

MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN “MCC” PARA EL ÁREA
DE PREPARACIÓN DE CAÑA DE LA PLANTA INTEGRADA DE PRODUCCIÓN
DE ETANOL CARBURANTE BIOENERGY ZONA FRANCA S.A.S

DIEGO FERNANDO RIVAS BERMÚDEZ
WILSON ARIEL BELTRÁN ARIAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2020

MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN “MCC” PARA EL ÁREA
DE PREPARACIÓN DE CAÑA DE LA PLANTA INTEGRADA DE PRODUCCIÓN
DE ETANOL CARBURANTE BIOENERGY ZONA FRANCA S.A.S

ING. DIEGO FERNANDO RIVAS BERMÚDEZ
ING. WILSON ARIEL BELTRÁN ARIAS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN
GERENCIA DE MANTENIMIENTO

DIRECTOR
ING. DANIEL ORTIZ PLATA
MSC. EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2020

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios, a mi esposa Lina, mi hija Salome, a mis padres Gladis e Iván y mis hermanos Milena, Paola, Iván y Juan, quienes siempre estuvieron acompañándome en este proceso, compañeros de la especialización y docentes. Todos ellos hicieron parte importante de esta formación, que nos enriqueció como profesionales y especialmente nos hicieron crecer como personas.

Wilson Beltrán

Dedico este trabajo a Dios, a mi esposa Danny Castaño por el gran apoyo incondicional que me ha brindado en el transcurso de mi carrera. a mi padre Gildardo Rivas y hermano Carlos Andrés que sé que desde el cielo siguen guiando mi camino, a mi madre Mariela Bermúdez que me da fortaleza para seguir adelante y finalmente a todos los que fueron mis formadores y compañeros; de todos y cada uno pude aprender.

Diego Rivas

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera muy especial a nuestros jefes y colegas en la compañía Bioenergy, iniciando con el Ingeniero Benhur Pabón, Gerente Industrial quien nos apoyó y nos brindó todos los recursos para adelantar la presente especialización. De igual forma, al Ingeniero José Aparecido, Director Industrial quien siempre tuvo sus puertas abiertas a todas nuestras solicitudes y puso a nuestra disposición toda su experiencia. Asimismo, a nuestro director de monografía y docente, el Ingeniero Daniel Ortiz por sus aportes técnicos y personales, a todos ellos muchas gracias.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	18
1. BIOENERGY ZONA FRANCA S.A.S.....	19
1.2 PROCESO INDUSTRIAL.....	21
1.2.1 Cultivo y cosecha de la caña de azúcar.....	21
1.2.2 Recepción de Caña.....	23
1.2.3 Preparación de Caña.....	24
1.2.4 Extracción de Jugo de la Caña.....	26
1.2.5 Tratamiento de jugo.....	27
1.2.6 Fermentación.....	28
1.2.7 Destilación.....	29
1.2.8 Cogeneración.....	30
1.2.9 Compostaje.....	31
1.3 Ilustración de Proceso Industrial.....	33
2. PARADAS NO PROGRAMADAS EN EL ÁREA DE PREPARACIÓN.....	34
2.1 Tiempos Perdidos de Picadora y Desfibradora.....	35
2.2 Pareto de Tiempos Perdidos en el área de molienda.....	36
2.3 Características de los equipos.....	37
2.3.1 Picadora.....	37
2.3.2 Desfibradora.....	38
3. OBJETIVOS.....	40
3.1 Objetivo General.....	40
3.2 Objetivos Específicos.....	40
4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	41
5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD “MCC”.....	43

5.1 Marco Teórico.....	43
5.2 Marco Conceptual.....	44
5.3 Evolución de las expectativas sobre mantenimiento	45
5.3.1 Primera Generación.....	45
5.3.2 Segunda Generación.....	46
5.3.3 Tercera Generación.....	47
5.4 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)	49
5.4.1 Funciones	50
5.4.2 Fallas funcionales	55
5.4.3 Modos de falla	57
5.4.4 Efectos de falla	59
5.4.5 Categoría de consecuencia de fallas	60
5.4.6 Selección de las políticas y manejo de las fallas	61
5.4.7 Manejo de las consecuencias de falla.....	63
5.4.8 Políticas de manejo de fallas- Tareas programadas.....	64
5.4.9 Políticas de manejo de fallas.....	76
5.4.10 Selección de la política de manejo de fallas	78
6. MANTENIMIENTO ACTUAL	80
6.1 Plan Padrino	81
6.2 Ronda Autogestión	81
7. MODELO DE MANTENIMIENTO PROPUESTO	82
7.1 Modos de falla actuales.....	82
7.2 Pasos para el análisis en el algoritmo de decisión	84
7.3 Tareas de mantenimiento.....	93
8. CONCLUSIONES	94
BIBLIOGRAFÍA.....	95

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Resultados de producción zafras 2017/2018 – 2018/2019.....	20
Tabla 2. Indicadores de producción zafras 2017/2018 – 2018/2019.....	20
Tabla 3. Horas de paros no programados de picadora y desfibradora.....	35
Tabla 4 Hoja de mantenimiento centrado en confiabilidad	83
Tabla 5. Matriz de valoración de riesgos.....	83
Tabla 6. Tareas propuestas.....	93

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cultivo de la caña de Azúcar	21
Figura 2. Cosecha de caña de azúcar.....	23
Figura 3. Báscula.....	24
Figura 4. Preparación de Caña	25
Figura 5. Área de preparación y extracción	26
Figura 6. Tándem de Molienda.....	27
Figura 7. Purificación de Jugo	28
Figura 8. Área de Fermentación.....	29
Figura 9. Área de destilación.....	29
Figura 10. Área de cogeneración	30
Figura 11. Volteadora de Compost.....	31
Figura 12. Planta Industrial Bioenergy	33
Figura 13. Producción de Etanol en cuatro pasos	33
Figura 14. Horas de paro no programado de picadora y desfibradora	35
Figura 15. Pareto de horas de paro no programadas	36
Figura 16. Picador de Caña SL- COP-8-78”	37
Figura 17. Detalle cuchilla picadora	38
Figura 18. Conjunto desfibrador de Caña SL-COP-10-78”	39
Figura 19. Detalle martillos de la desfibradora.....	39
Figura 20. Primera generación del mantenimiento	46
Figura 21. Segunda generación del mantenimiento	47
Figura 22. Tercera generación del mantenimiento.....	48
Figura 23. Fases del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad MCC.....	49
Figura 24. Conceptos clave de las funciones de los activos.....	50
Figura 25. Aspectos específicos del contexto operacional	51
Figura 26. Aspectos de las funciones secundarias	53

