionada, podría no activarse cuando se requiera.
- Consecuencias ambientales y para la seguridad, están asociadas a la pregunta ¿En caso de que la falla tuviera lugar podría herir o matar a alguna persona o violar alguna reglamentación relativa al medio ambiente?, es decir, están asociadas a su impacto por ocurrencia en la seguridad de las personas, así como atentados contra el ambiente.
- Consecuencias operacionales, se refieren a las afectaciones en la cantidad de producción, calidad, servicio o costos, los costos de reparación no se consideran como operacionales.
- Consecuencias no-operacionales, no afectan la producción, la seguridad ni el medio ambiente, por lo que la consecuencia es solo el costo de la reparación.

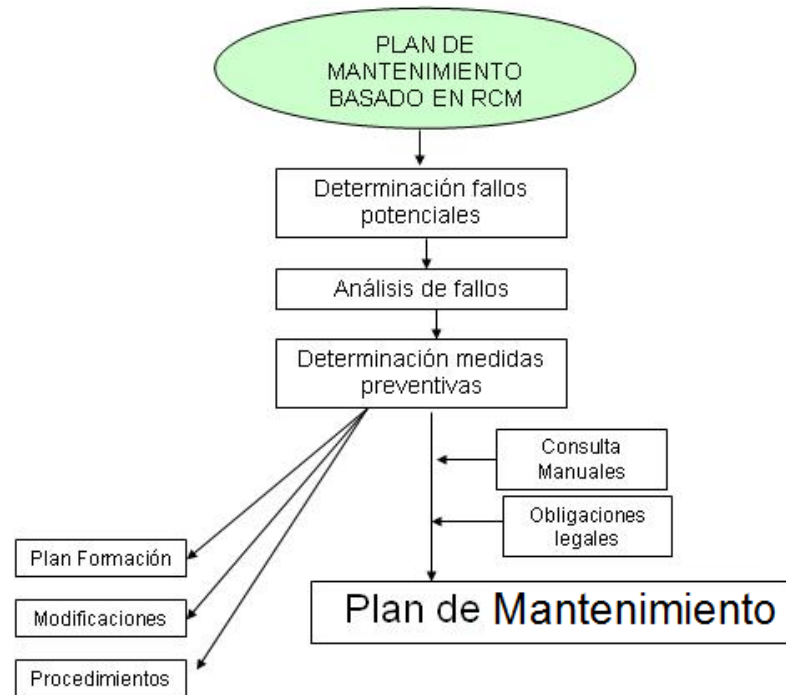
Las técnicas de manejo de fallas se dividen en dos categorías:

- Tareas proactivas, es decir, aquellas efectuadas antes que ocurra una falla (Mantenimiento Predictivo, Preventivo o según el RCM reacondicionamiento cíclico, sustitución cíclica, y mantenimiento a condición).
- Acciones a falta de y tratan directamente con el estado de falla, y aparecen cuando no es posible identificar una tarea proactiva efectiva. Incluyen la búsqueda de la falla, rediseño y mantenimiento a rotura. (Moubray, 2004, p. 12)

1.7.5. Las herramientas el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM)

El mantenimiento centrado en la confiabilidad o RCM va tras el estudio de fallos, no sólo se obtiene un plan de mantenimiento que trata de evitar los fallos potenciales y previsibles, sino que además aporta información valiosa para elaborar o modificar el plan de formación, el manual de operación y el manual de mantenimiento:

Figura 4. **Diagrama de flujo de la elaboración del plan de mantenimiento basado en el análisis de fallos**



Fuente: Mantenimiento Petroquímica. *Diferencias entre un plan de mantenimiento inicial y uno basado en rcm*. Consultado el 21 de julio de 2019. Recuperado de <http://mantenimientopetroquimica.com/index.php/herramientas-habituales/30-rcm#top>

En la figura 4 se observa que existen muchas herramientas que pueden utilizarse para el estudio y principalmente la implementación del RCM, siendo éstas, entre muchas:

FMEA es una parte integral del proceso del RCM y se refiere a las preguntas 2, 3 y 4 de las 7 listadas en el inciso 1.7. Esta es una técnica que identifica los modos potenciales de falla de un dispositivo o producto, determina los efectos de estas fallas y evalúa la importancia de la falla.

RCA la evaluación sistemática de problemas para encontrar las causas básicas, que cuando se corrigen, previenen o reducen significativamente la probabilidad de recurrencia.

El análisis de los 5 por qué es una parte integral del *Kaizen* en el Sistema de Producción de Toyota y la Filosofía de Manufactura Esbelta (*Lean Manufacturing*) El proceso se basa en la suposición de que si se pregunta ¿por qué? cinco veces a un problema específico, determinará la causa raíz del problema. Las acciones deben ser implementadas para eliminar la causa raíz. (Brunner, 2019, sin página)

El objetivo de esta técnica es:

- Descubrir la información vital de una forma sistemática,
- Analizar las causas ocultas y,
- Desarrollar preguntas perspicaces que requieran de soluciones creativas.

Los pasos que se deben seguir para usar esta herramienta serán:

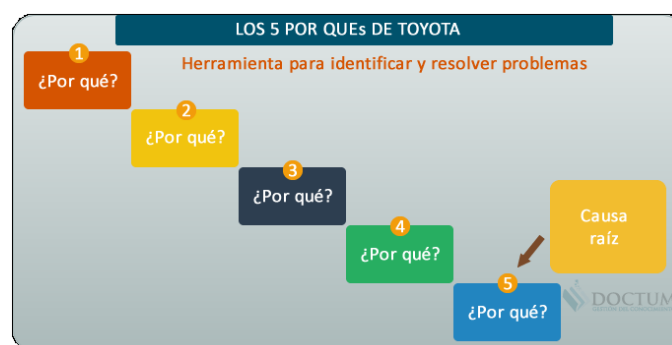
Paso 1. Identificar el problema, la oportunidad de mejora, la situación disconforme.

Paso 2. Preguntarse el porqué de este problema.

Paso 3. Preguntarse el porqué de la respuesta dada en el paso 2.

Paso 4. Preguntarse el porqué de la respuesta del paso 3 y así sucesivamente hasta que la respuesta ha llegado a la idea o solución más acertada y viable. (Montes, 2017, sin página).

Figura 5. Los 5 porqués de TOYOTA



Fuente: Doctum gestión del conocimiento. *Los 5 porques de Toyota: una técnica para identificar y resolver problemas*. Consultado el 26 de mayo de 2019. Recuperado de <https://www.doctum.cl/los-5-porques-de-toyota-una-tecnica-para-identificar-y-resolver-problemas/>.

Diagrama causa-efecto o de Ishikawa. Se desarrolló en los años 60 y fue una creación de Kaoru Ishikawa. El diagrama es fundamentalmente una herramienta de lluvia de ideas que agrupa las posibles causas de un problema en encabezados amplios. Estas se evalúan para determinar las causas más probables del problema, de modo que se puedan desarrollar soluciones. El diagrama Causa-Efecto es útil para determinar 'qué podría' haber causado un problema. Esta herramienta puede considerarse como un 'análisis superficial' y no debe verse como una herramienta completa para su uso en problemas complejos. (Brunner, 2019, sin página)

Six Sigma. Es un conjunto de prácticas desarrollado por Motorola en los años 80 y está estrechamente relacionado con la filosofía TQM de involucrar a todos en el proceso de reducción de la variación y eliminación de defectos. Los pasos del proceso Six Sigma se denominan 'DMAIC' y, en relación con la confiabilidad del equipo, podrían aplicarse al mantenimiento de las siguientes maneras: (Brunner, 2019, sin página)

1. Definir. Seleccione y defina proyectos apropiados que se alineen con las necesidades del negocio. Esto puede determinar qué equipo requiere un nuevo desarrollo de la estrategia basado en una confiabilidad deficiente.
2. Mida las variables del proceso, como el MTBF y los modos de falla recurrentes de un equipo.
3. Analice los datos recopilados utilizando técnicas gráficas para comprender las causas de las fallas.
4. Mejore la confiabilidad de los activos mediante la aplicación de técnicas de mejora continua como RCM y RCA.
5. Controle las mejoras implementando un buen sistema de gestión del trabajo e incorporando informes de seguimiento en el sistema.

Análisis de Pareto. Este análisis, también conocido como la regla 80/20, destaca que algunas cosas son más importantes que otras. En relación con el mantenimiento, un ejemplo de la regla podría decir: 'El 80 % del tiempo de inactividad de la planta se aplica al 20 % del equipo instalado'. La importancia de la regla 80/20 es que, si se puede identificar el 20 % de las

pérdidas, luego las mejoras eliminadas se realizarán en un plazo más corto. Esta es una herramienta extremadamente poderosa y posiblemente el método más común utilizado para determinar dónde deben enfocarse las mejoras. Es imprescindible en el conjunto de herramientas de los profesionales de la confiabilidad del mantenimiento. (Brunner, 2019, sin página)

1.7.6. Implementación del RCM

Son varias las actividades a llevar a cabo para la implementación del RCM, siendo las principales las siguientes:

- Preparar al grupo de trabajo. Seleccionar personal de perfil que intervendrá en la implementación de acuerdo con la naturaleza de ésta, por ejemplo, electricidad, electrónica, mecánica, entre otros. Es recomendable tener un trabajador de respaldo para cada uno de los convocados, por razones obvias y que también participe en la formación.
- Realizar un inventario o levantado de Fichas Técnicas del equipo a trabajar.
- Realizar el análisis de funcionalidad y de criticidad y/o de oportunidades de mejora del equipo a intervenir.
- Realizar un programa y cronograma de las actividades de las que constará la implementación, siempre tomando en cuenta las ventajas que se obtendrán para la empresa.

- Seleccionar el problema más crítico o de mayor impacto y con mayor probabilidad de solucionarlo exitosamente.
- Establecer la naturaleza del problema, o problemas, a tratar, así como las funciones de los sistemas involucrados.
- Definir la misión del grupo y los objetivos, muy claros, del grupo de trabajo.
- Desarrollar de mutuo consenso el cronograma de trabajo, abarcando hasta la implementación del programa y las actividades necesarias para su seguimiento.
- Considerar las vacaciones, ausencias intempestivas, permisos, entre otros, del personal, en cuyo caso se convocará al integrante de respaldo.
- Conseguir la aprobación de la alta Gerencia para los puntos anteriores y así obtener también el involucramiento de ella en el desarrollo de la implementación.
- Desarrollar el análisis, desde el inicio hasta el fin, por medio de la documentación de los pasos anteriores y con la aplicación del Monitoreo de Condición y del Análisis Causa-Raíz, por lo menos, si no es con el auxilio de otras herramientas.
- Plantear las soluciones necesarias al problema.

- Considerar el costo económico de las soluciones planteadas, tomando en cuenta que algunas de ellas signifiquen grandes inversiones que probablemente la empresa no pueda sufragar.
- Documentar, por medio de minutas de todas las reuniones y enviar una copia a la Gerencia General, para mantener al día la información y el involucramiento de ella.
- Documentar los resultados y presentarlos a la Gerencia de Planta con la justa inversión económica necesaria para su implementación.
- Ejecutar las sugerencias del plan.
- Llevar a cabo el seguimiento del plan, recordando que este proceso es uno continuo y cuyo éxito, entre otros, depende de esto mismo.
- Revisar si las recomendaciones del plan son aplicables a otros departamentos de la planta y de ser así, gestionar también su aplicación.

Finalmente, además de obtener el plan de mantenimiento para preservar la función de los activos, otra gran ventaja que tiene el RCM II™ es que todas las personas que se involucran en el grupo de trabajo que participa en los talleres para levantamiento de información logra tener un conocimiento muy alto para el mantenimiento y operación de los activos a evaluar. Esta es una consecuencia del mismo procedimiento que, aunque no es el principal objetivo del RCM II™, sí constituye un valioso aporte al programa, a la empresa y a cada individuo que participa en estas operaciones. (Murillo, 2002, sin página)

1.7.7. La metodología de implementación del FMEA o análisis de modos y efectos de falla

Como ya se indicó en el inciso 1.7., el FMEA es una parte integral del proceso del RCM y ya que es una técnica que identifica los modos potenciales de falla de un dispositivo o producto, determina los efectos de estas fallas y evalúa la importancia de la falla. De esta técnica se pueden obtener, para un caso práctico las funciones, fallas funcionales, modos de falla y efectos de falla, para el análisis bajo el RCM, de un activo.

1.8. Criterios de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad

La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad son las tres principales y poderosas herramientas que pueden auxiliar en gran medida la toma de decisiones del personal de mantenimiento de equipos industriales. Estos tres conceptos forman parte de la cotidianidad del mantenimiento.

La confiabilidad mide el impacto de las fallas en el equipo, para entregar el grado de confianza que puede tener el equipo para cumplir con su función. En otras palabras, entiéndase como aquella condición que requiere que el equipo funcione adecuadamente en un momento determinado y bajo condiciones establecidas, Se calcula así:

$$C = \left(\frac{TPEF}{TPEF + TPPR} \right) * 100$$

Donde:

TPEF = Tiempo Promedio Entre Fallas

$TPPR$ = Tiempo Promedio Para Reparar = Tiempo total de la reparación del equipo \div Número de reparaciones.

La disponibilidad es el objetivo principal del mantenimiento y puede ser definida como la confianza de que un componente o sistema que sufrió mantenimiento ejerza su función satisfactoriamente para un tiempo dado. En la práctica, la disponibilidad se expresa como el porcentaje de tiempo en que el sistema está listo para operar o producir.

Depende solo de fallos y tiempos de reparación, sin considerar otras posibles causas de indisponibilidad. En otras palabras, es la probabilidad de que un activo realice la función asignada cuando se requiere de ella. La disponibilidad depende de cuán frecuentemente se producen los fallos en determinado tiempo y condiciones (esto es *confiabilidad*) y de cuánto tiempo se requiere para corregir la falla o devolver la funcionalidad (*mantenibilidad*). Esto se aplica en sistemas que operan continuamente y se define como:

$$D = \frac{Hd}{Pe} * 100$$

Donde:

Hd = Horas disponibles del equipo en el período a considerar

Pe = Número de períodos evaluados

La mantenibilidad se puede definir como la expectativa que se tiene de que un equipo o sistema pueda ser colocado en condiciones de operación dentro de

un periodo de tiempo establecido, cuando la acción de mantenimiento es ejecutada de acuerdo con procedimientos prescritos.

$$M(t) = 1 - e^{-\mu * t}$$

Donde:

$M(t)$ = es la función mantenibilidad, que representa la probabilidad de que la reparación comience en el tiempo $t = 0$ y sea concluida satisfactoriamente en el tiempo t (probabilidad de duración de la reparación).

e = constante Neperiana ($e = 2.71828$).

μ = Tasa de reparaciones o número total de reparaciones efectuadas con relación al total de horas de reparación del equipo.

t = tiempo previsto de reparación TPPR.

1.9. La curva P – F

Cuando la capacidad funcional de un equipo cae por debajo de su capacidad requerida, se considera que el activo ha 'fallado'. Mantenimiento restaura (mantenimiento reactivo), o conserva (mantenimiento proactivo) la capacidad funcional de un ítem a un nivel que excede aquel requerido por sus usuarios. De los dos tipos de mantenimiento, reactivo o proactivo, en ciertas situaciones los usuarios especifican este último en ciertas situaciones. En aquellos casos en que la falla pueda interferir de manera significativa con el nivel de alistamiento en un contexto militar, o con la meta

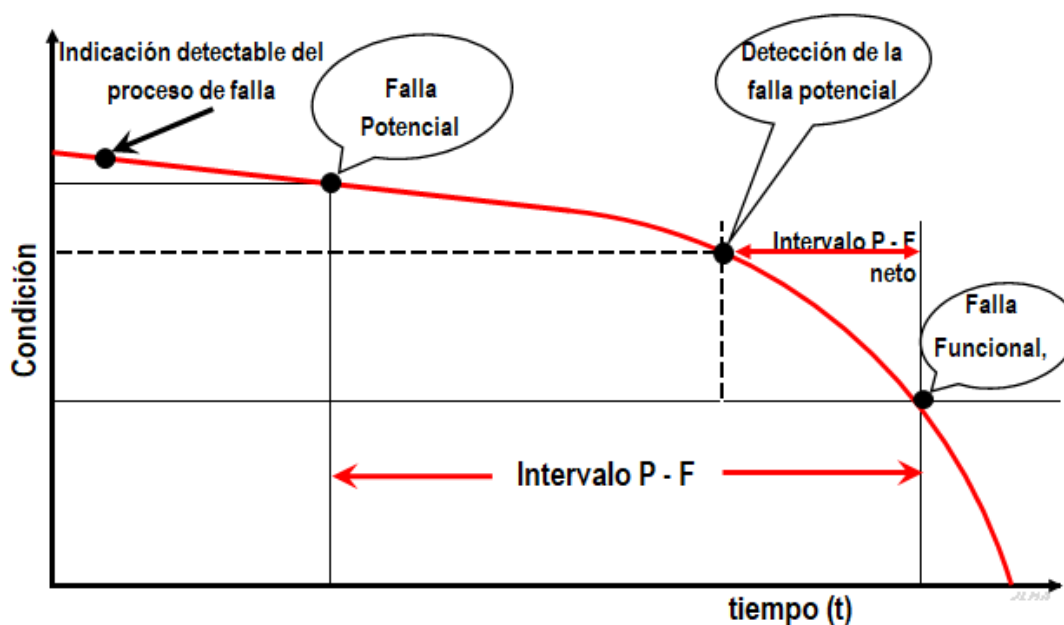
de producción de bienes y servicios, con la seguridad industrial, con rentabilidad y sin violar las normas ambientales, por lo general el usuario solicitará algún tipo de mantenimiento proactivo.

Todas estas se refieren a la recolección, el procesamiento y el análisis de información y observaciones relevantes, con el fin de tomar decisiones buenas y oportunas sobre:

1. Intervenir inmediatamente y hacer mantenimiento a el equipo en este momento, o
2. Planear la ejecución de un mantenimiento dentro de un periodo de tiempo especificado, o
3. Aplazar la decisión de mantenimiento hasta la próxima observación CBM.

Cuando los administradores y los gerentes seleccionan una tarea para tratar un particular modo de falla, tienden a considerar a CBM en primer lugar. CBM, de ser aplicable, es considerado como más 'conservador', menos costoso, y menos entorpecedor que el TBM. La gráfica de la figura a continuación representa la conocida teoría de CBM. Define a CBM como la detección de una falla potencial de manera oportuna. P es el punto inicial en el cual puede ser observada una falla en evolución, utilizando la tecnología actual de detección. El real descubrimiento de la falla potencial ocurre en la siguiente inspección CBM después de P.

Figura 6. La curva P - F



LA CURVA P - F

Fuente: Hoyos. *El elusivo intervalo P-F*. Consultado el 9 de julio de 2019. Recuperado de <http://www.livingreliability.com/wordpress/posts/el-elusiva-intervalo-p-f/>.

La gráfica anterior a la izquierda ilustra las restricciones que debe tener en cuenta el ingeniero de mantenimiento al diseñar un programa CBM. El intervalo P-F neto debe proporcionar un periodo de tiempo adecuado para que la operación de mantenimiento reaccione a partir del momento en que es detectada una falla potencial. Si resulta práctico monitorear a la frecuencia necesaria para que esto ocurra, el programa CBM se considera como 'técnicamente factible' o 'aplicable'. En el peor de los casos, según el gráfico, si una inspección anticipa la falla potencial solamente por un pequeño periodo de tiempo, la siguiente inspección todavía la detectará a tiempo, siempre y cuando la organización de mantenimiento sea capaz de actuar dentro del intervalo P-F neto. En caso de que, al largo plazo, la tarea proactiva repetitiva tenga éxito, a un costo aceptable, en evitar o mitigar las

consecuencias de fallas funcionales, se considerará que el programa CBM es 'efectivo' o que 'vale la pena'.

La figura asume que:

1. El punto en el que se declara una falla potencial, P, de una condición identificable es conocido, y que,
2. El intervalo P-F es conocido y es razonablemente consistente (o su rango de variación puede ser estimado), y que,
3. Resulta práctico monitorear el ítem a intervalos más cortos que el intervalo P-F.

El modelo clásico de decisión CBM de la figura depende considerablemente, por lo tanto, de conocimiento previo sobre P y del intervalo P-F. En la práctica, se obtiene una aproximación inicial al Intervalo P-F mediante el consenso de expertos en el tema. (Hoyos, 2011, sin página)

Algunos obstáculos para la aplicación o uso de la figura son, por ejemplo: Moubray, sugiere que, si 'P' no es conocido, o que si 'P-F' no puede ser aproximado, CBM no es técnicamente viable. Esto descartaría un gran número de programas de monitoreo de condición actualmente activos. De los dos conceptos, 'P' y 'P-F', es el primero el que presenta el reto más grande. Sin 'P' el intervalo P-F resulta elusivo. Por esto, antes de tratar el intervalo P-F, se debe primero descubrir cuando y como declarar una falla potencial.

En la figura, 'P' (el punto en el cual la tecnología actualmente disponible puede detectar una condición de falla) es señalado cuando se alcanza un

valor especificado para algún indicador de condición. Encontrar un indicador que transmita el estado de un modo de falla fijado es un reto por sí mismo. En todas las situaciones, excepto las más simples, extraer un indicador de condición (característica) que de una manera fiel haga seguimiento a resistencia de falla disminuyente, relacionada con un modo de falla objetivo, (también conocido como causa o mecanismo), requiere de considerable conocimiento, basado en:

1. Un modelo de ingeniería del mecanismo de falla, o en
2. Experiencia previa de la falla o, preferiblemente, de la falla potencial.

Si se asume que no hay disponible un modelo basado en reglas físicas, los esfuerzos se deben enfocar en el segundo caso, que se podría considerar como el más general. Una vez se haya propuesto un indicador de condición que refleje el deterioro en un componente, todavía faltaría establecer el punto de decisión P (falla potencial) en el cual, ante la falta de un modelo que describa las reglas de física del modo de falla, se requiera de alguna clase de metodología. (Hoyos. 2011, sin página)

Establecer el nivel al cual se declara la falla potencial es el problema encontrado por muchos administradores de activos agobiados por información de monitoreo de condición. La persona que implementa un programa CBM enfrenta interrogantes inevitables. Estos son, '¿dónde establecer la falla potencial?', y, '¿cuál indicador, de las tantas variables monitoreadas, debería utilizar para este propósito?' Cuando las reglas físicas de una situación no son bien conocidas (como es el caso muy frecuentemente), una 'política' para declarar una falla potencial no es nada obvia.

¿Por qué la figura y la determinación de P y de P-F resultan tan elusivas?

Las razones son:

1. Si bien ello no implica esto, se puede erróneamente inferir a partir de la gráfica en la figura que, en general, un solo indicador de condición influye sobre la probabilidad de falla. Sin embargo, frecuentemente el problema es multidimensional. Cuando una variable significativa es una combinación lineal de varios factores que influyen sobre riesgos, se trata de una función más compleja que, por lo general, no es fácil de forzar en el modelo P-F simple.
2. P y P-F pueden ser variables aleatorias. Los intentos de establecer estas como parámetros fijos de decisión frecuentemente causan frustración.
3. La declaración de P puede no ser constante para diversas edades de trabajo del ítem. Un alto nivel de vibración en un ítem más antiguo puede indicar una falla inminente mientras que el mismo nivel de vibración en un ítem más nuevo puede ser normal. En general es necesario un método para determinar la relación tripartita (edad vs. indicador CBM, indicador vs. confiabilidad).

Finalmente puede decirse que La curva P-F es una representación gráfica del comportamiento de un equipo, máquina o componente, desde su entrada en servicio hasta el momento que presenta una falla que le impide seguir funcionando. Esta herramienta es de referencia obligada al calcular la frecuencia de inspección en la implementación de un programa RCM o PdM (mantenimiento predictivo).

La curva P-F habla también en términos monetarios. Se puede ver cómo la solución al problema va aumentando de costo, a medida que se acerca a la falla funcional o más allá, a la falla total.

La detección de la aparición del punto P es crucial. La manera como se detecta el punto P en el funcionamiento del equipo no atañe a los sentidos del inspector. Cuando el inspector por medio del tacto, la vista, el oído o el olfato, detecta la falla, ya la misma no es potencial, si no que avanza hacia su conversión en falla funcional, por lo que lo más sensato sería correr a buscar un repuesto. La única manera de detectar el punto P es por medio de tecnología.

Es precisamente en este momento que el uso del monitoreo de condición, ya en el contexto de la planta eléctrica de emergencia (termografía, análisis de vibraciones, ensayos no destructivos, análisis de aceite, entre otros) entra en juego. Aplicando la tecnología que ha sido desarrollada para vigilar condiciones que se escapan de los métodos ortodoxos, se puede dar con el punto P. (Hoyos, 2011, sin página)

Para el caso de la planta eléctrica de emergencia, el monitoreo de condición es de suma importancia ya que su aplicación permite detectar fallas, principalmente durante la operación de la máquina, principalmente en su ejercicio semanal, revisando exceso de temperatura del bloque del motor, de la camisa de agua de precalentamiento del motor, del agua del radiador, entre otros. También puede detectarse mediante ensayos no destructivos rajaduras en el bloque, cárter y culata del MCI, en la masa de unión del ventilador al eje del MCI, excepcionalmente, en las bridas del escape, vibraciones excesivas del conjunto MCI – generador eléctrico, partículas en el aceite que pueden sugerir desgastes anormales en las piezas o mecanismos internos del bloque de MCI, entre otros.