Figura 27. Permittividad del deterioro.....	54
Figura 28. Aspectos relevantes del análisis de fallas.	56
Figura 29. Relación entre longevidad del equipo y falla.	62
Figura 30. Comportamiento de las fallas.....	63
Figura 31. Curva P-F.	66
Figura 32. Intervalo P-F.....	66
Figura 33. Intervalo neto P-F.....	67
Figura 34. Fallas aleatorias y el intervalo P-F.....	68
Figura 35. Curva P-F de tipo lineal.....	69
Figura 36. Intervalos P-F inconsistentes	70
Figura 37. Categorías de técnicas basadas en condición	71
Figura 38. Criterios de la tarea de desincorporación programada.....	71
Figura 39. Criterios de la tarea de restauración programada.	72
Figura 40. Límite de vida segura.	72
Figura 41. Criterios de detección de fallas.	73
Figura 42. Ecuación de probabilidad de falla múltiple.....	74
Figura 43. Aspectos técnicos de la detección de fallas	75
Figura 44. Ecuación de indisponibilidad.....	75
Figura 45. Criterios para realizar cambios en las especificaciones	76
Figura 46. Políticas para operar hasta fallar.	78
Figura 47. Ejemplo del diagrama de decisión.	79
Figura 48. Engranaje operacional	80
Figura 49. Paso 1 algoritmo de decisión MCC.....	84
Figura 50. Paso 2 algoritmo de decisión MCC.....	84
Figura 51. Paso 3 algoritmo de decisión MCC.....	85
Figura 52. Paso 4 algoritmo de decisión MCC.....	85
Figura 53. Paso 5 algoritmo de decisión MCC.....	86
Figura 54. Paso 6 algoritmo de decisión MCC.....	87
Figura 55. Paso 7 algoritmo de decisión MCC.....	88
Figura 56. Paso 8 algoritmo de decisión MCC.....	89

Figura 57. Paso 9 algoritmo de decisión MCC.....90
Figura 58. Paso 10 algoritmo de decisión MCC.....91
Figura 59. Paso 11 algoritmo de decisión MCC.....92

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos y pueden visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS)

- Anexo A. Hoja de datos picadora de caña SL-COP-8 78”
- Anexo B. Manual de montaje, operación y mantenimiento picadora de caña SL-COP-8 78”
- Anexo C. Hoja de datos desfibradora de caña SL-COP-10 78”
- Anexo D. Manual de Instalación, operación y mantenimiento desfibradora de caña SL-COP-10 78”

GLOSARIO

Capacidad Inicial: el nivel de operación que el activo físico o sistema es capaz de lograr en el momento que entra en servicio.

Consecuencias de Falla(*): los efectos que puede provocar un modo de falla o una falla múltiple (evidencia de falla, impacto en la seguridad, en el ambiente, en la capacidad operacional, en los costos de reparación directos o indirectos).

Contexto Operacional(*): las circunstancias bajo las cuales se espera que opere el activo físico o sistema.

Desempeño deseado: el nivel de desempeño deseado por el dueño o usuario de un activo físico o sistema.

Dueño: una persona u organización que puede sufrir o acarrear la responsabilidad de las consecuencias de un modo de falla en virtud de la propiedad del activo o sistema.

Efecto de Falla(*): lo que pasa cuando ocurre un modo de falla.

Falla Evidente(*): un modo de falla cuyos efectos se tornan evidentes para el personal de operaciones bajo circunstancias normales, si el modo de falla ocurre aislado.

Falla Funcional(*): un estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible para ejercer una función específica a un nivel de desempeño deseado.

Falla Múltiple(*): un evento que ocurre si una función protegida falla mientras su dispositivo o sistema protector se encuentra en estado de falla.

Falla Oculta(*): un modo de falla cuyo efecto no es evidente para el personal de operaciones bajo circunstancias normales, si el modo de falla ocurre aislado.

Falla Potencial(*): una condición identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir o está en proceso de ocurrir.

Función(*): lo que el dueño o usuario desea que realice un activo físico o sistema.

Función(es) Primaria(s) (*): la(s) función(es) que constituyen la(s) razón(es) principal(es) por las que el activo físico o sistema es adquirido por su dueño o usuario.

Funciones Secundarias(*): las funciones que un activo físico o sistema tiene que cumplir a parte de su(s) función(es) primaria(s), así como aquellas que necesitan cumplir con los requerimientos reguladores o a las cuales conciernen los problemas de protección, control, contención, confort, apariencia, eficiencia de energía e integridad estructural.

Intervalo P-F(*): el intervalo entre el punto en que una falla potencial se hace detectable y el punto en que esta se degrada hasta una falla funcional (también conocido como “período para el desarrollo de falla” o “tiempo esperado para la falla”).

Intervalo P-F Neto(*): el intervalo mínimo probable que transcurre entre la detección de una falla potencial y la ocurrencia de una falla funcional.

Longevidad: una medida de exposición al esfuerzo calculada desde el momento en el cual un elemento o componente entra en servicio cuando nuevo o vuelve a entrar en servicio después de una tarea designada para restaurar su capacidad inicial, y puede ser medida en términos de tiempo de calendario, tiempo de operación, distancia recorrida, ciclos de durabilidad o unidades de producción o de rendimiento.

Mantenimiento Proactivo(*): mantenimiento emprendido antes de que ocurra una falla, para prevenir que cualquier elemento entre en estado de falla (restauración programada, desincorporación programada y mantenimiento basado en condición).

Modo de Falla(*): un evento único, que causa una falla funcional.

Operar hasta Fallar(*): una política de manejo de fallas que permite que un modo de falla específico ocurra sin ningún esfuerzo para anticiparla o prevenirla.

Política de Manejo de Fallas(*): un término genérico que abarca tareas basadas en condición, restauración programada, desincorporación programada, detección de falla, operar hasta fallar y cambio de especificaciones.

Programado: se establece como fijo, a intervalos predeterminados, incluye “monitoreo continuo” (donde el intervalo es efectivamente cero).

Restauración Programada(*): una tarea programada que restaura la capacidad de un elemento en (o antes de) un intervalo especificado (límite de longevidad), sin tener en cuenta su condición en el momento, a un nivel que proporciona una probabilidad tolerable de supervivencia hasta el final de otro intervalo especificado.

Tarea Apropriada: una tarea que es técnicamente factible y al mismo tiempo vale la pena realizar (aplicable y efectiva).

Tarea Basada en Condición(*): una tarea programada usada para detectar una falla potencial.

Tarea para Detectar Fallas(*): una tarea programada utilizada para determinar si ha ocurrido una falla oculta específica.

Usuario: una persona u organización que opera un activo o sistema y podría sufrir o acarrear la responsabilidad por las consecuencias de un modo de falla de ese sistema.

RESUMEN

TÍTULO: MODELO DE PLAN DE MANTENIMIENTO BASADO EN “MCC” PARA EL ÁREA DE PREPARACIÓN DE CAÑA DE LA PLANTA INTEGRADA DE PRODUCCIÓN DE ETANOL CARBURANTE BIOENERGY ZONA FRANCA S.A.S¹

AUTOR: ING. DIEGO FERNANDO RIVAS BERMÚDEZ/ ING. WILSON ARIEL BELTRÁN ARIAS²

PALABRAS CLAVE: PICADORA, DESFIBRADORA, ETANOL, MCC, MODO DE FALLA, EFECTOS DE FALLA, MANTENIMIENTO.