Estas técnicas son generalmente aplicadas al detectarse, mediante el análisis VOSOA, algún indicio que sugiera una falla, o discontinuidad de ser el caso, en el funcionamiento del MCI, aunque algunas otras se detectan sin necesidad de que el equipo esté funcionando, por ejemplo, una fuga debido a un mal apriete del filtro de agua del radiador, del aceite, del combustible, entre otras.

1.10. Análisis de criticidad

Es una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones. Para realizar un análisis de criticidad se debe:

- Definir un alcance y propósito para el análisis,
- Establecer los criterios de evaluación y,
- Seleccionar un método de evaluación para jerarquizar la selección de los sistemas objeto del análisis. Reliabilityweb.com (2020). *El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional*. EE. UU: Autor.

Desde el punto de vista matemático la criticidad se puede expresar como:

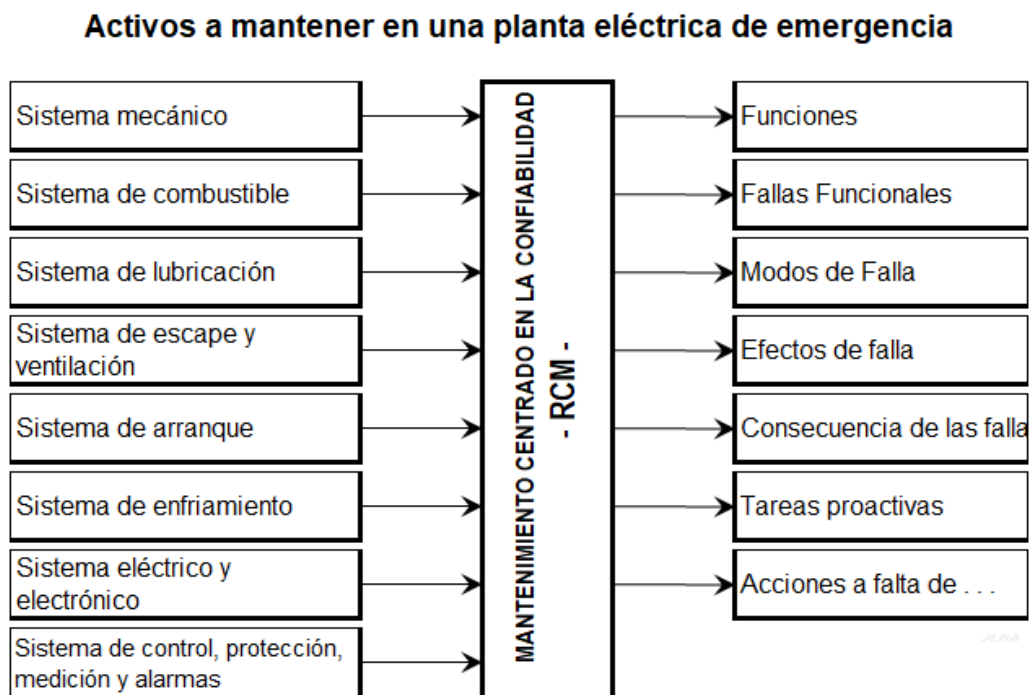
Criticidad = Frecuencia (eventos/año) x Consecuencia (costos de reparación, para este caso)

1.11. Sistemas y subsistemas de una planta eléctrica de emergencia

Teóricamente se puede dividir en los siguientes sistemas, y subsistemas, mecánicos y eléctricos para constituir una parte de los activos que debe mantener en una institución o empresa para considerar en la metodología del RCM, que se tratará en adelante.

En la siguiente figura se observan los activos, parte de una planta eléctrica de emergencia por mantener.

Figura 7. **Activos por mantener en una en una planta eléctrica de emergencia**



Fuente: Ruiz. *Plan de mantenimiento genérico basado en confiabilidad para moto-generadores eléctricos diésel con potencia menor a 500kw*, Superintendencia de Operaciones del Rio Ecopetrol S.A. Consultado el 29 de agosto de 2019. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/170270049/146766>

Para este caso, los sistemas y sus subsistemas en que se puede dividir la planta de emergencia en cuestión son:

- Sistema del MCI.
 - Subsistema general.
 - Subsistema de enfriamiento.
 - Subsistema de combustible.
 - Subsistema de escape.

- Sistema eléctrico.
 - Subsistema del generador eléctrico.
 - Subsistema del tablero de control.
 - Subsistema eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia.

A continuación, se determinaron los modos de falla más comunes para cada uno de los siete subsistemas indicados arriba, consultando alguna bibliografía, notas tomadas de capacitaciones del autor y la experiencia del mismo. De esta manera se desprendieron los resultados mostrados.

Las principales fallas funcionales que se presentan y deben ser atendidas en una planta eléctrica de emergencia, son:

Sistema del motor de combustión interna (MCI) estacionario

Subsistema general

- MCI no funciona, no arranca.
 - Ensamble inadecuado del MCI.
 - *Overcrank* o bloqueo del cigüeñal. Esta característica evita que el generador se dañe a sí mismo cuando intenta arrancar continuamente y otro problema, como la falta de suministro de combustible, impide que arranque.
 - Golpe hidráulico en las bielas y pistones.
- MCI incapaz de entregar 755 HP y girar a 1,800 RPM.
 - Fatiga del cigüeñal, bielas, eje de levas.
 - MCI sobrerrevolucionado u *overspeed* debido a mal ajuste del control de velocidad de este.
 - Filtro de aire o conductos de aire obstruidos.
 - Bajo nivel de lubricante para el MCI, lubricante fuera de especificaciones, filtro de lubricante obstruido, presostato del aceite dañado, desgaste de la bomba de lubricación, fugas de aceite en el sello de unión entre el bloque del MCI y el generador y otras, conexiones flojas de mangueras o daños a estas.

- Baja temperatura del agua de precalentamiento.
- Turbocompresor (turbocargador) defectuoso.
- Emisión alterada de CO₂ en los gases de escape.
 - Combustión ineficiente. Inyectores en mal estado (sucios u obstruidos) o mala calidad del combustible.
- No funciona la alarma de sobre temperatura del MCI.
 - Elevada temperatura del MCI a causa de lubricante inadecuado, falta del mismo o cojinetes dañados.
- No hay monitoreo de bajo o ningún nivel de lubricante.
 - Falta total de lubricante para el MCI.
 - Falta parcial de lubricante, fugas en sellos, en mangueras y acoples de éstas al bloque del MCI.
- No funciona la alarma de bajo nivel de lubricante del MCI.
 - Daño eléctrico de la alarma de bajo nivel de lubricante del MCI o fin de su vida útil.
- Erosión eléctrica en el cigüeñal.

- Daño debido a corrientes eléctricas de fuga, o 'vagabundas' desde el generador eléctrico.
- Vibración fuera de lo normal del conjunto MCI – generador eléctrico.
 - Tacos antivibratorios para amortiguación de vibraciones lineales, ubicados entre la bancada metálica y el conjunto MCI – generador eléctrico instalados en forma incorrecta o en mal estado.

Subsistema de enfriamiento

- No se refrigera de forma adecuada o totalmente el aceite lubricante, el combustible de retorno y las cámaras de combustión, a través de las camisas del motor.
 - Fajas rotas, en mal estado o faltas de tensión, del ventilador del radiador.
 - Daño mecánico en las aspas del ventilador por barrido del chavetero, rajaduras en su unión a la masa que lo une al eje, desprendimiento de las aspas y daño al radiador.
 - Incorrecta concentración del refrigerante en el agua del radiador.
 - Fugas de agua de enfriamiento en el radiador y sus tuberías.
 - Panal del radiador sucio.
 - Cojinetes del eje del ventilador del radiador en mal estado.

- Termostato del tapón del radiador en mal estado.
- Bomba de agua dañada.
- Dispositivo de alarma (termopar, termocopla o termocupla), control y parada del motor del ventilador por bajo nivel de refrigerante, dañado debido a falla de este.

Subsistema de combustible

- MCI incapaz de inyectar combustible, o lo hace de manera deficiente.
 - Filtro y líneas (mangueras, tuberías) de combustible restringidas u obstruidas.
 - Tanque de combustible diario y exterior oxidados en su interior.
 - Aire en el sistema de combustible.
 - Exceso o distribución irregular del combustible en los inyectores por acumulación de suciedad.
 - Bomba de combustible obstruida parcialmente.
 - Válvula de no retorno, o de cheque, obstruida con ruptura o atascamiento de su lengüeta de paso.
- MCI incapaz de transferir el combustible.

- No funciona la alarma de bajo nivel de combustible o hay falta total de combustible en el tanque del MCI.
- Suministro intermitente de combustible al MCI.
- Conexiones sueltas entre la bomba de combustible, línea de aspiración y el tanque.
- La bomba de combustible no funciona.

Subsistema de escape

- MCI incapaz de conducir los gases quemados de la combustión hacia el exterior.
 - Obstrucciones, daños o fugas en los tubos, bridas del escape o silenciador o *muffler*.
 - Corrosión en los tubos, bridas o en el silenciador o *muffler*.
 - Sistema de suspensión del escape en mal estado.
 - Aleta o *flaper* de la boca de salida del tubo de escape en mal estado (corroída, bloqueada o inexistente).

Sistema eléctrico

Subsistema del generador eléctrico

- No hay voltaje generado.
 - Pérdida de campo, debida a la pérdida de la alimentación eléctrica del devanado de campo, al estar trabajando el generador por apertura accidental del interruptor de campo (si lo tiene), cortocircuito de este, falla en el regulador de voltaje o pérdida de excitación del sistema.
 - Cortocircuito en el generador por fallas de aislamiento entre los devanados del estator, rotor y tierra.
- Voltaje generado fluctuante.
 - Potencia inversa en el generador por fallas a tierra, provocando el disparo de sus protecciones.
 - Conexiones y bornes del generador en mal estado (flojos) o desconectados.

Tablero de control

- Fusibles quemados, chispazos y suciedad en la circuitería interna del tablero de control.
 - Conexiones flojas, fallas o cortocircuitos en los dispositivos del tablero de control, conexiones flojas de la planta eléctrica de emergencia.
- Interruptor termo magnético, o *flip-on*, de salida de la planta eléctrica de emergencia disparado o abierto.

- Cortocircuito en el circuito exterior de la planta eléctrica de emergencia.
- Manija selectora del tablero de conexión en posición 'Off' o en 'Manual'.
 - Olvido del mecánico o electricista que le efectuó mantenimiento a la planta eléctrica de emergencia al no volver a colocar esta manija en 'Auto' (arranque automático).
- Instrumentos de control o sus carátulas (segmentos digitales) sin mostrar valores al estar trabajando la planta eléctrica de emergencia.
 - Fin de la vida útil de los dispositivos o tarjetas electrónicas, protecciones disparadas o fusibles quemados del tablero de control.

Subsistema eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia

- El MCI no arranca.
 - Baterías, generalmente de 24 VDC, descargadas.
 - Cargador automático de las baterías en mal estado.
 - Interruptor de paro de emergencia en 'On'.
- El panel indicador de eventos en el conjunto MCI – generador eléctrico no muestra los eventos (problemas en el arranque, hora y duración de trabajo, parámetros eléctricos suministrados como voltaje, potencia aparente, corriente, entre otros.).

- Fusibles quemados o necesidad de resetear el panel indicador de eventos del conjunto MCI – generador eléctrico, luego de algún disturbio eléctrico que no hubiera quemado sus fusibles.

1.12. Severidad

Es un número de clasificación asociado con el efecto más grave para un modo de falla determinado, según los criterios de una escala de severidad. Es una clasificación relativa dentro del alcance del FMEA específico y se determina sin tener en cuenta la probabilidad de ocurrencia o detección.

¿Cómo se evalúa la severidad en los FMEA?

Habiendo identificado el efecto más grave para el modo de falla, el personal que elabora el FMEA evalúa la clasificación de severidad. Esta es la severidad del efecto del modo de falla, no la severidad del modo de falla en sí.

Utilizando la escala de severidad acordada, se revisa cuidadosamente la columna de criterios para emitir este juicio. Si el efecto está bien definido, la severidad se establece fácilmente revisando los criterios de la escala de severidad.

Luego se evalúa la gravedad del efecto final en el sistema o en el usuario final.

Para los FMEA de proceso, se debe considerar el efecto de la falla a nivel de fabricación o ensamblaje, así como en el sistema o el usuario final.

La severidad que se utiliza en el proceso de FMEA es el más alto de los dos valores.

En este caso, y como ya se ha indicado, en este trabajo se aplicó un modelo cualitativo con enfoque en 4 Categorías (I - Catastrófica, II - Crítica, III - Marginal y IV - Menor) que relacionan aspectos de Servicio (producción), en este caso, los cuales, adecuados a una planta eléctrica de emergencia, se resumen en la siguiente tabla: (Pacheco, 2011, sin página)

Tabla I. **Criterios de severidad**

Criterios de Severidad

Categoría	Descripción del modo de falla	Tiempo fuera de operación
Categoría I Catastrófica	Falla que puede causar fallo general del equipo, maquinaria o sistema.	Tiempo fuera de operación > 7 días
Categoría II Crítica	Falla que causa daño mayor al equipo, maquinaria o sistema que resultará en mayor tiempo de paro o pérdida de servicios o producción.	7 días > Tiempo fuera de operación > 24 h
Categoría III Marginal	Falla que puede causar daño menor al equipo, maquinaria o sistema, lo que resultará en atraso o pérdida de la Disponibilidad del sistema o degradación del mismo.	24 h > Tiempo fuera de operación > 4 h
Categoría IV Menor	Falla poco seria o leve que causa daño al equipo, maquinaria o sistema, pero resultará en mantenimiento o reparación no programada. También puede causar lesión leve a la propiedad.	4 h > Tiempo fuera de operación

Fuente: Pacheco. *Modelos Cualitativos*. Consultado el 9 de julio de 2019. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/3774607/12/images/42/Criterios+de+Frecuencia.jpg>

Con la descripción de los modos de falla más comunes (inciso 1.14. El estándar SAE-JA1011 y la planta eléctrica de emergencia), puede hacerse la clasificación de categorías según su severidad, así:

Categoría I – Catastrófica

- Golpe hidráulico en las bielas y pistones.
- Falta total de lubricante para el MCI.
- Cortocircuito en el generador por fallas de aislamiento entre los devanados del estator, rotor y tierra.

Categoría II – Crítica

- Ensamble inadecuado del MCI.
- Fugas de agua de enfriamiento en el radiador y sus tuberías.
- Fatiga del cigüeñal, bielas, eje de levas.
- Falta parcial de lubricante, fugas en sellos, en mangueras y acoples de estas al bloque del MCI.
- Daño eléctrico de la alarma de bajo nivel de lubricante del MCI o fin de su vida útil.
- Daño debido a corrientes eléctricas de fuga, o 'vagabundas' desde el generador eléctrico.

- Fusibles quemados, chispazos y suciedad en la circuitería interna del tablero de control.
- La bomba de combustible no funciona.
- Daño mecánico en las aspas del ventilador por barrido del chavetero, rajaduras en su unión a la masa que lo une al eje, desprendimiento de las aspas y daño al radiador.
- Bajo nivel de lubricante para el MCI, lubricante fuera de especificaciones, filtro de lubricante obstruido, presostato del aceite dañado, desgaste de la bomba de lubricación, fugas de aceite en el sello de unión entre el bloque del MCI y el generador y otras, conexiones flojas de mangueras o daños a estas.
- No se refrigera de forma adecuada o totalmente: el aceite lubricante, el combustible de retorno y las cámaras de combustión a través de las camisas del motor.
- Bomba de agua dañada.
- Dispositivo (termopar, *termocopla* o *termocupla*) de alarma, control y parada del motor del ventilador por bajo nivel de refrigerante, dañado debido a falla de este.
- Pérdida de campo, debida a la pérdida de la alimentación eléctrica del devanado de campo, al estar trabajando el generador por apertura accidental del interruptor de campo (si lo tiene), cortocircuito de este, falla en el regulador de voltaje o pérdida de excitación del sistema.

- Potencia inversa en el generador por fallas a tierra, provocando el disparo de sus protecciones.
- Cargador automático de las baterías en mal estado.

Categoría III – Marginal

- Inyectores de combustible sucios u obstruidos.
- Válvula de no retorno, o de cheque, obstruida con ruptura o atascamiento de su lengüeta de paso.
- MCI sobrerrevolucionado u *overspeed* debido a mal ajuste del control de velocidad de este.
- *Overcrank* o bloqueo del cigüeñal. Esta característica evita que el generador se dañe a sí mismo cuando intenta arrancar continuamente y otro problema, como la falta de suministro de combustible, impide que arranque.
- Combustión ineficiente. Inyectores en mal estado (sucios u obstruidos) o mala calidad del combustible.
- Elevada temperatura del MCI a causa de lubricante inadecuado, falta de este o cojinetes dañados.
- Baja temperatura del agua de precalentamiento.
- Exceso o distribución irregular del combustible en los inyectores por acumulación de suciedad.

- Bomba de combustible obstruida parcialmente.
- No funciona la alarma de bajo nivel de combustible o hay falta total de combustible en el tanque del MCI.
- Conexiones sueltas entre la bomba de combustible, línea de aspiración y el tanque.
- Termostato del tapón del radiador en mal estado.
- Cojinetes del eje del ventilador del radiador en mal estado.
- Filtro o conductos de aire obstruidos.
- Turbocompresor (turbocargador) defectuoso.
- Fajas rotas, en mal estado o faltas de tensión, del ventilador del radiador.
- Filtro y líneas (mangueras, tuberías) de combustible restringidas u obstruidas.
- Obstrucciones, daños o fugas en los tubos, bridas del escape o silenciador o *muffler*.
- Conexiones y bornes del generador en mal estado (flojos) o desconectados.

Categoría IV – Menor

- Tanque de combustible diario y exterior oxidados en su interior.

- Suministro intermitente de combustible al MCI.
- Aire en el sistema de combustible.
- Panal del radiador sucio.
- Incorrecta concentración del refrigerante en el agua del radiador.
- Corrosión en los tubos, bridas o en el silenciador o *muffler*.
- Sistema de suspensión del escape en mal estado.
- Interruptor de paro de emergencia en 'On'.
- Cortocircuito en el circuito exterior de la planta eléctrica de emergencia.
- Olvido del mecánico o electricista que le efectuó mantenimiento a la planta eléctrica de emergencia al no volver a colocar la manija en 'Auto' (Arranque Automático).
- Baterías, generalmente de 24 VDC, descargadas.
- Conexiones flojas, fallas o cortocircuitos en los dispositivos del tablero de control de la planta eléctrica de emergencia.
- Fin de la vida útil de los dispositivos o tarjetas electrónicas, protecciones disparadas o fusibles quemados del tablero de control.

- Fusibles quemados o necesidad de reiniciar el panel indicador de eventos del conjunto MCI – generador eléctrico, luego de algún disturbio eléctrico que no hubiera quemado sus fusibles.
- Tacos antivibratorios para amortiguación de vibraciones lineales, ubicados entre la bancada metálica y el conjunto MCI – generador eléctrico instalados en forma incorrecta o en mal estado.
- Aleta o *flaper* de la boca de salida del tubo de escape en mal estado (corroída, bloqueada o inexistente)

1.13. Frecuencia

El segundo componente del análisis de criticidad es la frecuencia de una falla determinada. Si bien ciertas fallas en los equipos pueden ser bastante graves, también pueden ser muy poco probables. Como tal, puede que no tenga mucho sentido priorizar el mantenimiento preventivo.

Si un modo de falla determinado resulta bastante probable, valdría la pena priorizarlo, especialmente si pudiese tener un impacto más severo.

La frecuencia asocia 5 Criterios de ocurrencia, en función de la probabilidad de fallas con relación a falla/hora de operación. (Pacheco, 2011, sin página)

Considerando de nuevo los modos de falla más recurrentes de un MCI estacionario (inciso 1.14. El estándar SAE-JA1011 y la planta eléctrica de emergencia), su generador y tablero de control, componentes de una planta

eléctrica de emergencia, puede hacerse la clasificación de Criterios de frecuencia según sus Criterios de ocurrencia, así:

Frecuente (5)

- Bajo nivel de lubricante, lubricante fuera de especificaciones, filtro de lubricante obstruido, presostato del aceite dañado, desgaste de la bomba de lubricación, fugas de aceite en el sello de unión entre el bloque del MCI y el generador y otras, conexiones flojas de mangueras o daños a estas.
- La bomba de combustible no funciona.
- Suministro intermitente de combustible al MCI.
- Panel del radiador sucio.
- Interruptor de paro de emergencia en 'On'.
- Cortocircuito en el circuito exterior de la planta eléctrica de emergencia.
- Olvido del mecánico o electricista que le efectuó mantenimiento a la planta eléctrica de emergencia al no volver a colocar la manija en 'Auto' (Arranque Automático).

Razonablemente probable (4)

- Fugas de agua de enfriamiento en el radiador y sus tuberías.
- Falta total de lubricante para el MCI.

- Filtro y líneas (mangueras, tuberías) de combustible restringidas u obstruidas.
- Combustión ineficiente. Inyectores en mal estado (sucios u obstruidos) o mala calidad del combustible.
- Tanque de combustible diario y exterior oxidados en su interior.
- Conexiones flojas, fallas o cortocircuitos en los dispositivos del tablero de control, conexiones flojas de la planta eléctrica de emergencia.
- Baterías, generalmente de 24 VDC, descargadas.

Ocasional (3)

- Fusibles quemados o necesidad de reiniciar el panel indicador de eventos del conjunto MCI – generador eléctrico, luego de algún disturbio eléctrico que no hubiera quemado sus fusibles.
- Bomba de combustible obstruida parcialmente.
- Bomba de agua dañada.
- Falta parcial, fugas en sellos, en mangueras y acoples de estas al bloque del MCI.
- Cargador automático de las baterías en mal estado.

- *Overcrank* o bloqueo del cigüeñal. Esta característica evita que el generador se dañe a sí mismo cuando intenta arrancar continuamente y otro problema, como la falta de suministro de combustible, impide que arranque.
- Termostato del tapón del radiador en mal estado.
- Filtro de aire o conductos de aire obstruidos.
- Fajas rotas, en mal estado o faltas de tensión, del ventilador del radiador.
- Filtro y líneas (mangueras, tuberías) de combustible restringidos u obstruidos.
- Fin de la vida útil de los dispositivos o tarjetas electrónicas, protecciones disparadas o fusibles quemados del tablero de control.
- Obstrucciones, daños o fugas en los tubos, bridas del escape o silenciador o *muffler*.

Remota (2)

- MCI sobre revolucionado, u *overspeed* debido a mal ajuste del control de velocidad de este.
- Cortocircuito en el generador por fallas de aislamiento entre los devanados del estator, rotor y tierra.
- Fatiga del cigüeñal, bielas, eje de levas.

- Daño eléctrico de la alarma de bajo nivel de lubricante del MCI o fin de su vida útil.
- Daño mecánico en las aspas del ventilador por barrido del chavetero, rajaduras en su unión a la masa que lo une al eje, desprendimiento a las aspas y daño al radiador.
- Pérdida de campo, debida a la pérdida de la alimentación eléctrica del devanado de campo, al estar trabajando el generador por apertura accidental del interruptor de campo (si lo tiene), cortocircuito de este, falla en el regulador de voltaje o pérdida de excitación del sistema.
- Potencia inversa en el generador por fallas, a tierra provocando el disparo de sus protecciones.
- Válvula de no retorno, o de cheque, obstruida con ruptura o atascamiento de su lengüeta de paso.
- Baja temperatura del agua de precalentamiento.
- Turbocompresor (turbocargador) defectuoso.
- Elevada temperatura del MCI a causa de lubricante inadecuado, falta de este o cojinetes dañados.
- Conexiones y bornes del generador en mal estado (flojos) o desconectados.

- Exceso o distribución irregular del combustible en los inyectores por acumulación de suciedad.
- No funciona la alarma de bajo nivel de combustible o hay falta total de combustible en el tanque del MCI.
- Aire en el sistema de combustible.
- Conexiones sueltas entre la bomba de combustible, línea de aspiración y el tanque.
- Tacos antivibratorios para amortiguación de vibraciones lineales, ubicados entre la bancada metálica y el conjunto MCI – generador eléctrico instalados en forma incorrecta o en mal estado.
- Dispositivo de alarma (*termopar*, *termocopla* o *termocupla*), control y parada del motor del ventilador por bajo nivel de refrigerante, dañado debido a falla de este.
- Incorrecta concentración del refrigerante en el agua del radiador.
- Corrosión en los tubos, bridas o en el silenciador o *muffler*.
- Sistema de suspensión del escape en mal estado.
- Aleta o *flaper* de la boca de salida del tubo de escape en mal estado (corroída, bloqueada o inexistente).

Improbable (1)

- Golpe hidráulico en las bielas y pistones.
- Ensamble inadecuado del MCI.
- Daño debido a corrientes eléctricas de fuga, o 'vagabundas' desde el generador eléctrico.
- Cojinetes del eje del ventilador del radiador en mal estado.

Tabla II. Criterios de frecuencia

Criterios de Frecuencia

Posición	Criterios de Ocurrencia	Nivel	Descripción	Probabilidad
5	Frecuente. Probabilidad de ocurrencia alta durante el intervalo de operación del equipo.	Frecuente	Probabilidad de alta ocurrencia durante el intervalo de operación del equipo.	$P \geq 1 \times 10^{-3}$ ($\geq 1 / 1,000$ h)
4	Razonablemente probable. Probabilidad de ocurrencia moderada durante el intervalo de operación del equipo.	Probable	Probabilidad moderada de ocurrencia durante el intervalo de operación del equipo.	$P \geq 1 \times 10^{-4}$ ($\geq 1 / 10,000$ h)
3	Ocasional. Probabilidad de ocurrencia eventual durante el intervalo de operación del equipo.	Ocasional	Probabilidad baja de ocurrencia durante el intervalo de operación del equipo.	$P \geq 1 \times 10^{-5}$ ($\geq 1 \times 100,000$ h)
2	Remota. Poca probabilidad de ocurrencia durante el intervalo de operación del equipo.	Remota	Probabilidad ocasional de ocurrencia durante el intervalo de operación del equipo.	$P \geq 1 \times 10^{-6}$ ($\geq 1 / 1,000,000$ h)
1	Improbable. Cero probabilidad de ocurrencia.	Improbable	Probabilidad extremadamente baja de ocurrencia durante el intervalo de operación del equipo.	$P \leq 1 \times 10^{-6}$ ($\leq 1 / 1,000,000$ h)

JELPH

Fuente: Pacheco. *Modelos Cualitativos*. Consultado el 9 de julio de 2019. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/3774607/12/images/43/Criterios+de+Frecuencia.jpg>

Con lo anterior, y una vez definidos los principales parámetros del RCM, se integró el análisis de criticidad, según lo explicado en el inciso 1.10. con base en factores operacionales y de mantenimiento en el contexto operacional de la planta eléctrica de emergencia, para conocer cuáles son los componentes más importantes y a su vez más susceptibles de provocar mayores inconvenientes, para acentuar la atención sobre ellos, además de asignar los recursos a los componentes que lo ameriten. En este sentido se diseñó una matriz de ponderaciones tomando en cuenta la experiencia y criterio del autor de este y del personal encargado del mantenimiento de la planta de emergencia.

La matriz diseñada para el mantenimiento y operaciones, tomando en cuenta la ponderación basada en la experiencia y en el contexto de la existencia de repuestos tanto en la bodega de la institución como en el mercado local y que es aquella de 4 x 5, es la siguiente:

Figura 8. Matriz de criticidad

Matriz de Criticidad

Frecuencia \ Severidad	Frecuente (5) $P > 1 \times 10^{-3}$ ($> 1 / 1,000$ h)	Razonablemente probable (4) $P > 1 \times 10^{-4}$ ($> 1 \times 10,000$ h)	Ocasional (3) $P > 1 \times 10^{-5}$ ($> 1 / 100,000$ h)	Remota (2) $P > 1 \times 10^{-6}$ ($> 1 / 1,000,000$ h)	Improbable (1) $P < 1 \times 10^{-6}$ ($< 1 / 100,000$ h)
Catastrófica (I)	Alto	Alto	Alto	Medio	Bajo
Crítica (II)	Alto	Alto	Medio	Bajo	Aceptable
Marginal (III)	Medio	Medio	Bajo	Aceptable	Aceptable
Menor (IV)	Bajo	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable

Alto	Correcciones obligatorias para eliminar o controlar el riesgo de parte de la Gerencia de Mantenimiento o Gestión del Riesgo	Bajo	Informar al Programa a la Gerencia de Mantenimiento o a Gestión del Riesgo
Medio	Requiere revisión de la Gerencia de Mantenimiento o a Gestión del Riesgo	Aceptable	Riesgo aceptable

Fuente: Pacheco. *Modelos Cualitativos*. Consultado el 9 de julio de 2019. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/3774607/12/images/44/MATRIZ+CRITICIDAD.jpg>

1.14. El estándar SAE-JA1011 y la planta eléctrica de emergencia

El estándar SAE-JA1011 'Criterios de evaluación para procesos de RCM', describe los criterios mínimos que cualquier proceso de RCM debe cumplir para ser llamado efectivamente RCM, evaluando el activo elegido, o sea, en este caso, la planta eléctrica de emergencia, respondiendo en secuencia, las siete preguntas del sistema a evaluar mencionadas ya anteriormente, según el RCM y que sean adaptables a este activo. Las respuestas se deben tener a mano, así como toda la información para que estén totalmente disponibles para el dueño o usuario, y siguiendo el procedimiento sugerido por este estándar se tiene:

Las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados a la planta eléctrica de emergencia en su actual contexto operacional son básicamente proporcionar un respaldo de energía eléctrica con las mismas, o mejores, cualidades del servicio actual o externo, como, por ejemplo, nivel o magnitud y estabilidad de voltaje en sus tres fases, la misma secuencia de fases, frecuencia y potencia necesaria, cuando el servicio externo proporcionado cuando falle el sistema de suministro externo.

Moubray (2004) dice, entre otras cosas, que todo activo físico tiene más de una función, por lo general tiene varias. Si el objetivo del mantenimiento es asegurarse que continúe realizando estas funciones, entonces todas ellas deben ser identificadas junto con los parámetros de funcionamiento deseados. A primera vista, esto puede verse como un proceso bastante directo, sin embargo, en la práctica casi siempre se vuelve el aspecto más desafiante y el que más tiempo toma en el proceso de formulación de estrategias de mantenimiento.

Las funciones se dividen en dos categorías principales (funciones primarias y funciones secundarias) y estas a su vez se dividen en varias subcategorías.

Moubray (2004) también aclara que las funciones primarias. Las organizaciones adquieren activos físicos por una, probablemente dos y muy pocas veces por tres o más razones. Estas funciones son la razón principal por la que es adquirido el activo físico. Son las razones por las que existe el activo, por lo que deben definirse tan precisamente como sea posible.

Las funciones primarias son generalmente fáciles de reconocer. De hecho, el nombre de la mayoría de los activos físicos industriales se basa en su función primaria.

Según Moubray (2004) el desafío real está en definir las expectativas de funcionamiento asociadas a estas funciones. Para la mayoría de los tipos de equipo, los parámetros de funcionamiento asociados a las funciones primarias tienen que ver con la velocidad, volumen y capacidad de almacenamiento. Por lo general también necesita considerarse en esta etapa de calidad del producto.

Las funciones secundarias son aquellas que se supone que la mayoría de los activos físicos cumplen como una o más funciones adicionales además de la primaria.

Las formas o maneras de fallar y sus causas para satisfacer las funciones anteriores, son las fallas funcionales que se describen a continuación.

Las fallas funcionales ya se definieron como los estados de falla, cuando las máquinas y equipos no pueden cumplir su función de acuerdo al parámetro que el usuario espera o considera aceptable, por ejemplo, para este caso una falla funcional sería ¿por qué la planta no arranca a pesar de que recibe la señal eléctrica para hacerlo? En otras palabras, identifican todos los estados indeseables del sistema y para el caso de la planta eléctrica de emergencia, la falla funcional genérica será no ser capaz de cumplir con su cometido de generar la potencia eléctrica con las calidades requeridas, a la hora de que el sistema de suministro externo a la planta o institución se suspenda o falle.

Brevemente, se recordará que los modos de falla de una planta eléctrica de emergencia son los eventos, circunstancias o hechos por medio de los cuales se manifiesta la falla, por ejemplo, la trampa de agua en el combustible está muy saturada de agua y no hay paso de combustible hacia el sistema de inyección.

Deben incluirse aquellos debidos a fallas ya ocurridas, actualmente prevenidas o aquellas que no han acaecido pero que tienen una ocurrencia muy probable y las causadas por errores humanos o de diseño.

Y antes de entrar al detalle de los modos de falla para la planta eléctrica de emergencia, es necesario describir qué son los efectos de falla que es el cuarto paso en el proceso de revisión del RCM (luego de haber conceptualizado las funciones, fallas funcionales y análisis de modos de falla) y consiste en hacer una lista de lo que de hecho sucede al producirse cada modo de falla, en otras palabras, describen qué sucede cuando ocurre un modo de falla.

La descripción de estos efectos debe abarcar toda la información necesaria para la evaluación de las consecuencias de las fallas, es decir, cuando se describen los efectos de una falla, debe consignarse:

- La prueba, de existir, de que se ha producido una falla.
- Las formas, de existir, de que la falla representa una amenaza para la seguridad o al medio ambiente.
- Las formas, de haberlas, de cómo se afecta la producción, operaciones o servicios.
- Los daños físicos, si los hay, causados por la falla.
- Qué y cómo reparar la falla.

Los efectos de falla para evaluarlos en una planta eléctrica de emergencia, hay que tener presente:

- ¿La falla presenta síntomas evidentes antes de manifestarse?
- ¿Se despliega alguna(s) alarma(s) durante el fallo?
- Velocidad de degradación de la falla.
- ¿La falla pone en riesgo la seguridad de las personas o del equipo?
- ¿Existen riesgos de explosión o electrocución?
- ¿La falla pondría en riesgo el prestigio de la empresa o a la misma empresa?
- ¿Podría haber consecuencias en el medio ambiente?
- ¿Es fácil de detectar la falla?

Las consecuencias pueden ser aquellas de fallas ocultas o no evidentes, ambientales y para la seguridad, operacionales (calidad del servicio o sea potencia, voltaje, frecuencia, costos de proporcionar estos servicios) y no operacionales cuya consecuencia se refiere solo al costo de la reparación.

Para una planta eléctrica de emergencia, los modos de falla pueden ser clasificados en tres grupos de la siguiente manera, utilizando el RCA.

- Capacidad bajo el funcionamiento deseado: deterioro (fatiga, corrosión, abrasión, entre otros), fallas de lubricación (falta y falla del lubricante, lubricante inadecuado), polvo o suciedad, desarme (falla en: soldaduras, uniones, remaches, bulones, conexiones, entre otros), errores humanos.
- Capacidad por sobre el funcionamiento deseado: el funcionamiento deseado aumenta hasta que el activo no puede responder, el aumento del esfuerzo causa que se acelere el deterioro hasta el punto en que el activo se torna tan poco confiable que deja de ser útil.
- Capacidad inicial fuera del rango de necesidad de potencia desde el inicio: el funcionamiento deseado está fuera del rango de capacidad inicial desde el comienzo, ya sea por sub o sobre dimensionamiento:

El nivel de detalle afecta profundamente la validez del análisis de los modos de falla y la cantidad de tiempo que requiere hacerlo. La escasez de detalles y/o modos de falla puede llevar a un análisis superficial y hasta peligroso. Por el contrario, demasiados modos de falla o demasiado detalle hacen que todo el proceso RCM lleve mucho más tiempo que el necesario. Esto significa que es esencial tratar de lograr un equilibrio correcto.

El RCM requiere que es necesario definir todos los modos de falla que, en este caso, la planta eléctrica de emergencia puede sufrir, determinando las circunstancias que pueden ocurrir para llevar a la falla al equipo e identificando las circunstancias que puedan ser la causa que esta falle.

1.15. Diseño de una planta eléctrica de emergencia

Las cargas eléctricas que se conectarán a ella deben clasificarse según su voltaje, número de fases y potencia, principalmente, totalizando esta y previendo un porcentaje adecuado de sobredimensionamiento, generalmente no más allá de un 25 %, Sin embargo, si el propietario o responsable tiene planes específicos, se tomarán en cuenta, para que el equipo esté preparado para estos futuros incrementos de la carga instalada y a instalar. Con esta información se tendrá la potencia aparente de diseño (KVA o MVA), que habrá de conciliar con los valores comerciales disponibles en el mercado de los equipos. También para este cálculo existen aplicaciones electrónicas (*software*) que las empresas que venden estos equipos ponen a disposición del cliente interesado en adquirir el equipo, pero el cliente debe saber la información ya indicada anteriormente. Luego hay que definir la clasificación (*rating*) para la misma, es decir, para cuando el equipo se desempeñará como fuente de suministro alterno y eventual de energía eléctrica, es llamado de tipo o clasificación *stand-by* (reserva) o sea para el suministro continuo de potencia eléctrica (a carga variable) en el evento de una falla en el suministro eléctrico. No hay sobrecarga permitida para esta clasificación.

De consideración secundaria serán las condiciones físicas de instalación, como, por ejemplo, un área adecuada, protección contra el polvo y la lluvia, que la dirección del soplado del escape sea preferentemente hacia el sur, un espacio adecuado, seguro y con las debidas formalidades de diseño, para el tanque de combustible externo, accesibilidad para el suministro de combustible a este tanque, su dique de contención de derrames con sus detalles específicos y las medidas de protección contra incendios en toda el área.

1.15.1. ¿Qué se espera de una planta eléctrica de emergencia?

Según estándar o norma NFPA 110 –Capítulo 8– Mantenimiento de rutina y pruebas operacionales, de este equipo o planta eléctrica de emergencia, se espera que, en momentos de emergencia, es decir:

- De una falla interna o aquella en el circuito eléctrico al cual está conectada la planta de emergencia y ya debidamente aislada al momento por los actuadores de protección (interruptores termomagnéticos), o
- Ya sea una falta del suministro eléctrico de la compañía de electricidad que abastece la instalación o circuito al cual está conectada la planta de emergencia, responda inmediatamente aportando la potencia eléctrica necesaria o requerida (con todas las cualidades necesarias, como son el adecuado nivel de voltaje, el número de fases, la misma secuencia de fases y la misma frecuencia eléctrica, que en Guatemala y muchos otros países de América es de 60 Hz.).

Pero para tener este nivel de confiabilidad, es necesario tener la certeza que el equipo en cuestión sea capaz de generar la energía eléctrica con las características ya descritas anteriormente, en otras palabras, hacer bien las tareas, según la norma ISO 9001 –Sistemas de gestión de calidad–.

Se recomienda la instalación de un ejercitador semanal, de por lo menos 15 minutos un día específico de la semana para asegurar el buen funcionamiento en momentos de exigencia del equipo (falla del suministro eléctrico externo).

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

En el medio guatemalteco, existen muchas empresas o instituciones estatales que cuentan con una planta eléctrica de emergencia. Esto se debe a que en la década de los años noventa hubo racionamiento en el servicio. También se debe a la necesidad de contar para responder cuando falla el sistema municipal o estatal. Podría decirse que la mayoría de estas empresas o instituciones cuentan con un servicio propio o contratado de mantenimiento preventivo para estos equipos. No obstante, con frecuencia no les confieren la atención necesaria a los resultados de los mantenimientos preventivos mensuales, trimestrales, semestrales o de otra periodicidad. Tampoco se les presta atención a los resultados de los mantenimientos correctivos. Con frecuencia consideran que ambos tipos de mantenimiento representan un gasto, no una inversión. Como consecuencia, el beneficio de la información del estado de los equipos se pierde o pasa inadvertida. De esta forma también se pierde, el objetivo del monitoreo de condición, que representa la intervención en el momento preciso sin que ocurra la falla funcional. Se pierde el beneficio de la interpretación de los resultados de las hojas de información de los mantenimientos preventivos y correctivos por esta cantidad de información que recibe el responsable del equipo.

Para la elaboración de este trabajo, se tomó el formato de un estudio cualitativo cuyo objetivo para este caso, es hacer coherente lo que desde otro punto de vista aparece como un conjunto de hechos o resultados del monitoreo de condición, desconectados.

La teoría de la investigación cuantitativa no solo revela, sino que oculta. Sin categorías y modelos las explicaciones se pierden en una miríada de detalles no siempre significativos, y pierden así su unidad social, pero, por el contrario, con las categorías y los modelos, aunque se asegure la utilidad, se corre el riesgo de obscurecer lo que es individual, único y específico.

Pero la teoría no sólo debe permitirnos que nos anticipemos al futuro, sino también orientarnos en qué debemos centrar nuestra mirada cuando lleguemos al mismo.

Los modelos cualitativos consisten en métodos basados en cualidades, que se establecen por lineamientos de cada empresa soportadas en opiniones de sus especialistas.

Las características de los modelos cuantitativos pueden contener alta subjetividad, normalmente son procesos de análisis de baja complejidad, se ven influenciados por empresas con información escasa y poco confiable y pueden requerir en ocasiones métodos más severos de validación de los resultados. (Rodríguez *et. al.* 1996, p. 2)

Lo anterior justifica el diseño de una gestión normalizada de metodología cualitativa aplicada al RCM para una planta eléctrica de emergencia, que es lo que se describe a profundidad y que implica un proceso de indagación caracterizado por una revisión detallada, comprehensiva, a profundidad y sistemática de este trabajo.

2.1. Procedimiento vigente a la fecha

El procedimiento del desarrollo del plan en uso a la fecha se muestra gráficamente a continuación.

Tabla III. Procedimiento vigente a la fecha

Control de enmiendas			
Naturaleza de la modificación	Página	Revisión	Fecha
Revisión	Todas	1	20-sep-20

Validación		
	Redactor	Verificador
Fecha	28-may-19	28-may-19
Nombre	José L. Méndóza	Sergio Soto
Equipo	Planta eléctrica de emergencia Ottomotores CNY500	
Correo	jolmenalv@gmail.com	sergiorsg.gt@gmail.com

Difusión					
Puesto	Tipo de documento	No. de copia	Formato de la copia	Sitio de archivo	Fecha
Asesor	Original	0	Impreso y digital	Biblioteca propia	2-oct-20
Revisor de escuela	Copia	1	Impreso y digital	Biblioteca propia	5-oct-20
Coordinación maestría	Copia	2	Impreso y digital	Biblioteca propia	6-oct-20
Empresa interesada	Copia	3	Impreso y digital	Biblioteca propia	26-oct-20

Continuación de la tabla III.

Objetivo	Determinar los procedimientos escritos tales como rutinas de inspección, listas de verificación o <i>Check-lists</i> , Análisis Causa Raíz, Órdenes de trabajo y aquellos propios del funcionamiento, o no, del equipo) a la fecha del mantenimiento para una planta eléctrica de emergencia.
-----------------	---

JL.P/18

Alcance	Redactar el procedimiento utilizado a la fecha del VOSOA y ejecución del plan de mantenimiento preventivo cuatrimestral a la fecha de la planta eléctrica de emergencia, objeto de este trabajo, realizando una inspección visual del procedimiento y obteniendo conclusiones (ver Verificación).
----------------	---

JL.P/18

Equipos involucrados	
No.	Equipo
1	Tablero de control de la planta eléctrica de emergencia, donde se muestran, en general o principalmente, los siguientes parámetros: - RPM del generador eléctrico. - Voltaje trifásico generado. - Voltaje de las baterías. - Temperatura de la camisa de agua del cárter.

JL.P/18

Continuación de la tabla III.

Personal involucrado		
No.	Cargo	Competencia
1	Ingeniero de mantenimiento de la institución o empresa	Recopilación de información.
2	Supervisor de electricidad de la institución o empresa.	Responsable de la debida ejecución del mantenimiento preventivo del equipo.
3	Ejecutor del servicio.	Realizar el mantenimiento preventivo del equipo.
4	Ayudante del ejecutor del servicio.	Colaborar con el ejecutor del servicio en actividades de asistencia.

JLPIII

Tiempos estimados de ejecución
Ejecución del mantenimiento preventivo al equipo. 02 horas

JLPIII

Continuación de la tabla III.

Equipo de seguridad personal utilizado por los ejecutores del mantenimiento preventivo	
No.	Equipo
1	Calzado de seguridad con punteras de acero.
2	Uniforme (camisa de manga larga y pantalón de lona).
3	Casco de seguridad con clasificación ANSI/ISEA Z89.1 2014 Y CSA Z94.1 2015 tipo II.
4	Chaleco de seguridad (con reflectivos)
5	Gafas de seguridad ANSI Z87.1.
6	Guantes de mecánico con clasificación EN 388.
7	Mascarilla N95.

ALPIS

Continuación de la tabla III.

Herramienta utilizada por los ejecutores del mantenimiento preventivo	
No.	Herramienta
1	Caja metálica para herramientas.
2	Alicate y pinzas de mecánico.
3	Destornilladores de castigadera recta y cruciformes.
4	Cangrejo de 18".
5	Juego de copas milimétricas y en pulgadas.
6	Maneral para copas.
7	Arco de sierra con segueta.
8	Llave para filtros de aceite.
9	Juego de llaves de cola-corona milimétricas y en pulgadas.
10	Juego de llaves Allen o hexagonales milimétricas y en pulgadas.
11	Martillo de mecánico.
12	Mazo de hule.
13	Linterna LED.
14	Brocha de 3".
15	Cinta métrica o flexómetro de 5 m.

JL 2010

Continuación de la tabla III.

Materiales utilizados por los ejecutores del mantenimiento preventivo	
No.	Material
1	1 lb. de <i>wipe</i> .
2	Toallas para limpieza (sin motas).
3	Aflojalotodo en aerosol.
4	Aceite del tipo (viscosidad, tipo, aprobaciones) sugerido por el fabricante del equipo.
<small>JL.PH.B</small>	

Repuestos utilizados por los ejecutores del mantenimiento preventivo	
No.	Repuesto
1	Filtro de aceite del tipo sugerido por el fabricante del equipo.
2	Filtro de lubricante del tipo sugerido por el fabricante del equipo.
3	Filtro de combustible del tipo sugerido por el fabricante del equipo.
4	Fajas para el ventilador del tipo y dimensiones sugerido por el fabricante.
<small>JL.PH.B</small>	

Condiciones preliminares	
1	Abrir (oprimir) el interruptor de paro automático de la planta eléctrica de emergencia.
2	VOSOA rápido de las condiciones actuales de la planta eléctrica de emergencia.
<small>JL.PH.B</small>	

Continuación de la tabla III.

Inspección VOSOA del mantenimiento preventivo a la fecha	
1	No identifica exactamente al equipo.
2	No muestra el registro de los parámetros del equipo tanto detenido como en marcha, únicamente informa que 'se realizaron las pruebas de arranque y operación sin carga'.
3	Muestra falta información importante acerca de la revisión de fugas, del turbo, mangueras, escape, etc.
4	Muestra falta de acuciosidad en el detalle del desarrollo y resultados obtenidos del mantenimiento preventivo que se describe.
5	En el formato de esta Orden de Servicio, no se muestra la opción de tomar una muestra de aceite para sugerir o realizar un análisis del aceite del equipo.
6	El mantenimiento es cuatrimestral, cuando lo recomendado es hacerlo de forma mensual. Esta política respecto a la frecuencia del mismo se justifica, en la institución propietaria de la planta eléctrica de emergencia, por cuestiones económicas, o sea de presupuesto limitado y poco conocimiento de los beneficios de un programa de mantenimiento bien implementado.

ALP/A

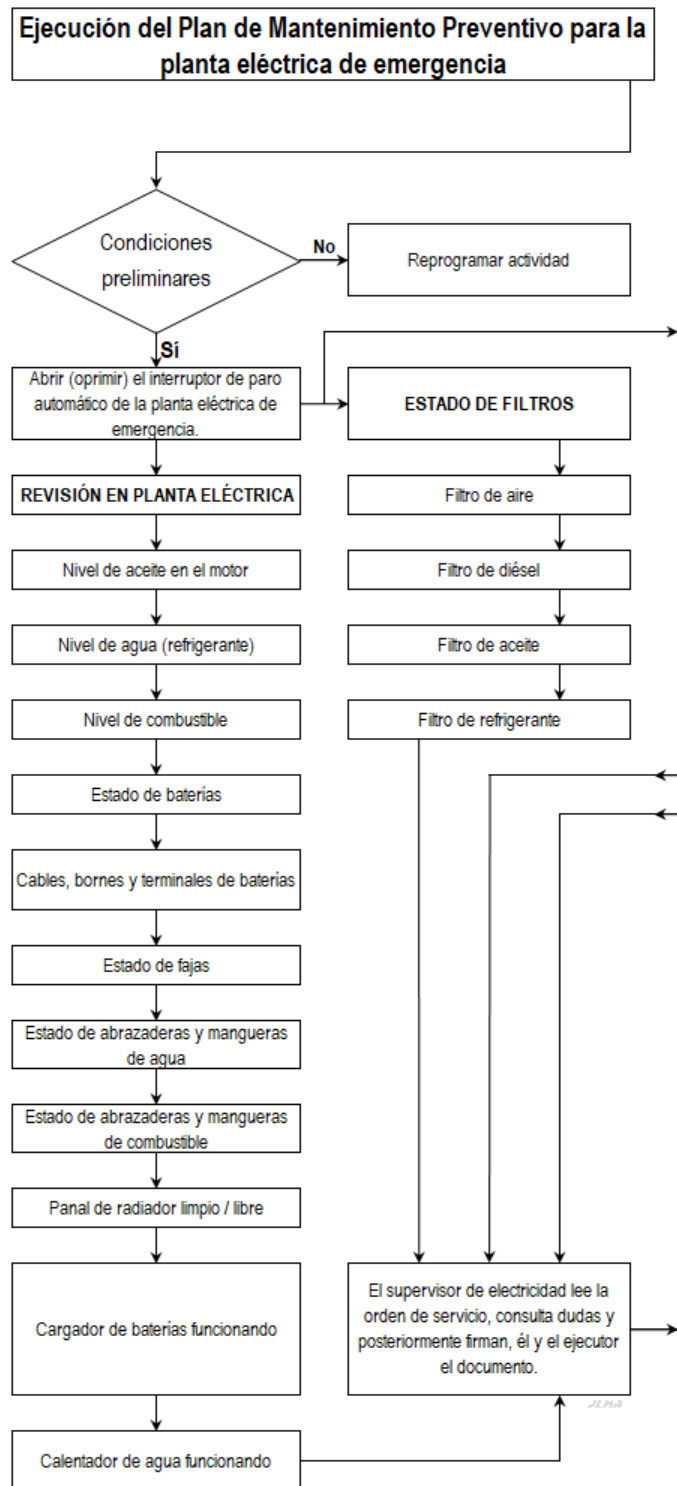
Continuación de la tabla III.