DESCRIPCIÓN: Esta monografía contiene el desarrollo de un modelo de plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad “MCC” para el área de preparación de caña de la planta integrada de etanol carburante Bioenergy Zona Franca S.A.S, que surge a raíz de los detenimientos en la producción a consecuencia de estos activos; con el propósito de aumentar la confiabilidad y disponibilidad, considerando como punto de partida la definición de las funciones, fallas funcionales y los modos de fallas para evaluar y determinar una rigurosa selección de tareas específicas contenidas en lo que sería el plan de mantenimiento más adecuado, estructurado y definido conforme a la necesidades de producción.

El presente estudio cuenta con información técnica, conocimiento, experiencia del personal operativo y de mantenimiento; investigación fundamental para la estructuración del desarrollo de las tareas de mantenimiento asumiendo como derrotero la norma SAE JA1012. Cada uno de los componentes que definen la función se dividen en sistemas y subsistemas; una vez definida la estructura, se ordena a nivel equipo para estudiar cada componente de todo el conjunto e identificar las funciones y anti-funciones dentro del contexto operacional.

El resultado obtiene la información esencial para la realización de lo que sería un modelo de plan de mantenimiento estructurado con tareas resultantes del “MCC”, emprendimiento constante y proactivo del personal operativo además del modo de actuar de mantenimiento, a priori de establecer intervalos programados de monitoreo de los activos para la detección de falla o la implementación de políticas de manejo de fallas que abarcan diferentes programas a la hora de tomar las mejores decisiones técnicamente factibles para la organización.

¹ Monografía de grado

² Facultad de ingenierías Físico – Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.
Director: Daniel Ortiz Plata, MSC. En Gerencia de Mantenimiento

ABSTRACT

TITLE: MODEL OF MAINTENANCE PLAN BASED ON “MCC” FOR THE CANE PREPARATION AREA OF THE INTEGRATED PLANT FOR THE PRODUCTION OF ETHANOL FUEL BIOENERGY ZONA FRANCA S.A.S³

AUTHOR: ING. DIEGO FERNANDO RIVAS BERMÚDEZ/ ING. WILSON ARIEL BELTRAN ARIAS⁴

KEYWORDS: CHOPPER, DEFIBRATOR, ETHANOL, MCC, FAILURE MODE, FAILURE EFFECTS, MAINTENANCE.

DESCRIPTION: This monograph contains the development of a model Reliability Centered Maintenance "MCC" plan for the cane preparation area of the Bioenergy Zona Franca SAS integrated fuel ethanol plant, which arose as a result of production stoppages as a result these assets; with the purpose of increasing reliability and availability, considering as a starting point the definition of functions, functional failures and failure modes to evaluate and determine a rigorous selection of specific tasks contained in what would be the most appropriate maintenance plan, structured and defined according to production needs.

This study has technical information, knowledge, and experience of the operating and maintenance personnel; fundamental research for structuring the development of maintenance tasks assuming the SAE JA1012 standard as a course. Each of the components that define the function are divided into systems and subsystems; Once the structure is defined, it is ordered at the team level to study each component of the whole set and identify the functions and anti-functions within the operational context.

The result obtains the essential information for the realization of what would be a structured maintenance plan model with tasks resulting from the "MCC", constant and proactive undertaking of the operating personnel in addition to the maintenance mode of action, a priori to establish scheduled intervals of asset monitoring for failure detection or the implementation of failure management policies that cover different programs when making the best technically feasible decisions for the organization.

³ Monograph

⁴ Physical – Mechanical Faculty. Maintenance Management Specialization. Director: Daniel Ortiz Plata, MSC. En Gerencia de Mantenimiento

INTRODUCCIÓN

Bioenergy Zona Franca S.A.S, es la primera empresa de la Orinoquía productora de Etanol, usando como materia prima la caña de azúcar que es sembrada en la altillanura colombiana y cosechada mecánicamente a través de equipos especializados de última tecnología que permite hacer un uso óptimo del agua y del suelo⁵.

La planta de biocombustibles tiene como particularidad un periodo de producción o zafra que oscila entre los 150 y 180 días, comprendidos entre el mes de agosto extendiéndose hasta el mes de febrero. Durante este periodo, la planta debería operar durante las 24 horas, todos los días de la semana, haciendo uso de grandes recursos, equipos y herramientas, así como también del personal necesario para mantener las actividades del proceso productivo de manera continua.

El factor determinante es el tiempo de producción “ininterrumpido” visto desde el punto de vista económico. Cualquier retraso con respecto al calendario establecido es tiempo que debe reponerse al final de la zafra para cumplir con la molienda de toda la caña dispuesta, conforme al aforo de caña. Esto representaría un retroceso e incrementaría considerablemente los costos de producción.

Acorde a lo anterior, el presente estudio busca aplicar la metodología para desarrollar un plan basado en *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)* que nos permite preservar las funciones y optimizar los planes de mantenimiento, teniendo como objetivo principal aumentar la confiabilidad de la desfibradora y picadora de caña de azúcar.

⁵ BIOENERGY. Nuestra empresa [Historia] [Consultado: 18 de octubre de 2020]. Disponible en: <http://www.bioenergy.com.co/SitePages/NuestraEmpresa.aspx#Historia>

1. BIOENERGY ZONA FRANCA S.A.S

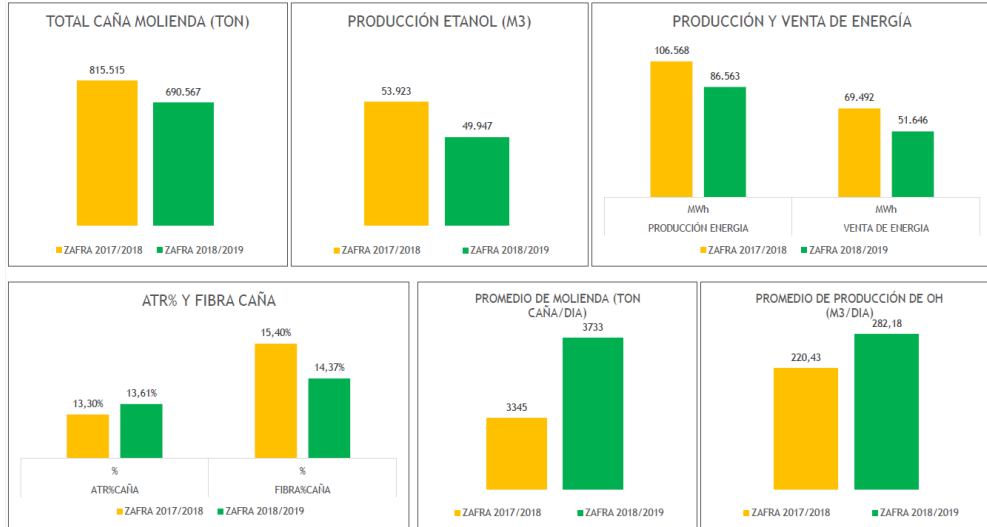
Bioenergy es una empresa agroindustrial productora de Etanol carburante que usa como materia prima la caña de azúcar que es sembrada en la altillanura colombiana, la planta industrial está ubicada en el kilómetro 43 de la vía que conduce de Puerto López a Puerto Gaitán en el departamento del Meta. Cuenta con una capacidad de diseño para moler 6800 toneladas de caña de azúcar por día, para producir 500.000 litros de etanol y generar 43 Megavatios de energía, vendiendo alrededor de 20 Megavatios a la red nacional. El etanol es un producto requerido por el mercado nacional de los combustibles; éste se utiliza para disminuir los gases de efecto invernadero y ayudar a disminuir el impacto al medio ambiente a través de la mezcla con gasolina regulada, permitida por el gobierno nacional colombiano, más exactamente por Ministerio de Minas y Energías.