Informe de actividades	
1	Ejecución de las Condiciones Preliminares
2	El personal contratista de la compañía de mantenimiento preventivo anota cada actividad realizada.
3	El personal contratista de la compañía de mantenimiento preventivo anota los parámetros del equipo tanto detenido como en marcha.
4	El supervisor de electricidad lee la orden de servicio, consulta dudas y posteriormente firman, él y el ejecutor el documento.
5	Al siguiente día el supervisor de electricidad recibe la orden de servicio formal.
6	El supervisor de electricidad informa de forma escrita a las autoridades involucradas de la institución o empresa, indicando el procedimiento llevado a cabo, fotografías y resultados.

J.E.P.S.B

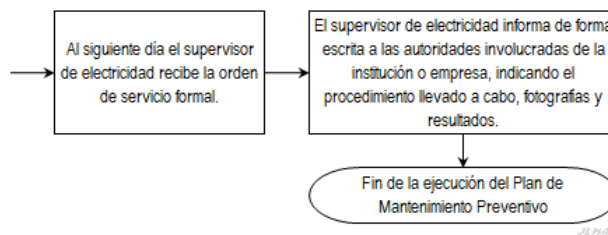
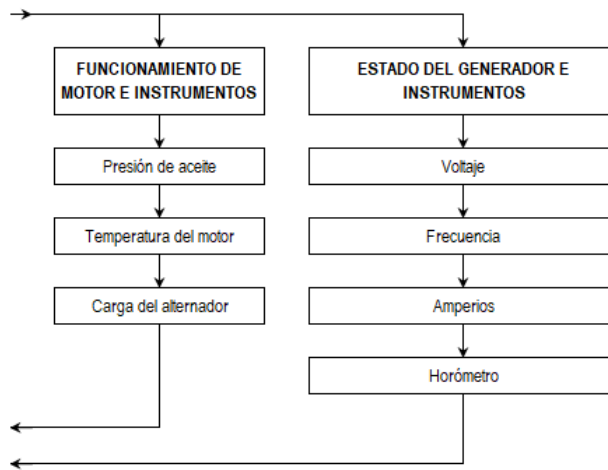
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Diagrama de flujo del procedimiento a la fecha



Continuación de la figura 9.

Ejecución del Plan de Mantenimiento Preventivo para la planta eléctrica de emergencia (continuación)



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestra la orden de servicio del mantenimiento preventivo a la fecha para la planta eléctrica de emergencia, de donde se han tomado las tareas que se ejecutan en cada servicio:

Tabla IV. Orden de servicio

Orden de Servicio
Nº 008232 DIA / MES / AÑO
28 / 05 / 2019

Cliente: _____ Tel.: _____
 Dirección: _____ Nit.: _____
 Contacto: _____ Equipo: **PLANTA ELÉCTRICA**
 Instrucciones del Cliente: **SERVICIO DE MANTENIMIENTO MAYOR**

Trabajos Efectuados: Cambio de aceite al motor, cambio de filtros de aire, diesel y aceite, limpieza externa del radiador y aplicación de refrigerante, Verificación del estado de carga de las baterías, Limpieza de batería eliminando el sulfato de plomo de los bornes, Inspección del motor, alternador y generador, limpieza externa del motor, radiador y generador, Tensión y condición de fajas, limpieza de toda el área de la caseta de la planta. **REVISIÓN DEL PANEL DE CONTROL:** Revisión del voltímetro de la batería y de salida del generador funcionamiento del medidor de frecuencia eléctrica, funcionamiento del indicador de temperatura de agua de la camisa de agua del block y del radiador, Pruebas de arranque y operación sin carga, Revisión de la frecuencia (RPM) del generador en funcionamiento

Chequeo en Planta Eléctrica		
1.	Nivel de Aceite en el Motor	✓
2.	Nivel de Agua / Refrigerante	✓
3.	Nivel de Combustible	✓
4.	Estado de Baterías	✓
5.	Cables, Bornes y Terminales de Batería	✓
6.	Estado de Fajas	✓
7.	Estado de Abrazaderas y Mangueras de Agua	✓
8.	Estado de Abrazaderas y Mangueras de Combustible	✓
9.	Panal de Radiador Limpio / Libre	✓
10.	Cargador de Baterías Funcionando	✓
11.	Calentador de Agua Funcionando	✓
Estado de Filtros		
1.	Filtros de Aire P613333	✓
2.	Filtros de Diesel F51040	✓
3.	Filtros de Aceite LF9070	✓
4.	Filtros de Refrigerante WF2126	✓
Funcionamiento de Motor e Instrumentos		
1.	Presión de Aceite 45psi	✓
2.	Temperatura de Motor 80°C	✓
3.	Carga de Alternador 77.1v	✓

Estado del Generador e Instrumentos

Voltaje: 277/480
 Hz: 60
 Amperios: _____
 Horometro: 182 hrs 12 min.

Estado y funcionamiento de Transferencia Automática o Manual

Marca: alternadores
 Modelo: _____
 Especificación: _____
 Serie: _____
 K.W.: 500
 K.V.A.: 625
 H.P.: _____

*Observaciones: _____

✓ Correcto * Observaciones

 RECIBI CONFORME TECNICO RESPONSABLE


Fuente: empresa del estudio. (2019).

Nótese que, aunque aparentemente las tareas indicadas en el documento anterior cubren los aspectos básicos de un Mantenimiento Preventivo, esto representa el concepto que tradicionalmente se tiene acerca de este, tal vez sin haberse razonado concienzudamente si todas estas tareas son necesarias con la periodicidad con que se efectúa este servicio.

En este punto radica una de las utilidades del RCM y que es el análisis profundo de la periodicidad con que deben efectuarse aquellas tareas propuestas en las hojas de revisión de este.

La siguiente es una galería de fotografías donde se ve al personal de la empresa contratista elaborando el mantenimiento preventivo.

Tabla V. Fotografías del proceso a la fecha del mantenimiento preventivo de la planta eléctrica de emergencia

	Revisión del estado y tensión de las fajas del radiador y revisión de mangueras de refrigerante en la conexión al bloque.
---	---

Continuación de la tabla V.

	<p>Revisión del estado de las baterías, sus conexiones, posible acumulación de sulfato de plomo en sus bornes y revisión del apriete de los terminales a estos.</p> <p>Revisión del ventilador y guarda del mismo.</p>
	<p>Limpieza interior del panel de control de la planta eléctrica de emergencia.</p>

Continuación de la tabla V.

	<p>Cambio de lubricante y filtro de este.</p>
	<p>Revisión del escape.</p> <p>Revisión de la aparamenta y conexiones del tablero de control.</p>

Continuación de la tabla V.

 A black and white photograph showing the interior of an emergency power plant control panel. The panel is densely packed with various electrical components, including a large terminal block with numerous wires, a control unit with a fan, and other electronic modules. The background shows a doorway leading to another room.	<p>Vista interior del tablero de control de la planta eléctrica de emergencia.</p>
--	--

Fuente: elaboración propia.

3. PROCEDIMIENTO DE IMPLEMENTACIÓN DEL RCM

Para analizar el procedimiento del mantenimiento para una planta eléctrica de emergencia a la fecha, se debe tratar la metodología RCM a utilizar, que propone un procedimiento que permite identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional y eliminar o mitigar la totalidad de las consecuencias de falla posibles, a partir del análisis de las siete preguntas básicas del RCM, indicadas en el inciso 1.7. que se vuelven a indicar a continuación:

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
- ¿En qué sentido es importante cada falla?
- ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Actualmente, las únicas tareas de mantenimiento que se realizan para la planta eléctrica de emergencia consisten en llevar un registro del mantenimiento

preventivo que se le proporciona al equipo y un control semanal del arranque a través del ejercitador para mostrar y permitir la detección prematura de fallas para que estas no entorpezcan el desempeño de la planta de emergencia cuando se le requiera.

Para el control y ejecución del mantenimiento preventivo se utiliza la Orden de Servicio, propio de la compañía encargada del mismo, mostrado antes.

Revisión en la planta eléctrica de emergencia

- Nivel de aceite en el motor.
- Nivel de agua (refrigerante).
- Nivel de combustible.
- Estado de baterías.
- Cables, bornes y terminales de baterías.
- Estado de fajas.
- Estado de abrazaderas y mangueras de agua.
- Estado de abrazaderas y mangueras de combustible.
- Panal de radiador limpio / libre.
- Cargador de baterías funcionando.

- Calentador de agua funcionando.

Estado de filtros

- Filtro de aire.
- Filtro de diésel.
- Filtro de aceite.
- Filtro de refrigerante.

Funcionamiento de motor e instrumentos

- Presión de aceite.
- Temperatura del motor.
- Carga del alternador.

Estado del generador e instrumentos

- Voltaje.
- Frecuencia.
- Amperios.
- Horómetro.

En el mismo se aprecia que el mantenimiento detallado es muy sencillo porque no analiza a profundidad algunos detalles de mantenimiento que son importantes, por ejemplo:

- No identifica exactamente al equipo.
- No muestra el registro de los parámetros del equipo tanto detenido como en marcha, únicamente informa que se realizaron las pruebas de arranque y operación sin carga.
- Muestra falta información importante acerca de la revisión de fugas, del turbo, mangueras, escape, entre otros.
- Muestra falta de acuciosidad en el detalle del desarrollo y resultados obtenidos del mantenimiento preventivo que se describe.
- En el formato de esta Orden de Servicio, no se muestra la opción de tomar una muestra de aceite para sugerir o realizar un análisis del aceite del equipo.
- El mantenimiento es cuatrimestral, cuando lo recomendado es hacerlo de forma mensual. Esta política respecto a la frecuencia de este se justifica, en la institución propietaria de la planta eléctrica de emergencia, por cuestiones económicas, o sea de presupuesto limitado y poco conocimiento de los beneficios de un programa de mantenimiento bien implementado.

El objetivo de este trabajo no es calificar ni criticar los procedimientos actuales. De lo anterior se aprecia que el mantenimiento actual del equipo es

tradicionalista, sencillo e incumple con los requerimientos de gestión de calidad del ISO 9001 y que le podrían dar confiabilidad al mantenimiento actual.

En el contexto del mantenimiento de las plantas eléctricas de emergencia y sus detalles, y tomando como referencia lo abordado sobre este tema en el estándar SAE–JA1011, así como lo dictado por la norma NFPA 110 –Capítulo 8– mantenimiento de rutina y pruebas operacionales, se muestra a continuación la placa de características de la planta eléctrica de emergencia:

Tabla VI. **Placa de características o ficha técnica del equipo**

FICHA TÉCNICA DEL EQUIPO

Nombre del equipo	PLANTA GENERADORA DE ENERGÍA ELÉCTRICA				
Ubicación	Caseta de la planta de emergencia				
Marca	ottomotores - DALE				
Fecha	Sep 11	Serie No.	24832	Modelo	CNY500
Tipo	AUTOMATIC	OTP/WO	20219	Peso	3745 Kg
Frecuencia	60 Hz	Voltaje	480 VAC/ACV	Fases	3 - 4H
Motor	CUMMINS	Modelo	QSX15G9	Serie No.	79494729
Generador	STAMFORD	Modelo	HCI534D	Serie No.	M11H315623
Prime	455 kW	568 kVA		FP	0.8
Standby	500 kW	625 kVA		M.S.N.M	2300
		Altura máxima de sitio de instalación	3000 M		
		Máxima temperatura ambiente	40 °C		

OTP = On-Truck Plant

Fuente: elaboración propia.

A partir de este propósito, se desarrollaron varias y detalladas actividades para la ejecución del método cualitativo ya descrito, según se muestra y analiza a continuación.

Cuando ocurre una falla a la planta eléctrica de emergencia puede sufrir un desplome breve de sus tres parámetros esenciales del mantenimiento vistos

anteriormente: su confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. Esto genera problemas para el desempeño de las labores de todos los trabajadores de cualquier nivel de la empresa o institución. Por ejemplo, la 'caída' de las redes de comunicación, datos y teléfonos, la suspensión del proceso productivo de la institución, la falta de los servicios médicos de emergencia, entre otros.

Cada falla de la planta eléctrica de emergencia es importante, porque interrumpirá un proceso productivo el cual ha sido afectado por la falta del suministro de energía eléctrica proveniente de la compañía de electricidad. Esto perjudica a personas, instalaciones, procesos, entre otros, de la empresa o institución.

Para prevenir las consecuencias de fallas aplicando el RCM, primero debe conocerse a fondo la planta eléctrica de emergencia, desde la metalurgia de sus principales componentes, pasando por el sistema de ensamble y funcionamiento de sus principales componentes y ya estas armadas en un complejo mecanismo o sistema, las partes accesorias de estos bloques. Finalmente se aborda el conocimiento básico de su funcionamiento. Esto será factor decisivo para definir una falla, conocer su origen y opinar o sugerir la ruta de reparación. Es decir, se decide si se solicita que el técnico de la empresa de mantenimiento contratada la repare o lo haga el personal de la empresa, institución o entidad propietaria del equipo.

En caso de no encontrar una tarea proactiva adecuada para un modo de falla determinado, deberán tomarse medidas extremas como aquella sugerida en el SAE–JA1011– a saber:

5.8.2 Operar hasta Fallar— Cualquier política de operar hasta fallar seleccionada debe satisfacer los criterios apropiados como sigue:

3.8.2.1 En casos donde la falla es oculta y no hay ninguna tarea programada apropiada, la falla múltiple asociada no debe tener consecuencias en la seguridad ni el ambiente.

5.8.2.2 En casos donde la falla es evidente y no hay ninguna tarea programada apropiada, el modo de falla asociado no debe tener consecuencias en la seguridad ni en el ambiente. (SAE-International, 1999, sin página)

Una vez aclarados los puntos anteriores y constituyentes de las funciones, fallas funcionales, análisis de modos de falla y efectos de los modos de falla, se considerarán los siguientes conceptos.

3.1. Hoja de información

La mejor manera de mostrar la conexión y la diferencia entre los estados de falla y los eventos que podrían causarlos es primero hacer un listado de fallas funcionales, y luego registrar los modos de falla que podrían causar cada falla funcional, según la hoja de información mostrada, explicada y debidamente llena, para el tema de este trabajo, más adelante. (Moubray, 2004, p. 56)

El formato de esta hoja puede verse a continuación y más adelante debidamente llenas.

Tabla VII. Hoja de información

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II						
HOJA DE INFORMACIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.		SISTEMA	SISTEMA No.	Facilitador:	Fecha	Hoja No.:
		Turbina de gas de 5MW	216 - 05	N. Smith	07 - 07 - 1998	1
		SUBSISTEMA	SUBSISTEMA No.	Auditor	Fecha	de:
		Sistema de Escape	216 - 05 - 11	P. Jones	07 - 08 - 1998	3
FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL (Pérdida de función)	MODO DE FALLA	EFECTO DE FALLA (Qué sucede cuando se produce una falla)			
1	Conducir sin restricciones todos los gases calientes de la turbina hasta un punto fijado a 10 metros encima del techo de la sala de turbinas.	A	Incapaz de canalizar los gases	1	Montantes del silenciador corroidos	El ensamble del silenciador colapsa y cae al fondo del conducto. La contrapresión hace que la turbina se acelere violentamente y se pare a una alta temperatura de escape. Tiempo de parada de máquina para reemplazar el silenciador, hasta cuatro semanas.
		B	Flujo de gases restringido	1	Se desprende parte del silenciador por fatiga	Según la naturaleza del atasco, la temperatura de escape puede subir hasta parar la turbina. Partículas de deshecho sueltas podrían dañar partes de la turbina. Tiempo de parada de máquina para reparar el silenciador, 4 semanas.
		C	No puede contener los gases	1	Se agujerea la junta flexible por corrosión	La junta flexible está dentro de la campana de la turbina, de modo que la mayor parte de la fuga de los gases de escape sería evacuada por el sistema de extracción de la campana. No es probable que los mecanismos existentes de detección de incendio y gases dentro de la campana detecten una fuga de gases de escape, y es improbable que la temperatura suba lo suficiente como para hacer disparar la alarma detectora de fuego. Una pérdida grave puede hacer que se sobrecaliente el separador de partículas sólidas y líquidas en los gases, así como fundir la alarma de control situada cerca de la fuga, con consecuencias imprevisibles. Los equilibrios de presión dentro de la campana son tales que es probable que poco, o ningún, gas pueda escapar por una fuga pequeña, de manera que es posible que no se detecte una fuga pequeña por el olfato o el oído. Tiempo de parada de máquina para reemplazar la junta, hasta 3 días.
				2	Junta del conducto colocada incorrectamente	Los gases se fugan al interior de la sala de turbinas y la temperatura ambiente sube. El sistema de ventilación de la sala de turbinas evacuaría los gases a través de las rejillas a la atmósfera, por lo cual se considera poco probable que la concentración de gases de escape alcance niveles nocivos. Una fuga pequeña en este punto puede ser audible. Tiempo de parada de máquina para reparar, hasta 4 días.
2	Reducir el nivel de ruido del escape a Nivel de Ruido de ISO, a 50 metros			3	Fuelle superior agujereado por corrosión	Los fueles superiores están situados fuera de la sala de turbinas, de manera que los gases procedentes de una fuga aquí se dispersarían a la atmósfera. Puede que suba el nivel de ruido del ambiente. Tiempo de parada de máquina para reparar, 1 semana.
				1	Bulones de montaje de la chimenea de escape cortadas por oxidación	Probablemente la chimenea comience a inclinarse, y sea sostenida por los cables de anclaje por un tiempo, antes de desmoronarse. Si cayera, existe una gran posibilidad de que dañe una estructura ocupada por personas. Tiempo de parada de máquina para reparar, entre varios días y varias semanas.
		D	No puede transportar los gases a un punto situado a 10 metros encima del techo	2	Chimenea de escape demibada por vientos fuertes	La estructura del conducto está diseñada para soportar vientos de hasta 360 Km/h, por lo que solo tiene posibilidades de caerse durante una tormenta si los cables de anclaje han sido debilitados, quizá por corrosión. De ocurrir, podría caer sobre un módulo de viviendas. Tiempo de parada de máquina para reparar, hasta varias semanas.
				1	Malla de retención de material el silenciador corroida	La mayoría del material se volaría hacia afuera, pero es posible que parte de él caiga al fondo del conducto y obstruya la salida de la turbina, causando una alta temperatura de gases de escape y posible intempción en el servicio de la turbina. Los niveles de ruido subirían progresivamente. Tiempo de parada de máquina para reparar, alrededor de 2 semanas.
		A	El nivel de ruido excede el Nivel de Ruido 30 de ISO, a 50 metros	2	Fugas del conducto fuera de la sala de turbinas etc.

Figura 4.13: La Hoja de Información de RCM

Análisis de Modos de Falla y sus Efectos (AMFE) 93

Fuente: Moubray. (2004). RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Este cuadro también indica que, como mínimo, la descripción de un modo de falla debe incluir un sustantivo y un verbo. La descripción debe ser lo suficientemente detallada para poder seleccionar una estrategia de manejo de falla apropiada, pero no tanto como para perder mucho tiempo en el propio proceso de análisis.

Los verbos que se usan para describir los modos de falla deben elegirse cuidadosamente, ya que tienen una influencia muy fuerte en el proceso posterior de selección de políticas de manejo de falla. Por ejemplo, deben

usarse con moderación expresiones como 'falla' o 'rotura' o 'mal funcionamiento de', ya que dan muy poca información sobre cuál podría ser la manera adecuada de manejar esta falla. El uso de verbos más específicos permite seleccionar la política más adecuada dentro de un rango completo de posibilidades. (Moubray, 2004, p. 57)

Se debe reforzar la idea del nivel al que se maneja el mantenimiento de cualquier activo físico no es el nivel de un activo como un todo, ni el nivel del componente, sino el nivel de cada modo de falla. Entonces, antes de desarrollar una estrategia sistemática de manejo proactivo de mantenimiento para cualquier activo físico, se debe identificar cuáles son estos modos de falla (o cuáles podrían ser).

Algunas veces, uno de los modos de falla podría ser eliminado por un cambio en el diseño, y otro mejorando el entrenamiento o los procedimientos.

Entonces, no todo modo de falla debe ser tratado con reacondicionamiento cíclico.

Las hojas de información, según explica Moubray (2004), adaptadas a los sistemas y subsistemas de la planta eléctrica de emergencia, bajo el planteamiento del RCM II™ se muestran en este mismo capítulo.

Para el caso, propiamente de la planta eléctrica de emergencia, las hojas de información contienen las características de las funciones, fallas funcionales, modos de falla y efectos de falla de cada uno de los subsistemas de los dos sistemas ya indicados, o sea:

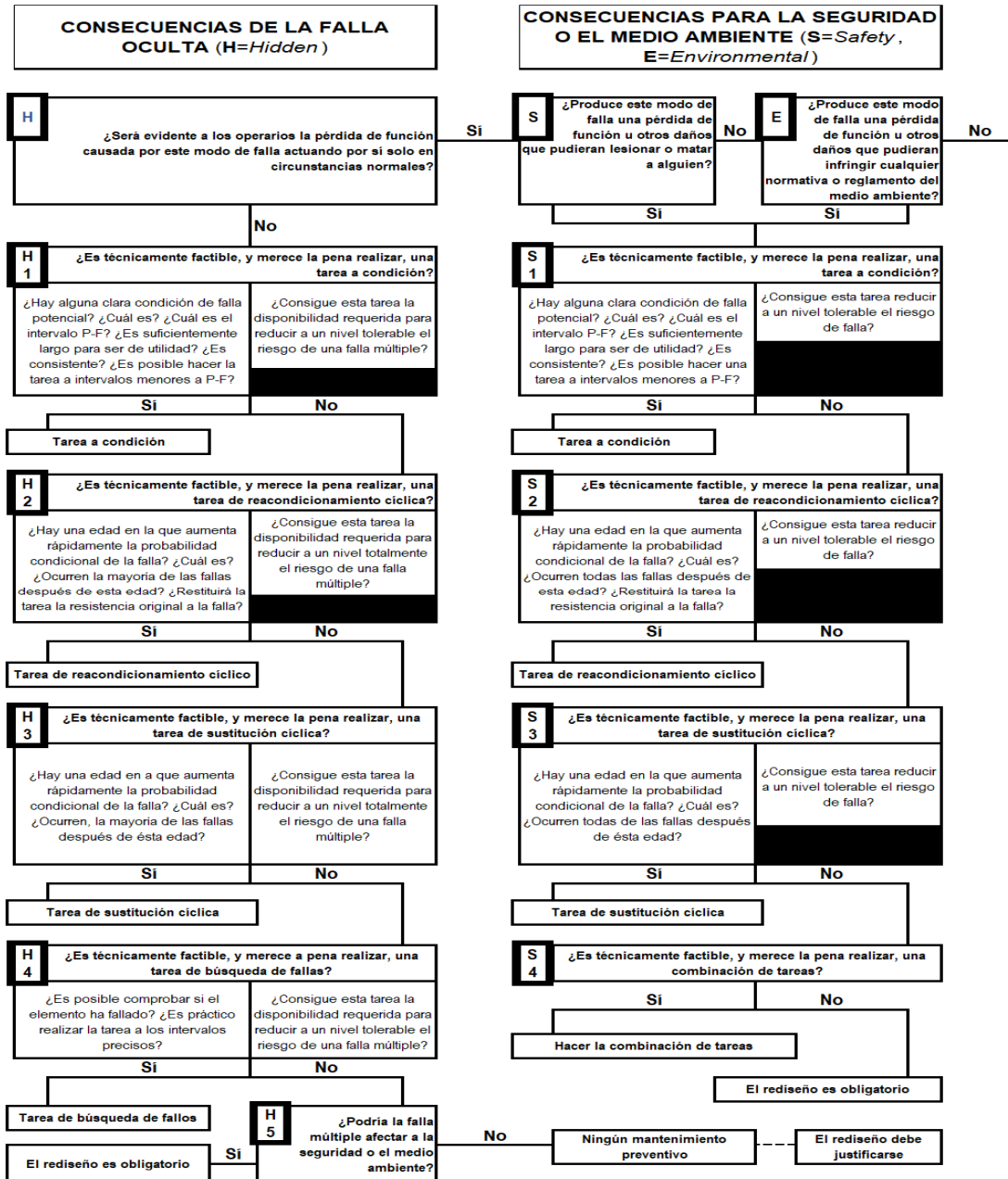
- Motor de combustión interna en general, en donde se muestra que, si suceden las siguientes situaciones, el MCI no funciona, no arranca, no entrega la potencia mecánica y rpm requeridas, emisión de CO2 fuera de los valores permitidos, falla de la alarma de sobret temperatura, falta de lubricante, falta de combustible, erosión eléctrica en el cigüeñal, vibración anormal del conjunto MCI – generador eléctrico, a cuáles modos de falla o causas puede deberse cada una de las anteriores fallas funcionales o situaciones y los efectos de falla o lo que sucede cuando se produce cada una de los modos de falla indicadas en la hoja.
- Sistema de enfriamiento, donde se muestra que, si el MCI no se refrigera en forma adecuada o totalmente, a cuáles modos de falla o causas puede deberse esta situación.
- Sistema de combustible, mostrándose en esta hoja que, si el MCI es incapaz de inyectar combustible, o lo hace de manera deficiente o si es incapaz de transferir el combustible, a cuáles modos de falla o causas pueden deberse estas fallas funcionales y lo que sucede cuando se presentan cada uno de ellos.
- Sistema de escape, mostrándose en esta hoja que, si el MCI es incapaz de conducir los gases producto de la combustión hacia el exterior, a cuáles Modos de Falla o causas puede deberse esta falla funcional y los efectos de falla o lo que sucede cuando se presenta este modo de falla.
- Generador eléctrico, mostrándose en esta hoja que, si no hay voltaje generado o fluctuante, a cuáles modos de falla o causas pueden deberse estas fallas funcionales y los efectos de falla o lo que sucede cuando se presentan cada uno de ellos.

- Tablero de control eléctrico, detallándose en esta hoja que, si se encuentran fusibles quemados, chispazos, suciedad en la circuitería interna de este equipo, así como el interruptor electromagnético disparado, la manija del tablero de control en 'Off' o en 'Manual' o la carátula muestra segmentos quemados o no muestra los valores al estar trabajando la planta eléctrica de emergencia, a cuáles modos de falla o causas pueden deberse estas fallas funcionales y los efectos e falla o lo que sucede cuando se presentan cada uno de ellos.
- Sistema eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia, mostrándose en esta hoja que, si el MCI no arranca o no muestra los eventos propios de la operación del equipo, a cuáles modos de falla o causas pueden deberse estas fallas funcionales y los efectos de falla o lo que sucede cuando se presentan cada uno de ellos.

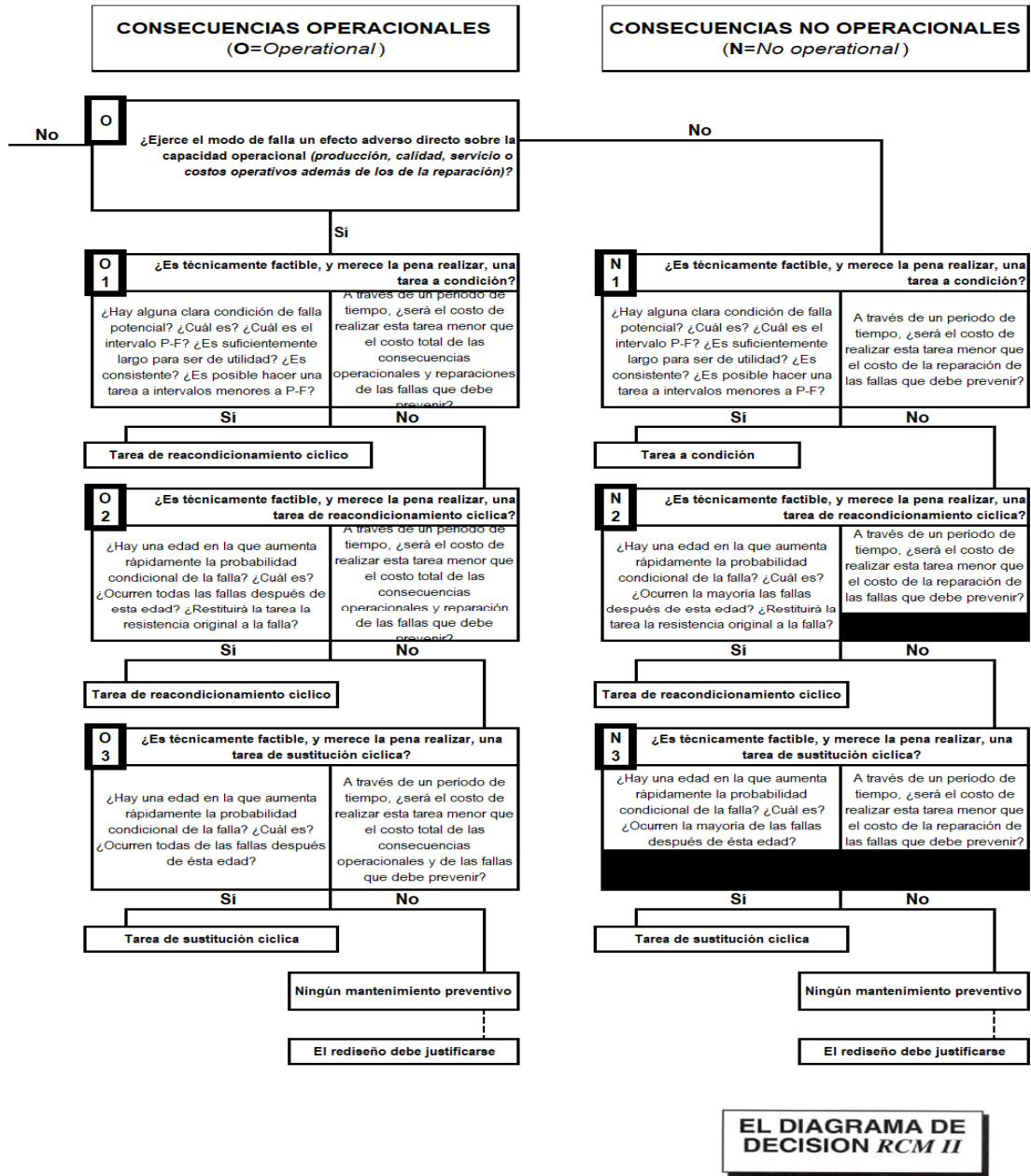
3.2. Diagrama de decisión

El diagrama que se muestra a continuación permite integrar todos los procesos de decisión plasmados en las Hojas de Información en una estructura estratégica única.

Figura 10. Diagrama de decisión del RCM II™



Continuación de la figura 10.



Fuente: Moubray. (2004). RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

3.3. Hoja de decisión

Permiten asentar las respuestas a las preguntas formuladas en las hojas de información, y, en función de dichas respuestas, registrar:

Qué mantenimiento de rutina (si lo hay) será realizado, con qué frecuencia será realizado y quién lo hará.

Qué fallas son lo suficientemente serias como para justificar el rediseño.

Casos en los que se toma la decisión deliberada de dejar que las fallas ocurran.

En la aplicación de estas hojas de decisión para la planta eléctrica de emergencia se toma la información obtenida de las hojas de información y los criterios de seguridad del diagrama de decisión (Figuras 10.1. y 10.2. Diagrama de decisión del RCM II™) para definir los diferentes estados de seguridad que pueden asignárseles a cada una de las fallas funcionales de cada uno de los subsistemas desarrollados para la planta eléctrica de emergencia, es decir, la referencia de información se obtiene del código del modo de falla definido en la hoja de información, es decir, la conjunción de los dígitos de las columnas de 'No.' 'Función', 'Código de la falla funcional' y 'Código del modo de falla'. Los 'códigos de la evaluación de las consecuencias', o riesgos, vienen de escoger si la falla es H = *Hidden* (Oculta), E = *Environmental* (relativa al medioambiente), O = *Operational* (Operacional) o N = *No operational* (no operacional). Con esta información se escoge el subcódigo de cada riesgo y finalmente en la columna 'A falta de' se digitarán los subcódigos H4, H5 o S4 del diagrama de decisión. En

la columna 'Tarea propuesta' se indica lo que hay que hacer para librar cada una de las fallas. En las dos últimas columnas se debe indicar el intervalo de ejecución de la tarea propuesta, o sea su periodicidad, y a quién, del personal de mantenimiento, se le asignará su realización. (Moubray, 2004, p. 202)

El formato de esta hoja puede verse a continuación y más adelante debidamente llenas.

Tabla VIII. Hoja de decisión

HOJA DE DECISIÓN RCM II															
HOJA DE DECISIÓN RCM II © 1990 ALADON LTD.		SISTEMA						Sistema No.	Facilitador:	Fecha	Hoja No.				
		SUBSISTEMA						Subsistema No.	Auditor:	Fecha	de				
Referencia de información		Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Intervalo inicial	A realizarse por	
F	FF	MF	H	S	E	O	H4	H5	S4						
BOMBA UNICA															
1	A	1	S	N	N	S	S						Verificar si el cojinete principal de la bomba hace ruido	Semanal	Mecánico
1	A	2	...	etc											
BOMBA DE SERVICIO CON RESERVA															
1	A	1	S	N	N	N	N	N	N				Ningún Mantenimiento Programado		
1	A	2	...	etc											
BOMBA DE RESERVA															
2	A	1	N				N	N	N	S			Atornillar la bomba de reserva en vez de la bomba de servicio y asegurar que la bomba sea capaz de llenar el tanque. Completada la prueba volver a la bomba de servicio.	Cada 4 semanas	Operador

Figura 10.8: Hoja de Decisión RCM con entradas de muestra

214
Mantenimiento Centrado en Confiabilidad

Fuente: Moubray. (2004). RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Los beneficios que podrían obtenerse de un programa de RCM bien implementado, a diferencia del actual son:

- Mejorará la disponibilidad del equipo para de esta forma, reducir los costos del mantenimiento, correctivo principalmente.
- Brinda la posibilidad de identificar las necesidades reales de mantenimiento de los activos en su contexto operacional, o sea, no esperar hasta que fallen sino anticiparse a la falla, cambiando la rutina actual a un procedimiento mucho más proactivo que suponga el conocimiento, desde sus orígenes, de las causas de las fallas y atacarlas en su momento, para impedir que estas sigan creciendo ocultas y cuando lleguen a presentarse generen las indeseables, desagradables y generadoras de serias pérdidas económicas por la suspensión del servicio eléctrico.
- El RCM revelará nuevas tareas de mantenimiento preventivo, donde el manual de mantenimiento del equipo, si lo hay, no considere ninguna.
- El RCM evitará fallas potenciales que de alguna manera puedan evitarse, sugiriendo información muy relevante para redactar o introducirles modificaciones a los manuales de mantenimiento y de operación del equipo.
- Asimismo, podrán detectarse tareas de mantenimiento preventivo dictadas por el fabricante que no llevarlas a cabo o evitarlas resultará más económico que reparar la falla que tratan de evitar, una vez que aparezca.

- Adicionalmente, podría pensarse, y en muchos casos así es, que el actual plan de mantenimiento preventivo en ejecución está basado en aquel suministrado por el fabricante más los aportes de mecánicos y electricistas, sobre algunos temas requeridos por las condiciones físicas, ambientales, financieras, legales (contratos de suministro, por ejemplo), entre otros, del entorno donde se encuentre dando servicio el equipo, mientras que dentro del contexto del RCM las sugerencias del fabricante aparecen como alicientes de consulta al final del proceso de implementación de este mantenimiento para confirmar que no se ha dejado ninguna tarea sin considerar.

Así, el RCM buscará, al implementarse en una planta eléctrica de emergencia incrementar la confiabilidad por medio de un conocimiento exhaustivo de las fallas funcionales, modos de falla, efectos de falla y principalmente cómo puede evitarse la falla para de esta forma eludir costos derivados de mantenimientos correctivos y aumentar el conocimiento a profundidad de los procesos del análisis de falla de la planta eléctrica de emergencia, sentando un precedente de la confección de un plan de RCM para este tipo de equipos.

Los procedimientos o rutinas del RCM II™ que se aplicaron para el desarrollo de este trabajo, fueron los análisis VOSOA, monitoreo de condición, pero antes hubo que definir algunos conceptos previos de aplicación, con introspección, en una planta eléctrica de emergencia.

Aquí se describe el procedimiento empleado para la propuesta del RCM II™ para el problema investigado. Se han desarrollado las diferentes hojas de revisión o *checklist* y que, a la larga, se podrán integrar en una sola, obtenidas

de aquella información extraída del desarrollo de las hojas de información y posteriormente de las de decisión, según el RCM II™.

Estas hojas de revisión o *checklist* han sido redactadas a partir del análisis VOSOA y del monitoreo de condición de fallas de los sistemas del MCI y eléctrico y sus respectivos subsistemas, hasta llegar a la presentación final del plan y están integradas, como las Hojas de Información y las de Decisión, en un orden lógico y operacional comenzando con el MCI, su sistema general, sistema de enfriamiento, sistema de combustible y el sistema de escape de gases, luego se toma el generador eléctrico, el tablero de control eléctrico y el sistema eléctrico/electrónico periférico. En otras palabras, se han presentado los resultados obtenidos para llegar finalmente a la propuesta del plan de mantenimiento según el RCM para una planta eléctrica de emergencia, con el mismo orden lógico y operacional.

Dado que este plan de mantenimiento según el RCM es más completo y de otra índole conceptual que aquel preventivo actual, como se explica en el Capítulo 2, definitivamente no es posible llevarlos en paralelo, sería una inversión de recursos inútil tanto de tiempo, como de mano de obra.

El procedimiento para el desarrollo del plan y finalmente haber llegado a la redacción y propuesta del plan de mantenimiento se muestra gráficamente a continuación.

3.4. Procedimiento para la elaboración del plan de mantenimiento basado en el RCM II™ para una planta eléctrica de emergencia

El procedimiento para la elaboración del plan de mantenimiento basado en el RCM II™ para una planta eléctrica de emergencia se muestra gráficamente a continuación.

Tabla IX. Procedimiento para la elaboración del plan de mantenimiento basado en el RCM II™ para una planta eléctrica de emergencia

Procedimiento para la elaboración del Plan de Mantenimiento basado en el RCM II para una planta eléctrica de emergencia			
Clasificación de sistemas y subsistemas			
Sistema	Subsistema		
MCI:	General Enfriamiento Combustible Escape		
Sistema eléctrico:	Generador eléctrico Tablero de control sistema eléctrico/electrónico periférico		
Control de enmiendas			
Naturaleza de la modificación	Página	Revisión	Fecha
Revisión	Todas	1	20-sep-20

Continuación de la tabla IX.

Validación		
	Redactor	Verificador
Fecha	31-ago-20	1-sep-20
Nombre	José L. Mendóza	Sergio Soto
Equipo	Planta eléctrica de emergencia Ottomotores CNY500	
Correo	jolmenalv@gmail.com	sergiorsg.gt@gmail.com

Fuente: elaboración propia.

Difusión					
Puesto	Tipo de documento	No. de copia	Formato de la copia	Sitio de archivo	Fecha
Asesor	Original	0	Impreso y digital	Biblioteca propia	23-oct-20
Revisor de escuela	Copia	1	Impreso y digital	Biblioteca propia	26-oct-20
Coordinación maestría	Copia	2	Impreso y digital	Biblioteca propia	31-oct-20
Empresa interesada	Copia	3	Impreso y digital	Biblioteca propia	31-mar-21

Objetivo	1. Determinar los procedimientos escritos tales como rutinas de inspección, listas de verificación o <i>Check-lists</i> , Análisis Causa Raíz, Órdenes de trabajo y aquellos propios del funcionamiento, o no, del equipo) a la fecha del mantenimiento para una planta eléctrica de emergencia.
-----------------	--

Continuación de la tabla IX.

Alcance	Redactar el procedimiento, utilizando el análisis VOSOA y ejecución del RCA y FMEA, cuando sea posible, del plan de mantenimiento preventivo propuesto de la planta eléctrica de emergencia, objeto de este trabajo, realizando una inspección visual del procedimiento y obteniendo conclusiones (ver Verificación).
----------------	---

JL.P/B

Equipos involucrados	
No.	Equipo
1	<p>Tablero de control de la planta eléctrica de emergencia, donde se muestran principalmente los siguientes parámetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> - RPM del generador eléctrico. - Voltaje trifásico generado. - Voltaje de las baterías. - Temperatura de la camisa de agua del cárter.

JL.P/B

Continuación de la tabla IX.

Personal involucrado		
No.	Cargo	Competencia
1	Ingeniero de mantenimiento de la institución o empresa	Recopilación de información.
2	Supervisor de electricidad de la institución o empresa.	Responsable de la debida ejecución del mantenimiento preventivo del equipo.
3	Ejecutor del servicio.	Realizar el mantenimiento preventivo del equipo.
4	Ayudante del ejecutor del servicio.	Colaborar con el ejecutor del servicio en actividades de asistencia.

JL.P.R.

Tiempos estimados de ejecución	
Ejecución del mantenimiento basado en el RCM al equipo.	02 horas

JL.P.R.

Continuación de la tabla IX.

Equipo de seguridad personal utilizado por los ejecutores del mantenimiento basado en el RCM	
No.	Equipo
1	Calzado de seguridad con punteras de acero.
2	Uniforme (camisa de manga larga y pantalón de lona).
3	Casco de seguridad con clasificación ANSI/ISEA Z89.1 2014 Y CSA Z94.1 2015 tipo II.
4	Chaleco de seguridad (con reflectivos)
5	Gafas de seguridad ANSI Z87.1.
6	Guantes de mecánico con clasificación EN 388.
7	Mascarilla N95.

JLPSB

Continuación de la tabla IX.

Herramienta utilizada por los ejecutores del mantenimiento basado en el RCM	
No.	Herramienta
1	Caja metálica para herramientas.
2	Alicate y pinzas de mecánico.
3	Destornilladores de castigadera recta y cruciformes.
4	Cangrejo de 18".
5	Juego de copas milimétricas y en pulgadas.
6	Maneral para copas.
7	Arco de sierra con segueta.
8	Llave para filtros de aceite.
9	Juego de llaves de cola-corona milimétricas y en pulgadas.
10	Juego de llaves Allen o hexagonales milimétricas y en pulgadas.
11	Martillo de mecánico.
12	Mazo de hule.
13	Linterna LED.
14	Brocha de 3".
15	Cinta métrica o flexómetro de 5 m.

ALP/B

Materiales utilizados por los ejecutores del mantenimiento basado en el RCM	
No.	Material
1	1 lb. de <i>wipe</i> .
2	Toallas para limpieza (sin motas).
3	Aflojalotodo en aerosol.
4	Aceite del tipo (viscosidad, tipo, aprobaciones) sugerido por el fabricante del equipo.

ALP/B

Continuación de la tabla IX.

Repuestos utilizados por los ejecutores del mantenimiento basado en el RCM	
No.	Repuesto
1	Filtro de aceite del tipo sugerido por el fabricante del equipo.
2	Filtro de lubricante del tipo sugerido por el fabricante del equipo.
3	Filtro de combustible del tipo sugerido por el fabricante del equipo.
4	Fajas para el ventilador del tipo y dimensiones sugerido por el fabricante.

JLPSB

Condiciones preliminares	
1	Abrir (oprimir) el interruptor de paro automático de la planta eléctrica de emergencia.
2	VOSOA rápido de las condiciones actuales de la planta eléctrica de emergencia.

JLPSB

Continuación de la tabla IX.

Verificación del mantenimiento basado en el RCM	
1	<p>Mejora la Disponibilidad del equipo para de esta forma, reducir los costos del mantenimiento, correctivo principalmente.</p> <p>Brinda la posibilidad de identificar las necesidades reales de mantenimiento del activo en su contexto operacional, o sea, no esperar hasta que falle sino anticiparse a la falla, cambiando la rutina actual a un procedimiento mucho más proactivo que suponga el conocimiento, desde sus orígenes, de las causas de las fallas y atacarlas en su momento, para impedir que estas sigan creciendo ocultas y cuando lleguen a presentarse generen las indeseables, desagradables y generadoras de serias pérdidas económicas por la suspensión del servicio eléctrico.</p>
2	
3	<p>El RCM revela nuevas tareas de mantenimiento preventivo, donde el manual de mantenimiento del equipo, si lo hay, no considere ninguna.</p>
4	<p>El RCM evita fallas potenciales que de alguna manera puedan evitarse, sugiriendo información muy relevante para redactar o introducirles modificaciones a los manuales de mantenimiento y de operación del equipo.</p>
5	<p>Lamentablemente no se detectaron tareas de mantenimiento preventivo dictadas por el fabricante por no contar con el Manual de Mantenimiento que de no llevarlas a cabo o evitarlas resulta más económico que reparar la falla que tratan de evitar, una vez que aparezca.</p>
6	<p>Dentro del contexto del RCM las sugerencias del fabricante podrían aparecer como alicientes de consulta al final del proceso de implementación de este mantenimiento para confirmar que no se ha dejado ninguna tarea sin considerar. Lamentablemente no se cuenta con el Manual de Mantenimiento del equipo.</p>

JL/PJ/B

Continuación de la tabla IX.

Informe de actividades	
1	El personal contratista de la compañía de mantenimiento preventivo anota cada actividad realizada.
2	El personal contratista de la compañía de mantenimiento preventivo anota los parámetros del equipo tanto detenido como en marcha.
3	El supervisor de electricidad lee la orden de servicio, consulta dudas y posteriormente firman, él y el ejecutor el documento.
4	Al siguiente día el supervisor de electricidad recibe la orden de servicio formal.
6	El supervisor de seguridad informa de forma escrita a las autoridades involucradas de la institución o empresa, indicando el procedimiento llevado a cabo, fotografías y resultados.

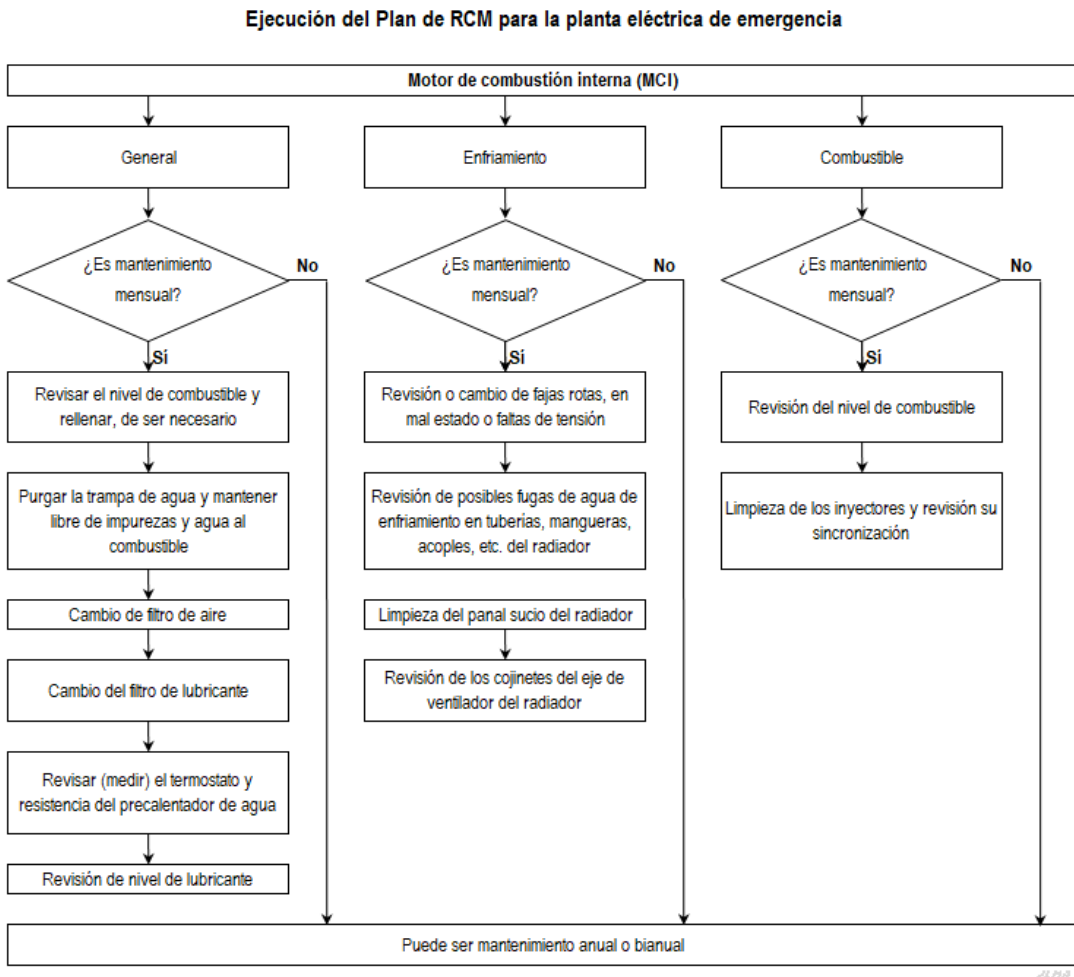
JAE 19/03

Fuente: elaboración propia.