La producción de etanol a base de caña de azúcar es un proceso relativamente sencillo e implica la extracción de los azúcares en la molienda de caña. Posteriormente la purificación del jugo, evaporación, fermentación, destilación y deshidratación respectivamente.

En cuanto a las definiciones de la organización Bioenergy, se puede apreciar su misión, la cual busca ser líder en la producción y comercialización de energías renovables con énfasis en etanol en Colombia, con el firme propósito de generar valor a la sociedad, a los inversionistas, colaboradores y en general, a todos los grupos de interés. Asimismo, la visión de la compañía es ser líder del sector de los Biocombustibles y un actor relevante en energía renovable en Colombia, aportando a la conservación del medio ambiente, a la economía de la región y al desarrollo del entorno, bajo la premisa de la seguridad de sus colaboradores.

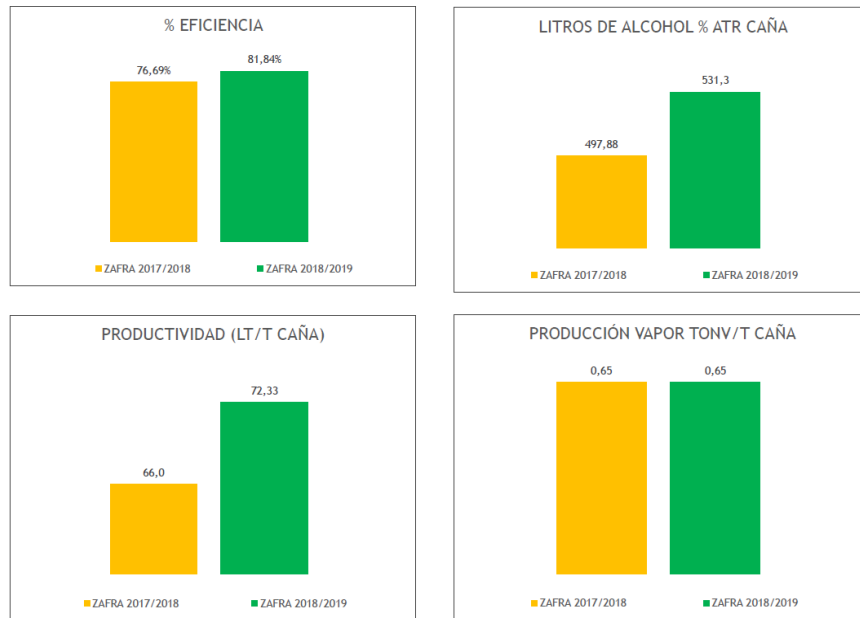
Los valores corporativos de Bioenergy son vida, tenacidad, creatividad, sencillez y sentido de urgencia.

Tabla 1. Resultados de producción zafras 2017/2018 – 2018/2019



Fuente: Indicadores de producción Bioenergy Zona Franca S.A.S

Tabla 2. Indicadores de producción zafras 2017/2018 – 2018/2019



Fuente: Bioenergy Zona Franca S.A.S

1.2 PROCESO INDUSTRIAL

1.2.1 Cultivo y cosecha de la caña de azúcar

El campo se adecua para ser más eficiente, para mejorar el drenaje superficial y para facilitar el transporte de la caña de azúcar durante la zafra que es el periodo productivo. Para ello se requiere un levantamiento topográfico con un equipo de alta precisión denominado estación total, que permite transcribir a un plano los accidentes del terreno, facilitar el diseño y calcular los movimientos de tierra que luego un tractor de oruga o una trilla harán en el terreno, culminando así la labor de nivelación.

Figura 1. Cultivo de la caña de Azúcar



Fuente: Bioenergy Zona Franca S.A.S

Posteriormente, se prepara el suelo con dos pases de subsolación, uno de ellos en el sentido de la pendiente y otro cruzando el primero en un ángulo de 15° , se dan uno o dos pases de rastro arado, rastra o cincel, dependiendo de la textura del suelo, y uno o dos pases de rastrillo.

Cuando el lote no requiere nivelación o se renueva una soca, la primera labor es la de descepada que en dos pases se realiza con una rastra, para seguir luego con la secuencia de labores subsolación, arada con cincel y rastrillada. Así el lote queda listo para la labor de surcada, que se hace con un implemento de tres (03) vertederas, acoplado a un tractor.

La caña de azúcar se multiplica al nivel de siembras comerciales vegetativamente. Para esa razón, se depositan en el fondo del surco trozos de tallo de 60 cm de largo, cada uno con dos a tres yemas sanas, que darán origen a las nuevas plantas, luego de taparlos manual o mecánicamente con una capa de suelo de 5 cm de espesor y aplicar el riego de germinación bien sea por surcos o por aspersión.

Los tallos de caña provienen de lotes cultivados para este fin se denominan semillero, donde se corta la caña en trozos y se conforman paquetes de 30 unidades, cuando el semillero tiene entre 7 y 9 meses de edad éstas pueden ser semilla o caña nueva. Para el establecimiento de los semilleros los paquetes de semilla se tratan en una cámara de agua caliente a 51° centígrados durante una hora para prevenir enfermedades virales como el raquitismo.⁶

La caña de azúcar una vez alcanzada su madures entre los 12 a 14 meses, se cosecha de manera mecánica con equipos especializados (Figura. 2), la caña cosechada se transfiere a vagones de auto volteo y es transportada a la fábrica por camiones.

⁶ RAMOS A. Aulio Alberto. *Proceso de Elaboración de Azúcar y Etanol de la Caña*. Santiago de Cali: Universidad del Valle, Unidad de Artes Gráficas de la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, 2019

Figura 2. Cosecha de caña de azúcar



Fuente: Bioenergy Zona Franca S.A.S

1.2.2 Recepción de Caña

La caña que llega al campo se le toma una muestra con el propósito de conocer sus características de calidad e impurezas, luego se pesa, para después definir si puede o no almacenar en los patios para descargarse sobre las mesas de caña.

Esta caña trae numerosas impurezas como lo son hojas, barro, piedra y otros elementos extraños; puesto que después de cortada se levanta con los equipos mecanizados los cuales recogen del piso todos los elementos extraños que se encuentren en contacto con ella.

Si se requiere, en las mesas de caña se hace un lavado con agua para eliminar las partículas de tierra. Este procedimiento también se puede elaborar en seco con

unos ventiladores, para que además de retirar gran parte de la hoja; posteriormente la caña sea transportada hacia el área de preparación.⁷

Figura 3. Báscula



Fuente: Bioenergy Zona Franca S.A.S

1.2.3 Preparación de Caña

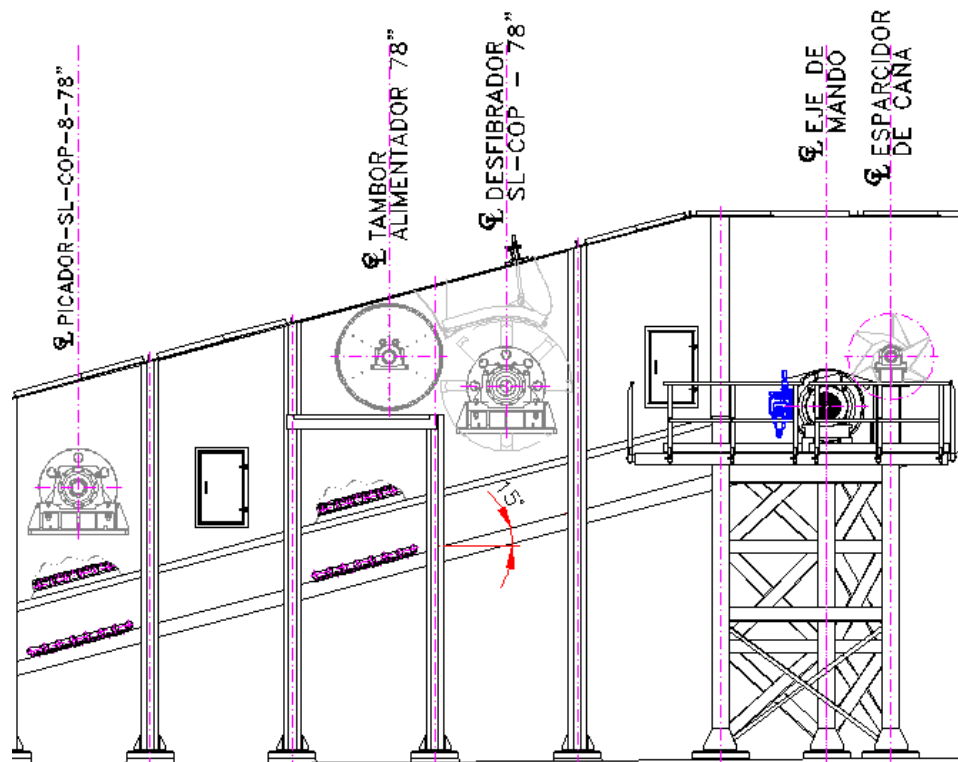
La caña es conducida al área de preparación a través del conductor metálico, este llevará la caña de corte mecanizado con una longitud de 25 centímetros cada una, pasándola primero por la picadora y posteriormente por la desfibradora. Cuando la caña sale de la desfibradora se obtiene una separación entre las fibras superior al 80% y se conoce como *Índice de Preparación o IP*. Después del proceso de desfibrado, la caña es entregada a un conductor de banda por medio de un esparcidor que se encarga de entregar una carga homogénea, sobre este conductor de banda se encuentra un electroimán gigante en la parte superior que cubre todo el ancho del conductor con el fin de retirar partículas metálicas que vengan dentro de la caña, partículas provenientes de los mismos equipos de cosecha como tornillos, cuchillas, laminas, etc. Ahora la caña está lista para pasar al tándem de molienda donde se extraerá la mayor cantidad de sacarosa posible. Una buena

⁷ IDEM. Pág.

preparación de la Caña facilita el proceso de extracción de jugo y permite lograr excelentes datos en la eficiencia de extracción.

Estos equipos de preparación de caña (Picadora y Desfibradora), se caracterizan por tener altas potencias, en la picadora encontramos una potencia instalada de 2000HP y en la desfibradora encontramos una potencia instalada de 3000HP.

Figura 4. Preparación de Caña



Fuente: BIOENERGY ZONA FRANCA S.A.S. Ilustración Inclinación máxima del conductor metálico. [Gráfico]. Manual de montaje, operación y mantenimiento – Picador, 2012.

Es menester en este punto mencionar que el tiempo detenido, o también conocido como las horas de paro no programadas causadas por estos dos equipos, fueron las que generaron la iniciativa de realizar esta monografía. Cabe destacar que estos dos equipos son de los más críticos que tiene el complejo industrial.

Figura 5. Área de preparación y extracción



Fuente: RIVAS, Diego. Área de preparación y extracción [fotografía]. En: Bioenergy Zona Franca S.A.S. Colombia. 30 de agosto de 2018.

1.2.4 Extracción de Jugo de la Caña

Después de que la caña es preparada, se transporta por medio de un conductor de banda hacia el tándem de molienda. Estos tándems se caracterizan por tener cinco o seis molinos, en este caso Bioenergy cuenta con un tándem de molienda de cinco equipos, cada molino cuenta con cuatro mazas o cilindros que permiten la extracción del jugo, estas mesas se conocen como: superior, cañera, bagacera y cuarta maza. Es una constante que el primer molino que se encuentra instalado en el área de extracción hace el 70% de la extracción de jugo y el 30% restante lo hacen los molinos posteriores.

Al área de extracción le ingresa caña y agua para generar dos productos, el jugo que se va para el área de procesos y el bagazo que se va para el área de cogeneración y sirve como combustible para la caldera.

Durante este proceso de extracción se tienen definidos unos indicadores (KPI) los cuales se deben cumplir a cabalidad para generar productos de buena calidad, entre

ellos un bagazo con una humedad que no supere el 50%, y el menor porcentaje de sacarosa posible y un jugo con la mayor cantidad porcentual de sacarosa extraída de la caña de azúcar el cual mide el porcentaje de sacarosa o grados brix.

Figura 6. Tándem de Molienda



Fuente: Ingenio Carmelita S.A.

1.2.5 Tratamiento de jugo

El jugo extraído por haberse obtenido por un contacto directo entre las masas del molino y la caña presenta un alto porcentaje de sólidos, generalmente bagazo, bagacillo y arena, que debe ser retirado antes de ser enviado a la clarificación. Por esta razón, el jugo sufre un tratamiento preliminar para la eliminación de las partículas grandes presentes.