3.5. Hojas de información para una planta eléctrica de emergencia

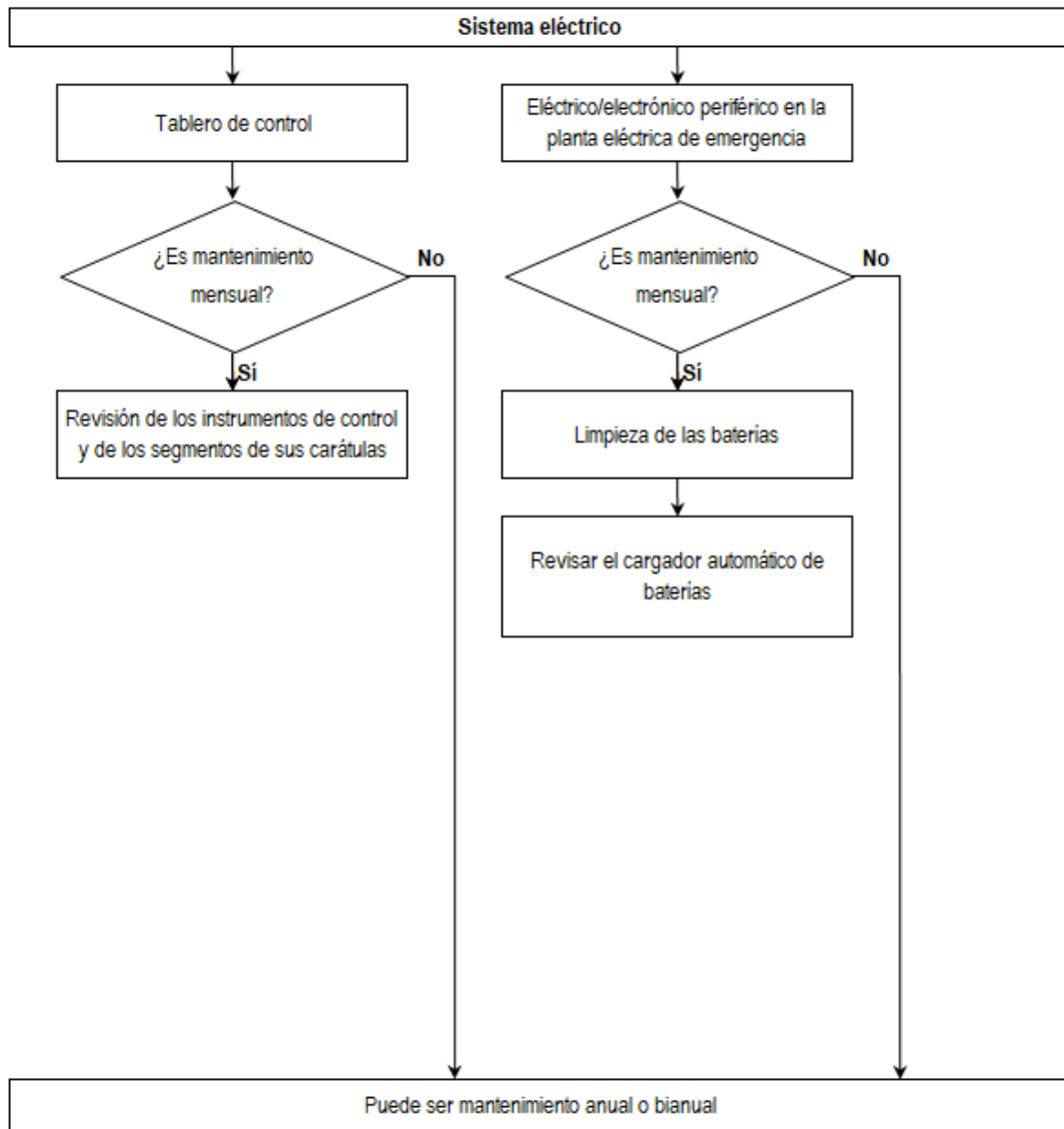
La implementación del RCM para una planta eléctrica de emergencia consistirá en redactar las siguientes hojas de información y, conjuntamente con las de decisión diseñar las hojas de revisión o *checklist* y seguir sus instrucciones, recomendaciones y periodicidad.

Figura 11. Diagrama de flujo del RCM II™ propuesto



Continuación de la figura 11.

Ejecución del Plan de RCM para la planta eléctrica de emergencia. Continuación.



Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Hoja de información MCI/general

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.		Sistema	No.	Compilado por:	Fecha	Hoja:
		Motor de combustión interna (MCI)	Único	Nombre del electricista		1
		Subsistema	Ref.	Revisado por:	Fecha	De:
		General	N/A	Supervisor de Mantenimiento		7
No.	Función	Código / Falla Funcional	Código / Modos de Falla (Causa de la falla)	Efectos de falla (¿Qué sucede cuando falla?)		
1	El MCI transforma energía química en energía térmica y a partir ésta a energía mecánica de rotación (755 HP/563 KW, 1,800 RPM), por la combustión de un combustible dentro del motor.	A MCI no funciona, no arranca	1 Ensamble inadecuado del MCI	MCI no arranca. Imposible su funcionamiento. Tiempo de revisión y costo incierto. Falla catastrófica.		
			2 Overcrank o bloqueo del cigüeñal. Esta característica evita que el generador se dañe a sí mismo cuando intenta arrancar continuamente y otro problema, como la falta de suministro de combustible, impide que arranque	El MCI no desconecta el motor de arranque dentro del ciclo de arranque especificado de cigüeñal. lo intentará alrededor de cuatro veces y si no lo logra, bloqueará totalmente al motor para arrancar. Y si lo hace, no alcanza las RPM especificadas de cigüeñal, espera algunos segundos y vuelve a intentarlo		
			3 Golpe hidráulico en las bielas y pistones	Falla catastrófica, pérdida total del MCI		
		B MCI incapaz de entregar 755 HP y girar a 1,800 RPM	1 Fatiga del cigüeñal, bielas, eje de levas	Pérdida progresiva de eficiencia del motor		
			2 MCI sobre-revolucionado u overspeed debido a mal ajuste del control de velocidad del mismo	El motor se detiene por incremento súbito de la potencia eléctrica a entregar que lo obliga a tratar de alcanzarla por medio de sobre-revolucionarse		
			3 Filtro de aire o conductos de aire obstruidos	Pérdida de rendimiento del MCI, contaminación del combustible, ruidos extraños del motor y mayor consumo de combustible		
4 Bajo nivel de lubricante para el MCI, lubricante fuera de especificaciones, filtro de lubricante obstruido, presostato del aceite dañado, desgaste de la bomba de lubricación, fugas de aceite en el sello de unión entre el cárter del MCI y el generador y otras, conexiones flojas de mangueras o daños a estas.	Baja presión de aceite. Desempeño intermitente del MCI					
5 Baja temperatura del agua de precalentamiento	El MCI no arranca en el tiempo estipulado y no puede tomar carga					
6 Turbocompresor (turbocargador) defectuoso	Combustión incorrecta e ineficiente debida al suministro de aire defectuoso que modifica la relación aire-combustible por la falta de estanqueidad de los conductos (mangueras rotas o rajadas y falla de sus abrazaderas) encargados de canalizar el aire al turbocompresor. Provoca, a su vez, fugas de aire en el lado de vacío o en el de presión del sistema, disminución considerable de la potencia del MCI, mayor retraso de la respuesta del turbocompresor, humo negro por el escape, silbidos o ruidos desde el compartimento en el que se encuentra el MCI, aumento del consumo de combustible, fallas mecánicas graves (cojinetes, impulsor, carcasa)					
2	Emisión mayor/menor a 10.1514 kg de CO2 en los gases de escape	A Emisión alterada de CO2 en los gases de escape	1 Combustión ineficiente. Inyectores en mal estado (sucios u obstruidos) o mala calidad del combustible	Fallas en la combustión. El MCI es incapaz de mantener una velocidad constante. Contaminación excesiva del medio ambiente. Tiempo de reparación 6 h y costo de US\$200		
3	Se enciende la alarma de sobre temperatura y apaga el MCI al sobrepasar 150° C	A No funciona la alarma de sobre temperatura del MCI	1 Elevada temperatura del MCI a causa de lubricante inadecuado o cojinetes dañados	Daño progresivo del MCI.		
4	Se enciende la alarma de bajo o cero nivel de lubricante	A No hay monitoreo de bajo o ningún nivel de lubricante	1 Falta total de lubricante para el MCI	El MCI se detiene. Bielas dobladas o fracturadas, tejas pegadas y en casos extremos cigüeñal pandeado. Falla catastrófica del MCI		
			2 Falta parcial de lubricante, fugas en sellos, en mangueras y acoples de éstas al cárter del MCI	Pérdida progresiva de lubricante y posterior detención del MCI		
5	Monitoreo del nivel de lubricante	A No funciona la alarma de bajo nivel de lubricante del MCI	1 Daño eléctrico de la alarma de bajo nivel de lubricante del MCI o fin de su vida útil	Falta de monitoreo del nivel de lubricante		
6	Rendimiento de combustible de 138 l/h	A Erosión eléctrica en el cigüeñal	1 Daño debido a corrientes eléctricas de fuga o "vagabundas" desde el generador eléctrico	Corrosión en las superficies del cigüeñal. Pérdida progresiva de eficiencia del MCI. Aumenta el consumo de combustible por encima de 138 l/h		
7	Vibración del conjunto MCI - Generador eléctrico	A Vibración fuera de lo normal de conjunto MCI - generador eléctrico	1 Tacos anti vibratorios para amortiguación de vibraciones lineales, ubicados entre la bancada metálica y el conjunto MCI - generador eléctrico instalados en forma incorrecta o en mal estado.	Vibración excesiva del conjunto MCI - generador eléctrico que provoca transmisión excesiva de esta vibración a los alrededores o posible entrada en resonancia del conjunto MCI - generador eléctrico		

Fuente: Moubray. (2004). RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Tabla XI. Hoja de información MCI/enfriamiento

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.		Sistema	No.	Compilado por:	Fecha	Hoja:
		Motor de combustión interna (MCI)	Único	Nombre del electricista		2
		Subsistema	Ref.	Revisado por:	Fecha	De:
		Enfriamiento	N/A	Supervisor de Mantenimiento		7

No.	Función	Código / Falla Funcional	Código / Modos de Falla (Causa de la falla)	Efectos de falla (¿Qué sucede cuando falla?)	
1	Refrigerar el aceite de lubricación, el combustible de retorno y las cámaras de combustión a través de las camisas del motor diésel en un proceso de transformación del calor	A	1	Fajas rotas, en mal estado o faltas de tensión, del ventilador del radiador	Falta de una refrigeración adecuada del MCI. Tiempo de reparación 3 h. y costo de US\$100
			2	Daño mecánico en las aspas del ventilador del radiador por barrimiento del chavetero, rajaduras en su unión a la masa que lo une al eje, desprendimiento de las aspas y daño al radiador	Falta de refrigeración adecuada del MCI y posible daño catastrófico del radiador
			3	Incorrecta dosificación del refrigerante en el agua del radiador	Sobrecalentamiento y por lo tanto evaporación acelerada del agua del radiador, provocando falta de refrigeración adecuada del MCI, reduciendo su capacidad. Tiempo de reparación 6 h. y costo de US\$75
			4	Fugas de agua de enfriamiento en el radiador y sus tuberías	Sobrecalentamiento y por lo tanto evaporación acelerada del agua del radiador, provocando pistones atascados por sobrecalentamiento, pérdida de eficiencia por refrigeración adecuada del MCI, colapso del radiador al quedarse sin agua. En caso extremo daño catastrófico del MCI. Tiempo de reparación 72 h. y costo de US\$400, de no ser falla catastrófica
			5	Panel del radiador sucio	Deficiente transferencia de calor del agua del radiador hacia el ambiente. Tiempo de reparación 2h. y costo de US\$50
			6	Cojinetes del eje de ventilador del radiador en mal estado	Ruido, vibración o falla catastrófica del ventilador, reduciendo la capacidad del motor. Si no es falla catastrófica, tiempo de reparación 12 h. y costo de US\$600. Si es falla catastrófica, tiempo de recambio tres semanas y costo US\$2,000
			7	Termostato del tapón del radiador en mal estado	Pérdida del agua del radiador, al estar caliente y el sello del tapón, ordenado por el termostato, no mantiene cerrado a este. Tiempo de reparación 0.5 h. y costo de US\$100
			8	Bomba de agua dañada	Falta de circulación del agua por la camisa del cárter del MCI y demás partes que necesitan enfriamiento. Tiempo de reparación 24 h. y costo de US\$175
			9	Dispositivo de alarma (termopar o termocopla), control y parada del motor del ventilador por bajo nivel de refrigerante, dañado debido a falla del mismo	Temperatura del agua de refrigeración sin control, puede conducir a una elevación progresiva de la temperatura de esta agua, generando serios problemas de enfriamiento a los sistemas o partes que la necesitan. Tiempo de reparación 8 h. y costo de US\$200

Fuente: Moubray. (2004). *RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.

Tabla XII. Hoja de información MCI/combustible

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.		Sistema	No.	Compilado por:	Fecha	Hoja:
		Motor de combustión interna (MCI)	Único	Nombre del electricista		3
		Subsistema	Ref.	Revisado por:	Fecha	De:
		Combustible	N/A	Supervisor de Mantenimiento		7
No.	Función	Código / Falla Funcional		Código / Modos de Falla (Causa de la falla)	Efectos de falla (¿Qué sucede cuando falla?)	
1	Dosificar e inyectar la cantidad exacta de combustible dentro de la cámara de combustión, en el instante preciso, atomizado y a alta presión.	A	MCI incapaz de inyectar combustible, o lo hace de manera deficiente.	1	Filtro y líneas (mangueras, tuberías) de combustible restringidas u obstruidas	Paso obstruido o restringido de combustible hacia el sistema de combustión provocando obstrucciones en los inyectores y pérdida de potencia. Funcionamiento irregular del MCI. Tiempo de reparación: 1 h. y costo de US\$20. Tiempo de reparación 2 h. y costo de US\$100
				2	Tanque de combustible diario y exterior oxidados en su interior	Generación de partículas de corrosión sueltas que contaminan el lubricante. Tiempo de reparación 4 h. c/u y costo de M/O de US\$125
				3	Aire en el sistema de combustible	Ahogamiento del motor, causando su detención
				4	Exceso o distribución irregular del combustible en los inyectores por acumulación de suciedad	Humo negro o gris en el escape por baja inyección de combustible en la cámara de combustión. Tiempo de reparación 6 h. y costo de US\$250
				5	Bomba de combustible obstruida parcialmente	Pérdida de potencia del motor. La obstrucción puede deberse a partículas de corrosión sueltas en el combustible. Tiempo de reparación 1 día y costo de US\$300
				6	Válvula de no retorno, o de cheque, obstruida, con ruptura o atascamiento de su lengüeta de paso	Mezcla intermitente o pobre, pérdida de potencia del motor. La obstrucción puede deberse a partículas de corrosión sueltas en el combustible. Tiempo de reparación 8 h. y costo de US\$300
2	Transferir el combustible desde el tanque diario a los inyectores de combustible a una presión entre 60 y 80 psi y devolver el exceso al tanque	A	MCI incapaz de transferir el combustible	1	No funciona la alarma de bajo nivel de combustible o hay falta total de combustible en el tanque del MCI	Circuito de combustible captará aire, por lo que el motor funcionará de forma errática y/o se apagará. Tiempo de reparación 1 h.
				2	Suministro intermitente de combustible al MCI	Trampa de agua en el combustible saturada. Tiempo de reparación 1 h.
				3	Conexiones sueltas entre la bomba de combustible, línea de aspiración y el tanque	Pérdida de potencia, funcionamiento irregular del MCI. Posibilidad de detención del MCI. Posibilidad de derrame de combustible. Tiempo de reparación 2 h. y costo de US\$100
				4	La bomba de combustible no funciona	No hay abastecimiento de combustible. Funcionamiento irregular del MCI. Tiempo de reparación 6 h. y costo de US\$150

Fuente: Moubray. (2004). RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Tabla XIII. Hoja de información MCI/escape

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II					
HOJA DE INFORMACIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.	Sistema	No.	Compilado por:	Fecha	Hoja:
	Motor de combustión interna (MCI)	Único	Nombre del electricista		
	Subsistema	Ref.	Revisado por:	Fecha	De:
Escape	N/A	Supervisor de Mantenimiento			7

No.	Función	Código / Falla Funcional		Código / Modos de Falla (Causa de la falla)	Efectos de falla (¿Qué sucede cuando falla?)	
1	Conducir los gases quemados de la combustión hacia el exterior	A	MCI incapaz de conducir los gases quemados de la combustión hacia el exterior	1	Obstrucciones, daños o fugas en los tubos del escape o en el silenciador o <i>muffler</i>	Dificultad para expulsar los gases de escape del MCI, problemas en la combustión dando lugar a una marcha irregular del MCI. Tiempo de reparación 1 semana. Costo US\$1,000
				2	Corrosión en los tubos, bridas o en el silenciador o <i>muffler</i>	Fugas de gases de escape y ruido. Tiempo de reparación 1 semana. Costo US\$1,000
				3	Sistema de suspensión del escape en mal estado	Riesgo de desprendimiento del sistema horizontal (los tubos, bridas y silenciador o <i>muffler</i>) y caída sobre el MCI o directamente al suelo. Tiempo de reparación 2 días. Costo US\$200
				4	Aleta o <i>flaper</i> de la boca de salida del tubo de escape en mal estado (corroída, bloqueada o inexistente)	Entrada de insectos o lluvia. Tiempo de reparación 2 días y costo US\$50

Fuente: Moubray. (2004). *RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.

Tabla XIV. Hoja de información sistema eléctrico/generador eléctrico

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II					
HOJA DE INFORMACIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.	Sistema	No.	Compilado por:	Fecha	Hoja:
	Sistema eléctrico	Único	Nombre del electricista		
	Subsistema	Ref.	Revisado por:	Fecha	De:
Generador eléctrico	N/A	Supervisor de Mantenimiento			7

No.	Función	Código / Falla Funcional		Código / Modos de Falla (Causa de la falla)	Efectos de falla (¿Qué sucede cuando falla?)	
1	Producir el voltaje requerido según los requerimientos de la operación y transformar la energía mecánica producida en el MCI en energía eléctrica	A	No hay voltaje generado	1	Pérdida de campo debida a pérdida de la alimentación eléctrica del devanado de campo al estar trabajando el generador por apertura accidental del interruptor de campo (si lo tiene), cortocircuito del mismo, falla en el regulador de voltaje o pérdida de excitación del sistema	No hay generación de voltaje. Tiempo de reparación y costo variables
				2	Cortocircuito en el generador por fallas de aislamiento entre los devanados del estator, rotor y tierra	No hay generación de voltaje, falla catastrófica. Tiempo de reparación y costo variables
		B	Voltaje generado fluctuante	1	Potencia inversa en el generador por fallas a tierra, provocando el disparo de sus protecciones	El generador deja de proporcionar potencia eléctrica y si la falla persiste, tal vez unos 5/60 Hz, o sean 5 ciclos, podría iniciarse la motorización del generador. Tiempo de reparación 3 días y costo de US\$500
				2	Conexiones y bornes del generador en mal estado (flojos) o desconectados	Falla en la generación eléctrica y pérdida de campo. Tiempo de reparación 24 h. y costo de US\$1,000

Fuente: Moubray. (2004). *RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.

Tabla XV. Hoja de información sistema eléctrico/tablero de control

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II

No.	Función	Código / Falla Funcional	Código / Modos de Falla (Causa de la falla)	Efectos de falla (¿Qué sucede cuando falla?)		
1	Supervisar permanentemente los parámetros y niveles de energía generados por la planta eléctrica de emergencia cuando está en funcionamiento	A	Fusibles quemados, chispazos y suciedad en la circuitería interna del tablero de control	1	Conexiones flojas, fallas o cortocircuitos en los dispositivos del tablero de control de la planta eléctrica de emergencia	La planta eléctrica de emergencia no arranca o muestra indicaciones de falla en el monitor del tablero de control. Tiempo de reparación 8 h. y un costo de US\$250
		B	Interruptor termo magnético, o flip-on, de salida de la planta eléctrica de emergencia disparado o abierto	1	Cortocircuito en el circuito exterior de la planta eléctrica de emergencia	La planta eléctrica de emergencia arranca, hace su secuencia completa de toma de carga (estabilización de voltaje y de frecuencia) pero no puede suministrar energía eléctrica a la carga. Tiempo de reparación 15 min.
		C	Manija selectora del tablero de control en "Off" o "Manual"	1	Olvido del mecánico o electricista que le efectuó mantenimiento a la planta eléctrica de emergencia al no volver a colocar la manija en "Auto" (Arranque Automático)	La planta eléctrica de emergencia no arranca al suscitarse una interrupción del servicio eléctrico exterior a la institución o empresa. Tiempo de reparación 15 min.
		D	Instrumentos de control o sus carátulas (segmentos digitales) sin mostrar valores al estar trabajando la planta eléctrica de emergencia	1	Fin de la vida útil de los dispositivos o tarjetas electrónicas, protecciones disparadas o fusibles quemados del tablero de control	Las carátulas de los dispositivos no muestran las lecturas de los parámetros a medir por los instrumentos de control. Tiempo y costo de reparación variables

Fuente: Moubray. (2004). RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Tabla XVI. Hoja de información sistema eléctrico - eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II

HOJA DE INFORMACIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.	Sistema Sistema eléctrico	No. Único	Compilado por: Nombre del electricista	Fecha	Hoja: 7
	Subsistema Eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia	Ref. N/A	Revisado por: Supervisor de Mantenimiento	Fecha	De: 7

No.	Función	Código / Falla Funcional	Código / Modos de Falla (Causa de la falla)	Efectos de falla (¿Qué sucede cuando falla?)
1	Proveer servicios eléctricos adicionales a la planta eléctrica de emergencia para su correcto arranque y mantenimiento de su servicio durante y fuera de su operación	A El MCI no arranca	1 Baterías, generalmente de 24 VDC, descargadas	Con el uso constante de la planta eléctrica de emergencia, las baterías van perdiendo carga sumado esto al fin de su vida útil que puede variar entre dos y tres años. Tiempo de reparación 6 h. y un costo de US\$500
			2 Cargador automático de las baterías en mal estado	Fallas en el monitoreo del estado de la carga y a su vez en el proceso constante de recarga de las baterías, es decir, incapaz de mantener la carga de las baterías
			3 Interruptor de paro de emergencia en "On"	La planta eléctrica de emergencia no arranca. Tiempo de reparación 15 min.
2	Panel indicador de eventos en el conjunto MCI - Generador eléctrico	A No muestra los eventos (problemas en el arranque, hora y duración de trabajo, parámetros eléctricos suministrados como voltaje, potencia aparente, corriente, etc.)	1 Fusibles quemados o necesidad de resetear el panel indicador de eventos del conjunto MCI – generador eléctrico, luego de algún disturbio eléctrico que no hubiera quemado sus fusibles	El indicador no muestra ningún dato en su monitor. Tiempo de reparación 1 h.

Fuente: Moubray. (2004). *RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.

3.6. Hojas de decisión para una planta eléctrica de emergencia

Estas hojas contienen información obtenida del diagrama de decisión y las preguntas se plantean para cada modo de falla registrando sus respuestas en las hojas de decisión.

Nótese que cada modo de falla se localiza en una sola categoría de las consecuencias que puede ocasionar. Por ejemplo, si tiene consecuencias ambientales no deben calificarse sus consecuencias operacionales. En otras palabras, si se califica con una 'S' en la columna E, no se califica nada en la columna O.

Cuando las consecuencias del modo de falla se han categorizado, debe buscarse una tarea proactiva adecuada. Hay que tener el suficiente criterio y conocimiento del equipo para decidir si merece la pena realizar tales tareas. (Moubray, 2004, p. 207)

A continuación, se muestran las Hojas de decisión de los 7 subsistemas de los 2 sistemas en que se ha dividido la planta eléctrica de emergencia.