Este material no deseable el cual no es azúcar se presenta en suspensión en el jugo y es bastante variable, en calidad y cantidad según el tipo de transporte de caña, la eficiencia del lavado y su preparación, también la cantidad de fibra de la caña juega un papel importante, encontrándose en el jugo cantidades de arena en un orden de 0,1 a 1%.⁸

⁸ IDEM. Pág.

En el proceso de tratamiento de jugo se tiene la etapa de calentamiento de jugo proveniente del molino hasta 105°C, para ser enviado a un proceso de decantación a través de un clarificador de jugo que tiene como objetivo separar las impurezas provenientes de la caña. La siguiente etapa correspondiente a la evaporación en la cual se evapora parte del agua proveniente en el jugo dándole las condiciones óptimas para la etapa de fermentación.

Figura 7. Purificación de Jugo



Fuente: RIVAS, Diego. Área de purificación de jugo [fotografía]. En: Bioenergy Zona Franca S.A.S. Colombia. 6 de octubre de 2018.

1.2.6 Fermentación

Esta etapa es correspondiente a un proceso biológico que inicia con la propagación de levadura que se alimenta con el jugo tratado que con el pasar de las horas (12 a 14 horas) aumenta su población y llega a su grado alcohólico máximo, necesario para lograr la conversión de los azúcares en alcohol.

Figura 8. Área de Fermentación



Fuente: RIVAS, Diego. Área de fermentación [fotografía]. En: Bioenergy Zona Franca S.A.S. Colombia. 19 de diciembre de 2019

1.2.7 Destilación

El producto obtenido de la fermentación es pasado por un sistema de centrifugado para separar el vino de la levadura. A su vez, este vino atraviesa un proceso de deshidratación con tamices moleculares que absorben el agua y se logra una concentración alcohólica de los 99,5 grados, obteniendo así, un alcohol carburante listo para realizar la mezcla con la gasolina.

Figura 9. Área de destilación



Fuente: RIVAS, Diego. Área de destilación [fotografía]. En: Bioenergy Zona Franca S.A.S. Colombia. 10 de diciembre de 2019

1.2.8 Cogeneración

La cogeneración es un procedimiento mediante el cual se produce de forma simultánea energía eléctrica, mecánica y térmica. El sector azucarero ha sido señalado por estudios nacionales e internacionales como aquel de mayor potencial de cogeneración en Colombia por su disponibilidad de biomasa, en especial el bagazo. Este subproducto, derivado de procesos de cosecha y molienda de caña, constituye la fuente primaria de energía para la cogeneración. Este proceso corresponde a la generación de energía como parte del proceso productivo, bien sea de azúcar o de etanol. Los ingenios desde sus inicios han utilizado el bagazo de la caña (combustible renovable) como combustible para alimentar sus calderas y utilizar el vapor como energía para el funcionamiento de sus procesos.

Figura 10. Área de cogeneración



Fuente: RIVAS, Diego. Área de cogeneración [fotografía]. En: Bioenergy Zona Franca S.A.S. Colombia. 16 de febrero de 2019

La cogeneración entonces utiliza la energía en forma de calor producida por el bagazo para generar vapor y luego mediante el uso de turbogeneradores, la energía eléctrica. Entonces el vapor de escape del turbogenerador va al proceso productivo mientras que la electricidad es mayoritariamente utilizada para su consumo propio

y una porción se vende a la red nacional. Parte del bagazo también se utiliza en la industria papelera como fuente de fibra, lo cual evita la tala de árboles.⁹

1.2.9 Compostaje

El compostaje aerobio consiste en la degradación y estabilización de la materia orgánica. Los residuos que resultan de la fabricación de azúcar y etanol como bagazo, cachaza (impurezas en jugo de caña), ceniza de bagazo, hoja de caña y vinaza (residuo que resulta de la destilación del alcohol), son utilizados en este proceso para la producción de compost.

Figura 11. Volteadora de Compost



⁹ **ASOCAÑA. Experiencia Proyecto Energía Renovable – Ingenio de Risaralda. [En línea] [Consultado:11 de junio de 2020]. Disponible en: (<https://www.ccc.org.co/bion/wp-content/uploads/pdf/27-abril-2018/EladioCastroIngenioRisaralda.pdf>)**

Fuente: MENART. Palm oil EFB compost & MENART self-propelled turner [captura de pantalla]. [Consultado: 17 de octubre de 2020]. Disponible en: www.menart.eu/maquinas-de-compostaje/volteadoras-autopropulsadas/?lang=es

A los residuos sólidos (cachaza, ceniza, hoja) se les realiza un pretratamiento para eliminar el exceso de humedad. Cuando las humedades son adecuadas se analiza la composición de cada uno de los residuos y se procede a la conformación de una pila (unidad de tratamiento), verificando a través de un balance de masa su relación C/N, C/S y humedades de ingreso. Una vez armada la pila se procede a mezclar y airear con el equipo BACKHUS creando las condiciones necesarias para el crecimiento de microorganismos los cuales descomponen los residuos hasta transformarlos en compostaje.

En la siguiente etapa, y dependiendo de la humedad de la pila se comienza con la adición de otro residuo en forma líquida llamado vinaza, el cual se va incorporando en las pilas por medio de volteos diarios, en donde se controla la temperatura y la humedad hasta alcanzar la proporción de vinaza requerida para la producción de compost de excelente calidad.

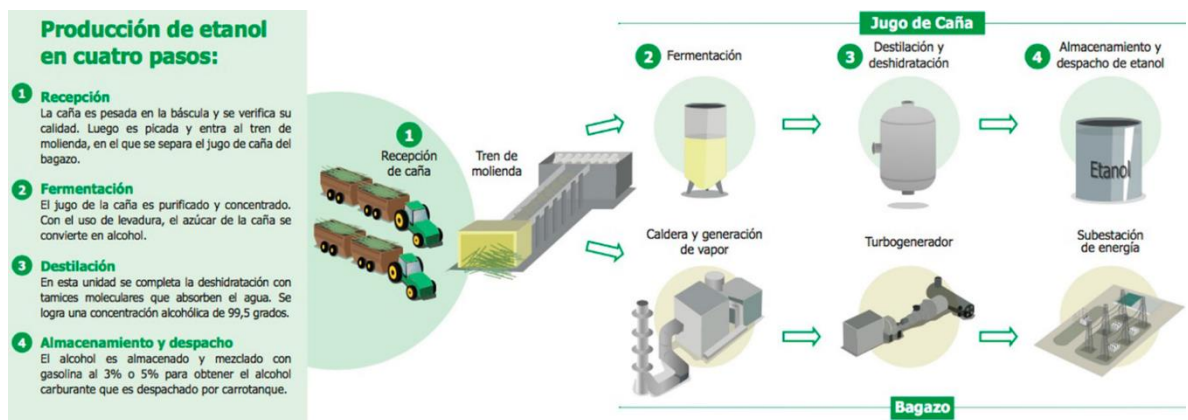
1.3 Ilustración de Proceso Industrial

Figura 12. Planta Industrial Bioenergy



Fuente: Bioenergy. Nuestro proceso [figura]. [Consultado: 17 de octubre de 2020]. Disponible en: <http://www.bioenergy.com.co/SitePages/UnidadNegocio.aspx#NuestroPro>

Figura 13. Producción de Etanol en cuatro pasos



Fuente: Bioenergy. Nuestro proceso [figura]. [Consultado: 17 de octubre de 2020]. Disponible en: <http://www.bioenergy.com.co/SitePages/UnidadNegocio.aspx#NuestroPro>

2. PARADAS NO PROGRAMADAS EN EL ÁREA DE PREPARACIÓN

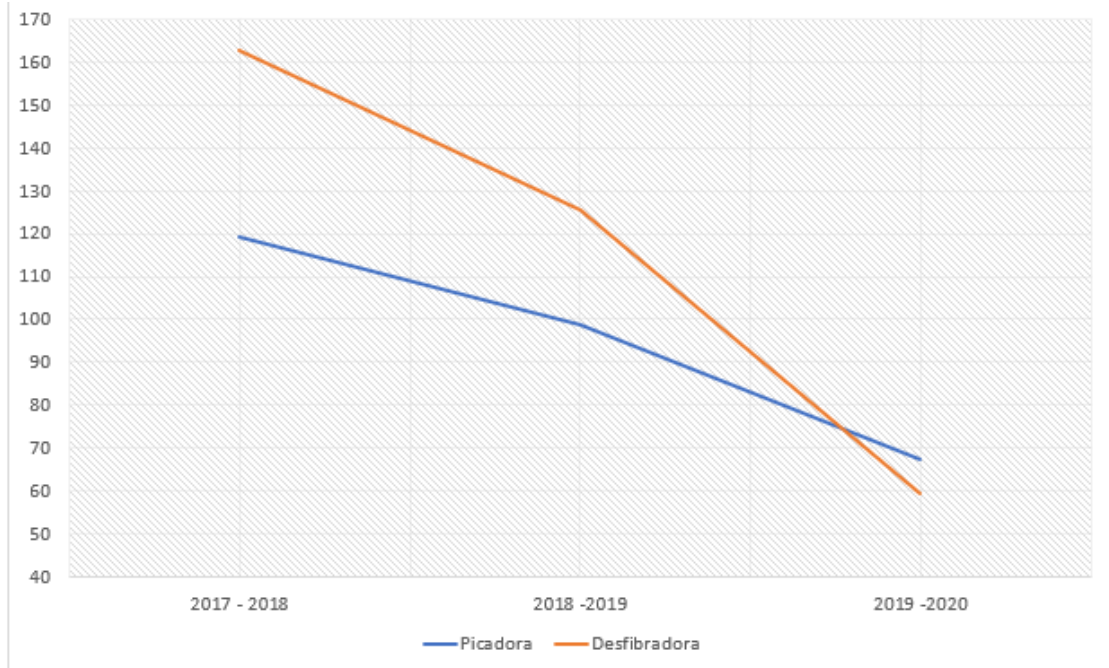
En el presente estudio se analizarán dos equipos de configuraciones similares, diferenciados por la ubicación en el conductor metálico y los elementos para la preparación de la caña; estamos hablando de la picadora y desfibradora de caña, siendo estos dos equipos los responsables de ocasionar prolongadas paradas de producción por síntomas y fallas presentadas, originadas por: altas vibraciones, daños prematuros en rodamientos, soltura de cuchillas y martillos, fallas por el sistema de lubricación y altas temperaturas de trabajo.

Durante los tres años de producción de la planta, las fallas en la picadora y desfibradora se han vuelto repetitivas por factores atribuibles en algunos casos en el diseño incorrecto para su propósito de funcionamiento, los deficientes planes de mantenimiento o por la inadecuada operación del equipo.

En la actualidad el área de preparación y extracción de la compañía Bioenergy presenta altos tiempos de paradas de planta por fallas funcionales en los equipos de preparación y extracción. Estos paros impactan en los costos de la compañía por temas de mantenimientos correctivos y lo que estos representan. Adicionalmente impactan en el tiempo de zafra, haciendo de esta más larga conllevando a costos por más días de operación: \$250'000.000 / Día.

2.1 Tiempos Perdidos de Picadora y Desfibradora

Figura 14. Horas de paro no programado de picadora y desfibradora



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Horas de paros no programados de picadora y desfibradora

	Picadora	Desfibradora
2017 - 2018	119,26	162,83
2018 - 2019	98,51	125,44
2019 - 2020	67,39	59,18

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el gráfico anterior la picadora en el último periodo productivo tuvo cerca de 70 horas de paro no programadas, la desfibradora tuvo cerca de 60 horas de paro no programadas, lo que da un total de 130 horas que generaron un lucro cesante de \$1.354'000.000 millones de pesos

aproximadamente. Hay que tener en cuenta que un día de operación del complejo industrial tiene un valor de \$250'000.000 Millones de pesos diarios.

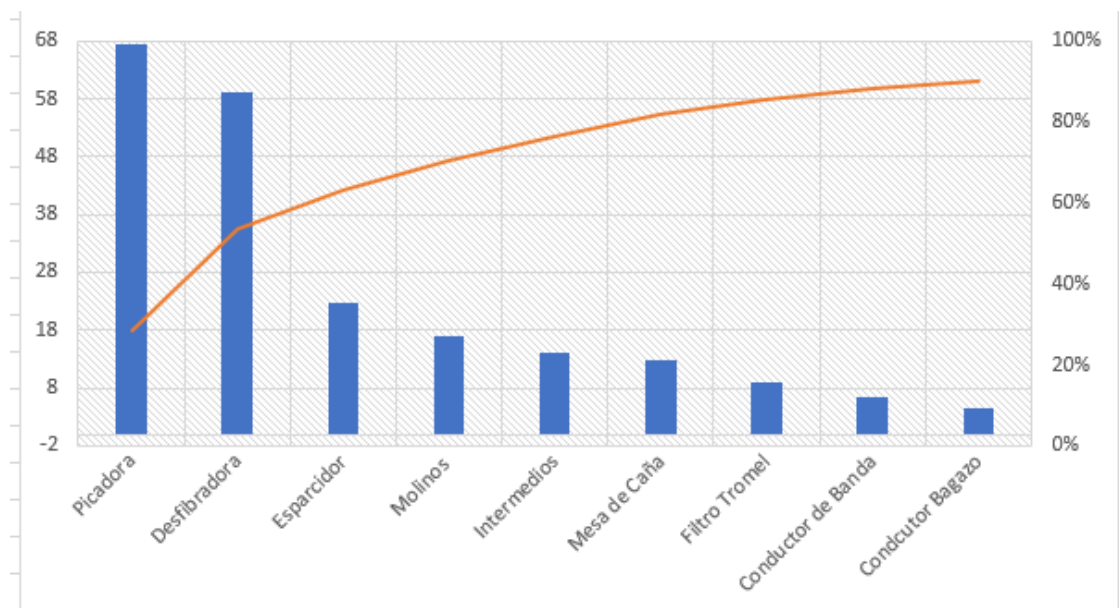
Cabe destacar que los 1354 millones de pesos perdidos son sólo del último año de operación, que corresponde al periodo productivo del 2019 – 2020.