Tabla XVII. Hoja de decisión MCI/general

HOJA DE DECISIÓN RCM II

HOJA DE DECISIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.	Sistema Motor de combustión interna (MCI)	No. Único	Compilado por: Nombre del electricista	Fecha:	Hoja: 1
	Subsistema General	Ref. N/A	Revisado por: Supervisor de Mantenimiento	Fecha:	De: 7

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de				Tarea Propuesta	Intervalo inicial (Frecuencia con que debe realizarse la Tarea Propuesta)	A realizarse por
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	No	No	No	Si	No	No	No	No	Si	No	Reclamo y cambio de MCI	Inmediato	Supervisor	
1	A	2	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Revisar el nivel de combustible y rellenar, de ser necesario, como parte del Mantenimiento Preventivo periódico	Mensual	Supervisor	
1	A	3	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	Mantener libre de impurezas y agua al combustible, limpiando regularmente la trampa de agua en el combustible y el tanque diario o el externo de combustible	Mensual	Mecánico	
1	B	1	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Evitar súbitas sobrecargas de potencia que requirirán que el MCI se sobre revolucione. Ningún mantenimiento programado	N/A	N/A	
1	B	2	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Evitar súbitas sobrecargas de potencia eléctrica que requirirán que el MCI se sobre revolucione. Evitar estos incrementos más allá de las especificaciones de la planta eléctrica de emergencia. Ningún mantenimiento programado	N/A	N/A	
1	B	3	No	No	No	Si	No	O2	No	No	No	No	El cambio del filtro de aire debe estar incluido en el Mantenimiento Preventivo	Mensual	Mecánico	
1	B	4	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	Revisar el funcionamiento de la bomba de lubricante y cambiarla si está dañada y considerar esto dentro de las rutinas del Mantenimiento Preventivo. Asimismo revisar la viscosidad del aceite, presostato del depósito de lubricante y filtro de lubricante	Mensual	Mecánico	
1	B	5	No	No	No	Si	No	O2	No	No	No	No	Revisar (medir) el termostato y resistencia del precalentador de agua y hacerlo como parte de las rutinas del Mantenimiento Preventivo	Mensual	Mecánico	
1	B	6	No	No	No	Si	No	O2	No	No	No	No	Mantener una lubricación adecuada y constante del turbocompresor, sus mangueras y abrazaderas en buen estado, mantener libre el flujo de aceite e impurezas en él y evitar la entrada de objetos extraños al impulsor	Anual	Mecánico	
2	A	1	No	No	No	No	No	No	No	No	No	Si	Limpieza o cambio de inyectores, de ser necesario. Ajuste de la mezcla aire-combustible. Revisar la pureza del combustible	Al detectarse la falla	Mecánico	
3	A	1	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	Usar el lubricante recomendado por el fabricante del MCI. Revisar el nivel del lubricante dentro de las rutinas de Mantenimiento Preventivo	Mensual	Mecánico	
4	A	1	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	Revisar el nivel de lubricante dentro de las rutinas del Mantenimiento Preventivo	Mensual	Mecánico	
4	A	2	No	No	No	Si	No	O2	No	No	No	No	Revisar el estado de los sellos, mangueras y acoples dentro de las rutinas del Mantenimiento Preventivo y apriete o sujeción de las mismas	Mensual	Mecánico	
5	A	1	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Incluir la revisión de la alarma de bajo nivel de lubricante del MCI dentro de las rutinas de Mantenimiento Preventivo	Mensual	Mecánico	
6	A	1	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	Mantenimiento Preventivo periódico al generador eléctrico, midiendo su aislamiento y buscando corrientes de fuga a tierra o masa	Mensual	Mecánico	
7	A	1	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Aplicar análisis VOSO e incluirlo dentro de las rutinas del Mantenimiento Preventivo	Mensual	Mecánico	

Fuente: Moubray. (2004). RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Tabla XVIII. Hoja de decisión MCI/enfriamiento

HOJA DE DECISIÓN RCM II

HOJA DE DECISIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.	Sistema Motor de combustión interna (MCI)	No. Único	Compilado por: Nombre del electricista	Fecha:	Hoja: 2
	Subsistema Enfriamiento	Ref. N/A	Revisado por: Supervisor de Mantenimiento	Fecha:	De: 7

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de				Tarea Propuesta	Intervalo inicial (Frecuencia con que debe realizarse la Tarea Propuesta)	A realizarse por
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Programar su revisión o cambio dentro de las rutinas del Mantenimiento Preventivo	Mensual	Mecánico	
1	A	2	No	No	No	Si	No	O2	No	No	No	No	Revisión como parte de las rutinas del Mantenimiento Preventivo	Mensual	Mecánico	
1	A	3	No	No	No	No	No	No	O3	No	No	No	Atender a la cantidad recomendada de refrigerante por el fabricante del equipo (litros de refrigerante/litros de capacidad del radiador) en el agua del radiador	Trimestral	Mecánico	
1	A	4	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Revisión de posibles fugas en tuberías, mangueras, acoples, etc., como parte de las rutinas del Mantenimiento Preventivo	Anual	Mecánico	
1	A	5	No	No	No	No	No	No	O3	No	No	No	Limpieza del panel, como parte de las rutinas del Mantenimiento Preventivo	Anual	Mecánico	
1	A	6	Si	No	No	No	H1	No	No	No	No	No	Aplicar análisis VOSOA e incluirlo dentro de las rutinas del Mantenimiento Preventivo	Tri-anual	Mecánico	
1	A	7	Si	No	No	No	H1	No	No	No	No	No	Tener repuestos en bodega o asegurarse de su existencia y pronto suministro del representante local del fabricante	Mensual	Mecánico	
1	A	8	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Controlando el estado de la transmisión de movimiento de la bomba de agua y cambio, de ser necesario de los retenedores y sellos, limpieza en todo el circuito de refrigeración y colocar líquido refrigerante de buena calidad para evitar que el problema vuelva a aparecer y se rompa la bomba.	Anual	Mecánico	
1	A	9	No	No	No	Si	O2	No	No	No	No	No	Cambio del termopar o termocopia	Tri-anual	Mecánico	

Fuente: Moubray. (2004). *RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.

Tabla XIX. Hoja de decisión MCI/combustible

HOJA DE DECISIÓN RCM II

HOJA DE DECISIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.	Sistema Motor de combustión interna (MCI)	No. Único	Compilado por: Nombre del electricista	Fecha:	Hoja: 3
	Subsistema Combustible	Ref. N/A	Revisado por: Supervisor de Mantenimiento	Fecha:	De: 7

Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1	H2	H3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Intervalo inicial (Frecuencia con que debe realizarse la Tarea Propuesta)	A realizarse por
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4			
1	A	1	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Medir regularmente la cantidad de agua en el tanque exterior y purgarla ya que puede producir depósitos en las mangueras o tuberías. Mantener tanto el tanque exterior como el diario completamente llenos para evitar aire en ellos y condensación de humedad.	Mensual	Mecánico
1	A	2	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Evitar que el tanque de combustible, si está en el exterior, permanezca a la intemperie. Medir regularmente la cantidad de agua en el tanque exterior y purgarla. Mantener tanto el tanque exterior como el diario completamente llenos para evitar aire en ellos y condensación de humedad. Revisar y limpiar la trampa de agua en el combustible	Mensual	Mecánico
1	A	3	No	No	No	Si	No	O2	No	No	No	No	Mantener siempre llenos el tanque diario y el externo. Revisando las tuberías y mangueras buscando rajaduras, roturas, acoples flojos. Revisar el funcionamiento de la bomba de combustible	Mensual	Mecánico
1	A	4	No	No	No	Si	H1	No	No	No	No	No	Debe revisarse la sincronización de los inyectores y hacer la afinación debida del MCI. Reemplazar los inyectores defectuosos y limpiarlos. Evitar el trabajo forzado del motor, pues esto causará combustión incompleta	Mensual	Mecánico
1	A	5	Si	No	No	No	No	H2	No	No	No	No	Limpiar los inyectores según procedimiento	Mensual	Mecánico
1	A	6	No	No	No	Si	No	O2	No	No	No	No	Evitar la suciedad arrastrada desde el tanque de combustible, cambiando regularmente el filtro de combustible y limpiando la trampa de agua en el combustible.	Trimestral	Mecánico
2	A	1	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	Llenar el tanque principal de combustible. Revisar el interruptor de nivel con alarma por bajo nivel de combustible	Mensual	Mecánico
2	A	2	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	Evitar agua, producto de la condensación de humedad en el combustible de suministro desde el tanque diario o externo. Purgar la trampa de agua en el combustible y limpieza de los inyectores dentro de las rutinas del Mantenimiento Preventivo	Mensual	Mecánico
2	A	3	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Apretar todas las abrazaderas de la línea de combustible. Cebear el sistema por medio de la bomba manual de cebado de combustible	Cuando se de la falla	Mecánico
2	A	4	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	Reemplazo total de la bomba de combustible	Cuando se de la falla	Mecánico

Fuente: Moubray. (2004). RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Tabla XX. Hoja de decisión MCI/sistema de escape

HOJA DE DECISIÓN RCM II

HOJA DE DECISIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.		Sistema Motor de combustión interna (MCI)						No. Único			Compilado por: Nombre del electricista			Fecha:		Hoja: 4	
		Subsistema Escape						Ref. N/A			Revisado por: Supervisor de Mantenimiento			Fecha:		De: 7	
Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Intervalo inicial (Frecuencia con que debe realizarse la Tarea Propuesta)	A realizarse por		
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4					
1	A	1	Si	No	No	No	No	No	H3	No	No	No	Cambio de las partes (tubos, silenciador o muffer) dañados	Mensual	Mecánico		
1	A	2	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Aplicar análisis VOSO, revisión de los drenajes del silenciador o muffer (si los tuviere) y cambio de los tubos rígidos y flexible, bridas y silenciador o muffer cuando sea necesario, pintándolos con pintura anticorrosiva para alta temperatura	Tri-anual	Mecánico		
1	A	3	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Aplicar análisis VOSO de las suspensiones (cables, varillas, sistemas de sujeción, etc.) y cambio cuando sea necesario	Mensual	Mecánico		
1	A	4	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Aplicar análisis VOSO de la aleta y cambio o lubricación de sus bisagras, de ser necesario	Mensual	Mecánico		

Fuente: Moubray. (2004). RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Tabla XXI. Hoja de decisión sistema eléctrico/generador eléctrico

HOJA DE DECISIÓN RCM II

HOJA DE DECISIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.		Sistema Sistema eléctrico						No. Único			Compilado por: Nombre del electricista			Fecha:		Hoja: 5	
		Subsistema Generador eléctrico						Ref. N/A			Revisado por: Supervisor de Mantenimiento			Fecha:		De: 7	
Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de			Tarea Propuesta	Intervalo inicial (Frecuencia con que debe realizarse la Tarea Propuesta)	A realizarse por		
F	FF	MF	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4					
1	A	1	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	La pérdida de excitación (campo) puede detectarse, por medio de un relé de sobre-corriente en el circuito de campo	Cuando se de la falla	Electricista		
1	A	2	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	Medición del aislamiento de los devanados y de la carcasa del generador a tierra como parte del Mantenimiento Preventivo	Anual	Electricista		
2	B	1	No	No	No	Si	O1	No	No	No	No	No	Medición del aislamiento de los devanados y de la carcasa del generador a tierra como parte del Mantenimiento Preventivo	Anual	Electricista		
2	B	2	No	No	No	Si	No	O2	No	No	No	No	Revisar todas las conexiones eléctricas y apriete de las bornas del generador como parte del Mantenimiento Preventivo	Anual	Electricista		

Fuente: Moubray. (2004). RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

Tabla XXII. Hoja de decisión sistema eléctrico/tablero de control

HOJA DE DECISIÓN RCM II

HOJA DE DECISIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.		Sistema Sistema eléctrico						No. Único			Compilado por: Nombre del electricista			Fecha:		Hoja: 6	
		Subsistema Tablero de control						Ref. N/A			Revisado por: Supervisor de Mantenimiento			Fecha:		De: 7	
Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de				Tarea Propuesta	Intervalo inicial (Frecuencia con que debe realizarse la Tarea Propuesta)	A realizarse por	
F	FF	MF	H	S	E	O			H4	H5	S4						
1	A	1	Si	No	No	No	No	No	H3	No	No	No	Mantenimiento Preventivo adecuado al generador eléctrico, a su circuitería de salida (conexiones y borneras), transformadores de corriente o CT, regulador de voltaje, que puedan provocar fallas (sobrecargas o cortocircuitos) a los dispositivos de control, medición y monitor de información en el tablero de control	Anual	Electricista		
1	B	1	Si	No	No	No	No	No	H3	No	No	No	Buscar y librar (reparar) alguna sobrecarga o corto circuito en la carga o circuito exterior de la planta eléctrica de emergencia	Cuando se de la falla	Electricista		
1	C	1	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Asegurarse que esta manija quede siempre en la posición "Auto" luego del Mantenimiento Preventivo	Mensual	Electricista		
1	D	1	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Incluir dentro de las rutinas de Mantenimiento Preventivo la revisión de estos dispositivos y sus carátulas. Algunas plantas eléctricas de emergencia traen esta función, es decir, al oprimir un botón o maniobrar un conmutador de doble tiro muestran las carátulas digitales totalmente llenas e iluminadas	Mensual	Electricista		

Fuente: Moubray. (2004). *RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.

Tabla XXIII. Hoja de decisión sistema eléctrico/sistema eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia

HOJA DE DECISIÓN RCM II

HOJA DE DECISIÓN RCM II © 1988 ALADON LTD.		Sistema Sistema eléctrico						No. Único			Compilado por: Nombre del electricista			Fecha:		Hoja: 7	
		Subsistema Eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia						Ref. N/A			Revisado por: Supervisor de Mantenimiento			Fecha:		De: 7	
Referencia de información			Evaluación de las consecuencias				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Acción a falta de				Tarea Propuesta	Intervalo inicial (Frecuencia con que debe realizarse la Tarea Propuesta)	A realizarse por	
F	FF	MF	H	S	E	O			H4	H5	S4						
1	A	1	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	Revisar constantemente la densidad de su electrólito aun si son libres de mantenimiento y estar a tanto del fin de su vida útil	Bianual	Electricista		
1	A	2	Si	No	No	No	H3	No	No	No	No	No	Atender cualquier indicación de falla en el panel de control del cargador automático de las baterías y si aparece una, inmediatamente tomar las medidas correctivas necesarias para su inmediata puesta en servicio.	Cuando se de la falla	Electricista		
1	A	3	Si	No	No	No	H3	No	No	No	No	No	Asegurarse que este interruptor quede siempre en la posición "On" luego del Mantenimiento Preventivo. Ningún mantenimiento a programar	Cuando se de la falla	Electricista		
2	A	1	No	No	No	Si	No	No	O3	No	No	No	No es posible. Es una falla aleatoria.	Ningún Mantenimiento Preventivo	Electricista		

Fuente: Moubray. (2004). *RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*.

Según explica Moubray (2004), en definitiva, la hoja de decisión del RCM muestra no solo qué acción se ha seleccionado para tratar cada modo de falla, sino que también muestra qué se ha seleccionado. Esta información es valiosa si en algún momento se presenta la necesidad de cambiar cualquier tarea de mantenimiento.

La posibilidad de rastrear cada tarea correlacionándola con la función y parámetros deseados del activo, también facilita la tarea de mantener actualizado el programa de mantenimiento. Esto es porque los usuarios puedan identificar fácilmente las tareas que son afectadas por un cambio en el con contexto operacional del activo (como sería un cambio en los turnos de trabajo o una modificación al reglamento de seguridad) y se evita perder tiempo reanalizando tareas que difícilmente sean afectadas por el cambio.

También es importante mencionar que las hojas de decisión son el resultado del análisis que propone soluciones para reducir o eliminar las consecuencias de las fallas, no así las fallas como tales. Con esto se tiene la seguridad que el resultado buscará la continuidad de la función del equipo para el que fue diseñado y que cumple con las expectativas de uso de los usuarios u operadores.

3.7. Hojas de revisión o *checklist* para una planta eléctrica de emergencia

Estos documentos son el resultado final de la recopilación de los datos recopilados en las hojas de información y complementados con aquellos otros de las hojas de decisión.

Son las hojas que servirán para implementar el RCM II™ diseñado específicamente para esta planta eléctrica de emergencia, ya que contienen la

referencia a la función, falla funcional, modo de falla y la tarea propuesta, así como el procedimiento, si la tarea se realizará con el equipo detenido o en marcha, el intervalo recomendado para realizarse y la persona o técnico que debe ejecutarla.

Tabla XXIV. Hoja de revisión o *checklist* para el subsistema general del MCI

CHECKLIST DE MANTENIMIENTO							
CHECK LIST DE MANTENIMIENTO			SISTEMA	Encargado o facilitador:		Fecha de ejecución de este checklist:	Hoja No.
			Motor de combustión interna (MCI)			/ /	1
Referencia de información			SUBSISTEMA	Supervisor o auditor:			de
			General			/ /	7
F	FF	MF	Tarea propuesta	Procedimiento	Equipo detenido (D) Equipo en marcha (M)	Intervalo inicial	A realizarse por
1	A	2	Revisar el nivel de combustible y rellenar, de ser necesario, como parte del Mantenimiento Preventivo periódico	Revisar la mirilla de nivel, revisar el nivel y rellenar de combustible de ser necesario	D	Mensual	Mecánico
1	A	3	Purgar la trampa de agua y mantener libre de impurezas y agua al combustible, limpiando regularmente la trampa de agua en el combustible y el tanque diario o el externo de combustible	Purgar la trampa de agua y medir el nivel de agua en el tanque diario y externo y purgarla	D	Mensual	Mecánico
1	B	3	Cambio del filtro de aire	Ubicarlo, removerlo y reemplazarlo por un nuevo de las mismas características	D	Mensual	Mecánico
1	B	4	Revisar el funcionamiento de la bomba de lubricante	Cambiarla si está dañada.	M	Anual	Mecánico
1	B	4	Revisar la viscosidad del aceite y contaminación del mismo	Tomar muestra y enviarla al laboratorio	M	Anual	Mecánico
1	B	4	Revisar el funcionamiento del presostato del depósito de lubricante	Desmontarlo y probarlo	D	Bianual	Mecánico
1	B	4	Cambio del filtro de lubricante	Ubicarlo, removerlo y reemplazarlo por un nuevo de las mismas características	D	Mensual	Mecánico
1	B	5	Revisar (medir) el termostato y resistencia del precalentador de agua	Desconectar la alimentación eléctrica del equipo y hacer las mediciones	D	Mensual	Mecánico
1	B	6	Mantener una lubricación adecuada y constante del turbocompresor, sus mangueras y abrazaderas en buen estado, mantener libre el flujo de aceite e impurezas en él y evitar la entrada de objetos extraños al impulsor	Desmontar la parte de la carcasa necesaria, revisar, limpiar y lubricar	D	Anual	Mecánico
4	A	1,2	Revisión del nivel de lubricante	Extraer la varilla de nivel, revisar el nivel y rellenar de lubricante de ser necesario	D	Mensual	Mecánico
7	A	1	Detección de vibración excesiva o desnivel en el conjunto MCI - generador	Aplicar análisis VOSOA para areciar si la vibración es excesiva revisar los tacos buscando resortes o pemos fracturados y reemplazarlos o revisar el nivel, en dos sentidos, del marco inferior de la planta eléctrica de emergencia	M	Anual	Mecánico

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. Hoja de revisión o *checklist* para el subsistema de enfriamiento del MCI

CHECKLIST DE MANTENIMIENTO

CHECK LIST DE MANTENIMIENTO			SISTEMA	Encargado o facilitador:	Fecha de ejecución de este checklist:	Hoja No. de	
			Motor de combustión interna (MCI)				
Referencia de información			SUBSISTEMA	Supervisor o auditor:	/ /	7	
			Enfriamiento				
F	FF	MF	Tarea propuesta	Procedimiento	Equipo detenido (D) / Equipo en marcha (M)	Intervalo inicial	A realizarse por
1	A	1	Revisión o cambio de fajas rotas, en mal estado o faltas de tensión	Aplicar análisis VOSOA o medición de la tensión de las fajas con un tensímetro	D	Mensual	Mecánico
1	A	2	Revisión de las aspas del ventilador del radiador	Desmontar la guarda del ventilador y revisar detenidamente la falta de juego sobre su eje de las aspas	D	Anual	Mecánico
1	A	3	Dilución del refrigerante según el fabricante del equipo (litros de refrigerante/litros de capacidad del radiador) en el agua del radiador	Remover la tapa del radiador y revisar visualmente que el nivel de agua y refrigerante estén casi a rebasar la boca del radiador, de no ser así nivelar con agua desmineralizada	D	Anual	Mecánico
1	A	4	Revisión de posibles fugas de agua de enfriamiento en tuberías, mangueras, acoples, etc. del radiador	Aplicar análisis VOSOA al cuerpo del radiador, mangueras, acoples, etc.	M	Mensual	Mecánico
1	A	5	Limpieza del panel sucio del radiador	Alicar aire comprimido o limpieza manual con cepillo especial, luego lavar con agua y jabón	D	Mensual	Mecánico
1	A	6	Revisión de los cojinetes del eje de ventilador del radiador	Aplicar análisis VOSOA o de vibraciones al cuerpo del radiador	M	Mensual	Mecánico

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. Hoja de revisión o *checklist* para el subsistema de combustible del MCI

CHECKLIST DE MANTENIMIENTO

CHECK LIST DE MANTENIMIENTO			SISTEMA	Encargado o facilitador:	Fecha de ejecución de este checklist:	Hoja No. de	
			Motor de combustión interna (MCI)				
Referencia de información			SUBSISTEMA	Supervisor o auditor:	/ /	7	
			Combustible				
F	FF	MF	Tarea propuesta	Procedimiento	Equipo detenido (D) / Equipo en marcha (M)	Intervalo inicial	A realizarse por
1	A	3	Revisión del nivel de combustible para evitar súbitos ahogamientos del MCI	Mantener siempre llenos el tanque diario y el externo de combustible. Revisar las tuberías y mangueras del sistema de combustible buscando rajaduras, roturas, acoples flojos. Revisar el funcionamiento de la bomba de combustible.	D	Mensual	Mecánico
1	A	4	Limpieza de los inyectores y revisión su sincronización para evitar la emanación de humo negro por el escape	Revisar la sincronización de los inyectores y hacer la afinación debida del MCI. Reemplazar los inyectores defectuosos o limpiarlos.	D	Mensual	Mecánico

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Hoja de revisión o *checklist* para el subsistema del escape del MCI

CHECKLIST DE MANTENIMIENTO

CHECK LIST DE MANTENIMIENTO			SISTEMA	Encargado o facilitador:		Fecha de ejecución de este checklist: / /	Hoja No.
			Motor de combustión interna (MCI)				4
Referencia de información			SUBSISTEMA	Supervisor o auditor:		/ /	de
			Escape				7
F	FF	MF	Tarea propuesta	Procedimiento	Equipo detenido (D)	Intervalo inicial	A realizarse por
					Equipo en marcha (M)		
1	A	1, 2, 3, 4	Cambio de las partes (tubos, silenciador o muffler) dañados	Desmontar el escape de sus sujeciones y efectuar su cambio	D	Cuando sea necesario	Mecánico

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Hoja de revisión o *checklist* para el subsistema del generador eléctrico en la planta eléctrica de emergencia

CHECKLIST DE MANTENIMIENTO

CHECK LIST DE MANTENIMIENTO			SISTEMA	Encargado o facilitador:		Fecha de ejecución de este checklist: / /	Hoja No.
			Sistema eléctrico				5
Referencia de información			SUBSISTEMA	Supervisor o auditor:		/ /	de
			Generador eléctrico				7
F	FF	MF	Tarea propuesta	Procedimiento	Equipo detenido (D)	Intervalo inicial	A realizarse por
					Equipo en marcha (M)		
1	A	2	Medición del aislamiento de los devanados y de la carcasa del generador a tierra	Utilizar un medidor de fugas de corriente a masa o tierra y hacer la medición de los devanados entre si y de cada uno de ellos a masa o tierra	D	Anual	Electricista calificado para esta tarea
2	B	1					
2	B	2	Revisión de todas las conexiones eléctricas y apriete de las borneras del generador	Destapar la caja de conexiones y CT del generador, aspirar el polvo acumulado y revisar el apriete de las borneras	D	Anual	Electricista

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Hoja de revisión o *checklist* para el subsistema del tablero de control en la planta eléctrica de emergencia

CHECKLIST DE MANTENIMIENTO

CHECK LIST DE MANTENIMIENTO			SISTEMA Sistema eléctrico	Encargado o facilitador:		Fecha de ejecución de este checklist: / /	Hoja No. 6
			SUBSISTEMA Tablero de control	Supervisor o auditor:			de 7
Referencia de información			Tarea propuesta	Procedimiento	Equipo detenido (D)	Intervalo inicial	A realizarse por
F	FF	MF			Equipo en marcha (M)		
1	A	1	Revisión de conexiones flojas, fallas o cortocircuitos en los dispositivos del tablero de control de la planta eléctrica de emergencia	Mantenimiento Preventivo adecuado al generador eléctrico, a su circuitería de salida (conexiones y borneras), transformadores de corriente o CT, regulador de voltaje, que puedan provocar fallas (sobrecargas o cortocircuitos) a los dispositivos de control, medición y monitor de información en el tablero de control	D	Anual	Electricista
1	D	1	Revisión de los instrumentos de control y de sus carátulas (que se muestren todos sus segmentos digitales encendidos)	Maniobrar el conmutador para tal efecto en el tablero de control	D	Mensual	Electricista

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. Hoja de revisión o *checklist* para el subsistema eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia

CHECKLIST DE MANTENIMIENTO

CHECK LIST DE MANTENIMIENTO			SISTEMA Sistema eléctrico	Encargado o facilitador:		Fecha de ejecución de este check list: / /	Hoja No. 7
			SUBSISTEMA Eléctrico/electrónico periférico en la planta eléctrica de emergencia	Supervisor o auditor:			de 7
Referencia de información			Tarea propuesta	Procedimiento	Equipo detenido (D)	Intervalo inicial	A realizarse por
F	FF	MF			Equipo en marcha (M)		
1	A	1	Revisar el periodo de la vida útil de las baterías	Revisar la densidad de su electrolito, estar a tanto del fin de su vida útil aun si son libres de mantenimiento	D	Bianual	Electricista
1	A	1	Limpieza de las baterías	Limpieza general de las baterías, removiendo el sulfato de plomo, si lo tuvieran sus bornes	D	Mensual	Electricista
1	A	2	Revisar el cargador automático de baterías buscando cualquier indicación luminosa de falla	Inmediatamente tomar las medidas correctivas necesarias para su inmediata puesta en servicio.	D	Mensual	Electricista

Fuente: elaboración propia.

De la información que puede inferirse de las hojas de revisión o *checklist* anteriores, para la planta eléctrica de emergencia en estudio, pueden resumirse aquellas actividades de mantenimiento mensuales, únicamente con fin de comparación con el mantenimiento preventivo a la fecha, para establecer brevemente que si están bien concebidas e implementadas, la cantidad de tareas disminuyen debido a que habrá algunas en el RCM que no son necesariamente de ejecución mensual, sino que se postergan o se les asigna una periodicidad mayor, o tal vez, ni siquiera se refieren, se ignoran.

Debe notarse que el RCM no propone directamente una reducción de las acciones de mantenimiento, o únicamente tareas preventivas rutinarias, sino que las que haya que realizar sean las estrictamente necesarias. Es un plan de mantenimiento concienzudo diseñado particularmente para cada equipo, instalación, sistema, maquinaria, entre otros, no una receta general para todos, como lo es a la fecha.

Como ya se dijo y se demostró, el RCM se distingue de la práctica tradicional del mantenimiento preventivo en la preservación de la función del equipo, maquinaria, instalación o sistema porque identifica las fallas funcionales y las prioriza de acuerdo a sus consecuencias y selecciona las acciones o tareas necesarias, aplicables y costo-eficientes del mantenimiento, por medio del diagrama de decisión.

Lo anterior marca un punto de inflexión, entre lo que dice la teoría y lo que los operadores efectúan, es decir, muchos de ellos no entienden bien que no es suficiente comprender lo requerido y ponerlo en práctica, sino que intentarán realizar tareas que complican la implementación de RCM debido a que no están ajustadas a la realidad de la práctica. En otras palabras, no se han deslindado de la teoría general del RCM para aplicarla al particular caso de su equipo, esto

indudablemente los llevará a complicar mucho la implementación de la receta en el equipo.

Es imprescindible que los operadores conozcan muy bien el equipo para que sepan obtener únicamente el concepto de las prácticas o procedimientos sugeridos por el RCM y ponerlas en práctica, o desarrollarlas, en el equipo, lo que se traducirá en beneficios tanto para el equipo como para la institución o empresa propietaria del mismo ya que ajustará el mantenimiento proponiendo todas las soluciones para reducir o eliminar las consecuencias de las fallas y no, como y se mencionó, propiamente las fallas de este.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Es importante resaltar que los resultados obtenidos luego del análisis a los dos sistemas y sus siete subsistemas principales de una planta eléctrica de emergencia analizados bajo la luz del RCM II™ proporcionan una perspectiva muy diferente a aquella que normalmente se maneja en cuanto al mantenimiento de estos equipos, es decir, la forma tradicional de un mantenimiento preventivo estándar para las plantas eléctricas de emergencia que generan en baja y media tensión, independientemente de su marca, modelo, potencia y voltaje de entrega para los cuales se contratan estos servicios.

Se obtuvo un estudio muy adecuado, completo y correcto de la aplicación del RCM II™ para la planta eléctrica de emergencia de 625 KVA, 480 VAC, *Stand-by* llevando a cabo un análisis muy concienzudo y profundo sobre las funciones, fallas funcionales, los modos o causas de fallas, los efectos de falla, y las tareas propuestas o formas de reparación o prevención de estas fallas.

Para próximos trabajos de investigación similares, el presente podrá ser una guía y podrá utilizarse para que, a partir de él, puedan desarrollarse análisis más generales, específicos para una planta eléctrica de emergencia o exhaustivos, según sea la orientación que se les dé.

4.1. El mantenimiento preventivo y correctivo a la fecha de la planta eléctrica de emergencia

A la fecha, a la planta eléctrica de emergencia objeto de este estudio, se le proporciona mantenimiento preventivo cuatrimestral y atención al momento de presentarse un requerimiento de mantenimiento correctivo.

Puede decirse que los factores críticos que posee el plan de mantenimiento preventivo actual son:

- Es ni más ni menos, la consecución de un plan de mantenimiento que busca prevenir fallas y es general para todos los equipos de esta naturaleza que son intervenidos por la mayoría de las empresas locales. Algunos tal vez tengan algunas pequeñas variaciones. Hay una empresa representante de una muy conocida marca de estos equipos que utiliza un formato un poco más completo, pero que sigue siendo general para todos los equipos para quienes se contrata este servicio.
- Está basado principalmente en la experiencia de la compañía contratada para este fin, con alguna influencia de los fabricantes y modificaciones hechas a la medida por él mismo.
- Asimismo, no se toman en cuenta las condiciones de operación ni el ámbito operacional actual de la planta eléctrica de emergencia en particular, en otras palabras, las compañías que prestan este servicio no realizan un plan hecho a la medida de cada equipo.
- No se adentra a las particularidades de cada equipo, que es muy lógico asumir, y de hecho así es, debido a la falta de capacidad técnica y a

aquella atención a la competitividad del mercado que no califica el costo de realizar un programa de mantenimiento preventivo adecuado para cada equipo, sino a pagar lo menos posible.

- También, el personal de mantenimiento propio de la institución no se involucra en el desarrollo o análisis del plan de mantenimiento propuesto por la compañía a contratar, lo que le quita mucha confiabilidad al plan de mantenimiento a contratar y por ende a ejecutar.

Cuando sucede una falla, cosa bastante rara, se llama inmediatamente a la compañía contratada, quien en general tiene entre sus obligaciones contraídas en el contrato, la atención inmediata de fallas y son quienes la reparan, en caso de contar con los repuestos. Cuando no cuenta con los repuestos acuden a los representantes locales del equipo para gestionar la cotización del repuesto para luego trasladarla a la institución o empresa propietaria del equipo para su autorización y compra.

En contraste, se espera que el análisis y el plan de RCM II™ en sí:

- Asegure que el plan de mantenimiento y sus hojas de revisión o *checklist*, ya desarrollado, será exclusivo para cada equipo en particular.
- Garantizará mantener las expectativas de operación del mismo en su contexto a la fecha previniendo las consecuencias de falla y asegurando que las tareas que se realicen son las estrictamente necesarias (sin redundancia ni tareas vagas) para lograr la confiabilidad del activo.

Es muy importante hacer notar que el cambio del mantenimiento preventivo actual al RCM no se debe a pretender eliminar las fallas, cuya cantidad no es

significativa, sino a minimizar el impacto de estas, cuando ocurran, debido a que el equipo ha sido analizado individual y pormenorizadamente para tener un panorama particular del este, de donde parten las acciones a tomar para implementar y obtener las ventajas del RCM.



También, al analizar los diagramas de flujo de cada tipo de mantenimiento, se nota que aquel correspondiente al actual se centra en tareas supuestamente de obligación mensual mientras que el del RCM II™ traslada algunas tareas para una frecuencia anual o bianual y que el primero no considera, como el análisis de lubricante, entre otros monitoreos de condición. Adicionalmente, comparar dichos diagramas no va en el sentido estricto de la palabra debido a que ambos vienen de concepciones muy diferentes del mantenimiento y no se encuentra un punto común para efectuar una acertada comparación.

4.2. Implementación de la metodología de divulgación de este trabajo

Una vez desarrolladas las hojas de revisión o *checklist*, deben divulgarse.

A continuación, se presenta una secuencia o galería fotográfica del proceso de instrucción al Supervisor de Electricidad de la institución donde se encuentra el equipo.

Tabla XXXI. **Secuencia fotográfica del proceso de instrucción al Supervisor de Electricidad de la institución donde se encuentra en equipo**

	<p>El supervisor de electricidad de la institución donde se encuentra instalado el equipo recibiendo explicaciones del plan de RCM II™ por el autor de este trabajo.</p>
	<p>El supervisor de electricidad de la institución donde se encuentra instalado el equipo y el autor de este trabajo durante la capacitación o instrucción acerca del RCM II™ para el equipo.</p>

Continuación de la tabla XXXI.

	<p>El asesor de este trabajo, el supervisor de electricidad de la institución donde se encuentra instalado y el equipo y el autor de este trabajo durante la resolución de dudas sobre el plan de RCM II™ para este equipo.</p>
	<p>El asesor de este trabajo, Mtro. Sergio Roberto Soto Gallardo, el supervisor de electricidad de la institución donde se encuentra instalado el equipo, señor Marvin Guillermo González Gutiérrez y el autor de este trabajo, Ing. José Luis Mendóza Alvarado.</p>

Fuente: elaboración propia.

La pancarta o afiche propuesto como un medio gráfico para publicarse en la caseta donde se encuentra ubicada la planta eléctrica de emergencia, se

muestra en el apéndice, siendo esta una de las mejores técnicas de difusión y demostración de los beneficios del RCM II™ acertando el enfoque en los beneficios y ganancias que pueden obtenerse de una aplicación hecha 'a la medida' del equipo.

4.3. Análisis externo

Una vez obtenidos los resultados de este trabajo, se interpretaron para evaluar de forma crítica si lo observado es correcto y contesta a los planteamientos expresados en los Antecedentes de este.

Se definieron las estrategias de gestión de activos mediante el RCM, según Brunner (2019), es decir, aquellas basadas en condición, búsquedas de fallas, cambios de una sola vez, entre otros obteniéndose la división en los dos sistemas funcionales de la planta eléctrica de emergencia: el sistema del MCI y el sistema eléctrico y sus subsistemas de ambos, y de ahí el listado de técnicas predictivas empleadas para redactar las hojas de información, hojas de decisión para, finalmente, llegar al plan de mantenimiento propuesto aludido como las hojas de revisión o *checklist*. Se ve que lo propuesto concuerda con lo ejecutado.

También se realizó un análisis entre el mantenimiento actual, puramente preventivo, y aquel propuesto, o basado en el RCM. De esta forma se obtuvo un aporte práctico, según Mantenimiento Petroquímica (2019). Se describieron los alcances y recomendaciones de cada uno de los tipos de mantenimiento que se analizaron. Se validó que el proceso se llevó a cabo en forma adecuada, completa y correcta.

Flores-Marcelo (2015) sugiere la recopilación de datos para inferir tendencias confiables. Estas tendencias en el caso de este trabajo tienen una

tendencia muy dispersa porque se determinó que, por ejemplo, las fallas eléctricas no se presentan a menudo y por lo tanto no son un parámetro confiable para generar tendencias. Por otro lado, el historial de las fallas mecánicas, que se dan muy rara vez, sí se puede recopilar, siempre que se tenga a la planta eléctrica de emergencia en un programa periódico de mantenimiento preventivo.

Siempre será conveniente, y de hecho así se hace con el equipo en estudio, la recopilación, archivo y reporte al siguiente nivel jerárquico de los resultados y observaciones derivados de las órdenes de servicio para tener el historial de mantenimiento de la planta eléctrica de emergencia.

Ghorani (2015) sugiere una metodología para determinar monetariamente el impacto de la interrupción de un sistema de energía eléctrica. Los tiempos de interrupción del suministro, comparados contra el escenario de un servicio continuo que no fue posible determinarlos ya que la institución no accedió a proporcionar esta información, aunque por la escasa frecuencia de estas interrupciones, el impacto económico se considera despreciable. Es complementario hacer notar que las fallas más recurrentes de suspensión del servicio de la planta eléctrica de emergencia se debieron a una demanda de potencia eléctrica superior a aquella capaz de generar por el equipo, cosa que escapa al alcance de este trabajo, o sea, escapa a un plan de mantenimiento.

Para Cajas y Janeta (2009) el resultado de la investigación es la elaboración de un plan de RCM basado en tareas apropiadas para disminuir, o evitar, las consecuencias de los modos de falla en los motores estacionarios de una central termoeléctrica, estableciendo las tareas de mantenimiento basadas en el RCM para el equipo, concluyendo que el RCM no es una política general de mantenimiento, sino un criterio para evaluar el mantenimiento y para mostrar si

los procedimientos sugeridos son los adecuados para reducir las fallas de cada modo de falla. Esto se demostró por medio de la metodología de este trabajo.

En otras palabras, que los equipos pueden funcionar aparentemente bien sin el RCM. Sin embargo, el fin del RCM no es comparar sino ir más allá para garantizar el mantenimiento de las expectativas de buena operación del equipo en su contexto actual, para prevenir las consecuencias de falla y asegurando que las tareas que se realicen son las estrictamente necesarias para lograr la confiabilidad del activo, o equipo en este caso.

4.4. Análisis interno

Se refiere al grado en que los resultados obtenidos de este trabajo pueden, o son válidos, sin sesgos o errores sistemáticos para la información (datos) que ha sido estudiada. En otras palabras, qué tanto se aproximan o concuerdan a la suposición inicial del efecto obtenido en el trabajo de investigación y la verdad, o sea lo que se pretende estimar.

Como el análisis interno es independiente del externo, de forma que la existencia del análisis externo no impone o exige al segundo, en este trabajo se determinó que no hay análisis interno en lo citado por Flores-Marcelo (2015) debido a la muy escasa cuantía de información de fallas, su origen y tiempo de duración, cosa totalmente corroborada en el alcance de este trabajo, porque se pudo constatar que una planta eléctrica de emergencia regularmente mantenida no presenta fallas mecánicas frecuentes y menos aún eléctricas debidas a su escaso funcionamiento o prestación de servicio bajo el régimen de *stand-by*.

Debe hacerse notar de nuevo, que el aporte del RCM, es proponer un sistema de mantenimiento que diga qué debe hacerse para asegurar que la

planta eléctrica de emergencia, en este caso, continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga (funcione adecuadamente) en el contexto de su situación actual, o sea preservar la función del equipo y, por lo tanto, va más allá de únicamente quedarse con la cuantía de información de fallas, su origen y tiempo de duración. Siendo esto parte del aporte de este trabajo, es decir, haber trascendido de lo usual a algo más allá de lo tradicional que es el mantenimiento preventivo contratado y aplicado al equipo, a la fecha. Adicional a esto es que todas las personas que se involucren en el grupo de trabajo que participa en el acopio de información alcanza un alto aprendizaje para el mantenimiento y operación de la planta eléctrica de emergencia.

También se nota que no hay análisis interno de este trabajo en la propuesta, o antecedente de Cajas y Janeta (2009) debido a que no solo se consideró el motor estacionario de combustión interna (MCI) sino también al generador eléctrico, lo que invalida el análisis interno porque el alcance de este trabajo fue más allá de los motores estacionarios al tomar en cuenta también al generador eléctrico, siendo esto un aporte de mucho valor para la estructura del RCM para la planta eléctrica de emergencia.

CONCLUSIONES

1. Se determinó, luego de una revisión de la documentación disponible, de apreciaciones físicas y fotografías que el mantenimiento a la fecha es de tipo preventivo. Ello se debe a que se realiza cuando se llegó a un tiempo calendario predeterminado para la intervención de los equipos en aquellas instituciones que contratan los servicios de las compañías dedicadas a este fin.
2. Los procedimientos y rutinas del RCM II™ que se aplicaron fueron aquellos ensayos no destructivos propios del análisis causa raíz (RCA) como el análisis ver, oír, sentir, oler y actuar (VOSOIA) para determinar ruidos anormales, vibraciones más allá de las habituales, fugas de fluidos y el análisis de aceite. Además, podrían aplicarse, de ser necesario en casos de mantenimientos correctivos, el análisis por líquidos penetrantes ante la sospecha o certeza de fracturas no visibles o fisuras, termografía por dudas en la temperatura del generador o del motor de combustión interna (MCI), análisis de vibraciones, y otros que se consideren pertinentes conforme a la naturaleza de las fallas. Los ensayos propuestos previamente servirán para tener un diagnóstico más certero de las fallas cuando se presenten.
3. Se divulgaron, mediante una capacitación, los beneficios de la implementación del RCM II™. Ello se realizó por medio de una evaluación exhaustiva de las fallas funcionales, modos de falla, efectos de falla y principalmente cómo puede evitarse la falla para eludir costos derivados de mantenimientos correctivos y aumentar el conocimiento a profundidad de los procesos del análisis de falla de la planta eléctrica de emergencia.

También se dieron a conocer los procedimientos y su variante con el plan actual a las personas involucradas técnica o administrativamente en la selección y aprobación de la compañía que tendrá a su cargo la ejecución del plan de mantenimiento para la planta eléctrica de emergencia.

4. La importancia de la implementación de un plan de RCM II™ recalca en que se aparta de los programas de mantenimiento preventivo tradicionales, cuando lo propuesto en la metodología es que debe ser específico para cada equipo. Los componentes generales del RCM II™ para el equipo en estudio son: fraccionar el equipo en sus sistemas y subsistemas de constitución, redactar las hojas de información, luego las hojas de decisión para finalmente concluir con las hojas de revisión o *checklist*. El programa generado pretende adaptarse de mejor forma a los requerimientos específicos del equipo.

RECOMENDACIONES

1. Cambiar los procedimientos de mantenimiento vigentes a la fecha de investigación para las plantas eléctricas de emergencia, diseñando planes basados en el RCM II™ específicos para cada equipo. Este documento se constituye como una guía de procedimiento.
2. Diseñar y aplicar un plan de RCM II™, en el lugar donde se cuente con una planta eléctrica de emergencia. Para ello, se utilizarán aquellas técnicas del monitoreo de condición que coadyuven a proponer soluciones adecuadas a aquellas condiciones de falla o aplicación de mantenimiento correctivo para determinar una mejor y adecuada ruta de diagnóstico y las correspondientes soluciones.
3. Tomar en cuenta que, generalmente, no se contrata una capacitación a los encargados de mantenimiento, ni se ofrece por parte de las compañías locales que prestan este servicio, al contratar los servicios de mantenimiento para una planta eléctrica de emergencia. Por ello será necesario solicitar esta capacitación y que ese plan de mantenimiento sea con base al RCM II™.
4. Conocer los conceptos, procedimientos y principalmente los beneficios del RCM II™. Los interesados o involucrados en el mantenimiento de plantas eléctricas de emergencia, ya sea prestadores de este servicio o usuarios, podrán utilizar este trabajo como referencia para interesarse por el tema y su implementación en el medio.

REFERENCIAS

1. Aroca, D. (2019). Mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. Definiciones y diferencias. *Lean Manufacturing 10*. Recuperado de <https://leanmanufacturing10.com/mantenimiento-correctivo-preventivo-y-predictivo-definiciones-y-diferencias>.
2. Blandino, J. (2013). *Diseño de sistema eléctrico con planta eléctrica de emergencia controlado por PLC en los laboratorios de computación pabellón 11 y electrónica pabellón 21 de la facultad de ciencias e ingenierías*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Managua, Nicaragua. Recuperado de <http://repositorio.unan.edu.ni/5367/1/14711.pdf>.
3. Brunner, M. (2019). Herramientas para mejorar las estrategias de mantenimiento y los procesos de análisis de fallas. *Reliability.com*. Recuperado de https://reliabilityweb.com/articles/entry/tools_for_improving_maintenance_strategies_and_failure_analysis_processes.
4. Cajas, C. et. al. (2009). *Planificación de Mantenimientos Basado en el Método de Confiabilidad RCM para Motores Estacionarios de la Planta Termopichincha, S. A., Central Guangopolo. 294*. (Tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. Quito, Ecuador. Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1750>.

5. Doctum gestión del conocimiento. (s.f.) Los 5 porques de Toyota: una técnica para identificar y resolver problemas. *Doctum gestión del conocimiento*. Recuperado de <https://www.doctum.cl/los-5-porques-de-toyota-una-tecnica-para-identificar-y-resolver-problemas/>.
6. Edminister, J. (s. f.). *Circuitos eléctricos*. McGraw-Hill.
7. Flores-Marcelo, J. (2015). *Evaluación de la confiabilidad del sistema de generación eléctrica en una refinería de hidrocarburos*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Piura, Perú. Recuperado de <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2411>.
8. Ghorani, R. (2015). *Identifying critical components for reliability centered maintenance management of deregulated power systems*. Estados Unidos: Autor. doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0361
9. Hoyos, L. (2011). El elusivo intervalo P-F. *Living Reliability*. Recuperado de <http://www.livingreliability.com/wordpress/posts/el-elusiva-intervalo-p-f/>.
10. International Organization for Standardization -ISO- (2008). *Norma Internacional ISO 9001:2008 Sistemas de gestión de la calidad — Requisitos*. Estados Unidos: Autor.
11. MantenimientoPetroquimica.com. (s.f.). Diferencias entre un plan de mantenimiento inicial y uno basado en RCM. *Mantenimiento Petroquímica*. Recuperado de

<http://mantenimientopetroquimica.com/index.php/herramientas-habituales/30-rcm>.

12. MAYATRAC, S. A. (octubre, 1991). *Aplicación e instalación de generadores Caterpillar*. Curso llevado a cabo en la ciudad de Guatemala, Guatemala.
13. Medina, J. (2016). Consecuencias de las fallas – 4 categorías. *Confiabilidad RCM*. Recuperado de <https://confiabilidadrcm.wordpress.com/2016/10/21/rcm-paso-5-evaluar-efectos-y-consecuencias-en-que-forma-es-importante-cada-falla/>.
14. Mejía, T. (2020). Mantenimiento Preventivo: características, tipos, objetivos. *Lifeder*. Recuperado de <https://www.lifeder.com/mantenimiento-preventivo/>.
15. Montes, M. (2017). Los 5 por qué de Toyota. *Club responsables de gestión de calidad*. Recuperado de <https://clubresponsablesdecalidad.com/los-5-por-ques-toyota/>.
16. Moubray, J. M. (2004). *RCM II - Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. (S. Y. ELLMANN, Trad.) Buenos Aires-Madrid, Argentina-España: Aladon LLC.
17. Murillo, G. (2002). Implementación de mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM. *Gestiopolis*. Recuperado de <https://gestiopolis.com/implementacion-de-mantenimiento-centrado-en-la-confiabilidad-rcm/>.

18. National Fire Protection Association -NFPA- (2010). *NFPA® 110 Standard for Emergency and Standby Power Systems Handbook 2010*. Estados Unidos: Autor.
19. Pacheco S. (2011). Aplicación de análisis de criticidad como apoyo al sistema de confiabilidad operacional. *Engineering, Reliability & Management*. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/3774607/12/images/>.
20. PdM TECH. (2017). Origen del RCM. *Cuánto sabes sobre RCM?* Recuperado de <http://www.pdmtechusa.com/origenrcm/>.
21. PdM TECH. (2018). *Norma SAE JA1011 – Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)*. Vega Baja, Puerto Rico: Autor. Recuperado de <http://www.pdmtechusa.com/criterios-evaluacion-rcm/>.
22. Ramírez, E. (s. f.). *Tema 7. Validez Interna y Externa*. Jaen, España: Autor. Recuperado de <http://www4.ujaen.es/~eramirez/Descargas/tema7#:~:text=La%20validez%20interna%20dirige%20la,los%20resultados%20de%20un%20experimento.>
23. reliabilityweb.com. (2020). El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional. *RELIABILITIWEB.COM*. Recuperado de <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/el-analisis-de-criticidad-una-metodologia-para-mejorar-la-confiabilidad-ope.>

24. reliabilityweb.com (2020). Herramientas para mejorar el mantenimiento y los procesos de análisis de fallas. *RELIABILITWEB.COM*. Recuperado de https://reliabilityweb.com/articles/entry/tools_for_improving_maintenance_strategies_and_failure_analysis_processes.
25. Rodríguez, G. et al. (1996). Introducción a la investigación cualitativa. *Metodología de la Investigación cualitativa*. Recuperado de <https://media.utp.edu.co/centro-gestion-ambiental/archivos/metodologia-de-la-investigacion-cualitativa/investigacioncualitativa.doc>
26. Ruiz, P. et al. (2012). *Plan de mantenimiento genérico basado en confiabilidad para generadores eléctricos diésel con potencia menor a 500KW, superintendencia de Operaciones del Río Ecopetrol S.A.* Tesis de licenciatura. Universidad Industrial de Santander. Colombia. Recuperado de <http://noesis.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/37718/1/146766.pdf>.
27. SAE-INTERNATIONAL. (1999). *SAE-JA1011 - Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes*. Estados Unidos: Autor.

APÉNDICE

Apéndice 1. Pancarta o afiche



EL MANTENIMIENTO

- Cuando todo va bien, nadie recuerda que existe...
- Cuando algo va mal, dicen que no existe...
- Cuando es para gastar o invertir en él, dicen que tal vez no es necesario...
- Pero cuando realmente no existe o sucede algo, todos concuerdan que debería existir...

Que no le suceda esto a la planta eléctrica de emergencia

El plan del RCM está diseñado específicamente para este equipo, no es general

Menor tiempo promedio para reparar las fallas, o MTTR, al suscitarse

Mayor tiempo promedio entre fallas, o MTBF

Mayor disponibilidad, estará lista para proporcionar energía eléctrica al requerirlo

Beneficios del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad -RCM- a plantas eléctricas de emergencia

Aplicación del Mantenimiento Predictivo para pronosticar el punto futuro de falla de la planta eléctrica de emergencia, para que el componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle, incrementándose el conocimiento del equipo

Consulte con el Supervisor acerca de qué es el RCM, su cultura y su aplicación para la planta eléctrica de emergencia

Fuente: elaboración propia.