2.2 Pareto de Tiempos Perdidos en el área de molienda

Con los datos recopilados de los tiempos perdidos en la última Zafra, es decir, en el período productivo 2019- 2020 se realizó un diagrama de Pareto para facilitar el análisis y la toma de decisiones.

En la siguiente figura podremos observar el análisis de Pareto donde sin duda alguna la picadora y la desfibradora fueron las protagonistas de las paradas no programadas y que esto es suficiente argumento para tomar la determinación realizar esta monografía.

Figura 15. Pareto de horas de paro no programadas



Fuente: Elaboración propia

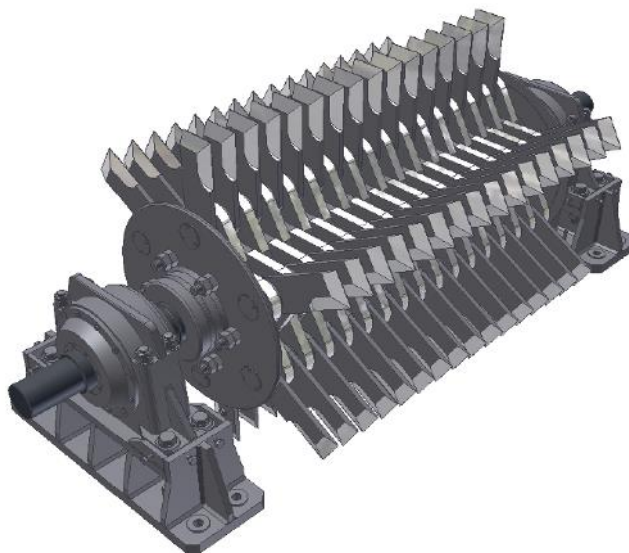
2.3 Características de los equipos

2.3.1 Picadora

La picadora es un equipo robusto utilizado en la industria de la caña de azúcar en el área de preparación, antes de la molienda. Esta tiene como objetivo picar la caña proveniente del campo y entregar producto un poco procesado a la desfibradora. Estos dos equipos (Picadora y Desfibradora) son los encargados de abrir las celdas de la caña en un valor superior al 80%, esta apertura de celdas en la caña garantizará una óptima extracción del jugo de la caña de azúcar.

Bioenergy Zona Franca cuenta con un picador referencia SL COP 8 con una potencia instalada de 2000 HP, velocidad de operación de 780 rpm, un conjunto de 87 cuchillas con un peso aproximado de 22 kilogramos cada una, y con capacidad de procesar hasta 350 toneladas de caña por hora.

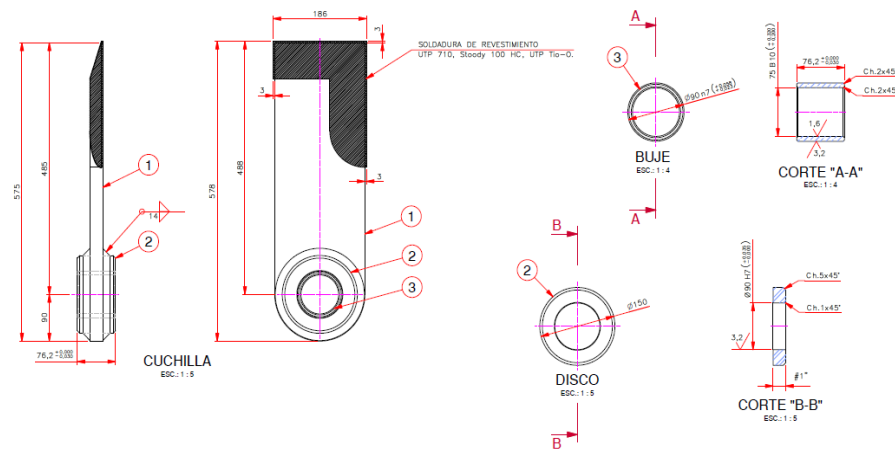
Figura 16. Picador de Caña SL- COP-8-78”



Fuente: BIOENERGY ZONA FRANCA S.A.S. Ilustración del rotor. [Ilustración]. Manual de montaje, operación y mantenimiento – Picador, 2012.

La picadora está compuesta por un rotor, el cual posee un eje principal, y 6 ejes de oscilación donde van instaladas las 87 cuchillas cuidadosamente balanceadas para evitar vibraciones excesivas en el equipo. Las 87 cuchillas cuentan con un procedimiento de soldadura especial a base de carburo de tungsteno que genera recubrimientos duros (blindado) que soporta la abrasión y las hace resistente a los impactos.

Figura 17. Detalle cuchilla picadora



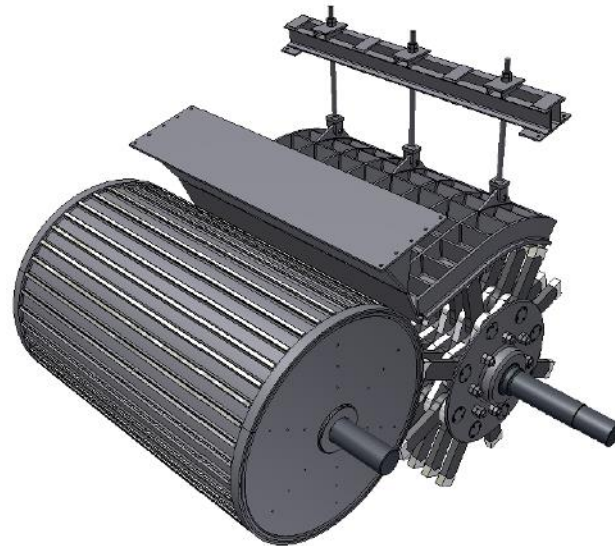
Fuente: Bioenergy Zona Franca S.A.S

2.3.2 Desfibradora

La desfibradora de caña de Bioenergy Zona Franca S.A.S de referencia SL-COP-10 es un equipo robusto con capacidad para procesar hasta 350 toneladas de caña por hora, tiene una potencia instalada de 3000 HP, su rotación es a una velocidad de 1024 rpm y cuenta con un eje principal y ocho ejes oscilantes los cuales soportan los 148 martillos. Cada martillo tiene en peso aproximado de 33 kilogramos y han sido instalados con un procedimiento de soldadura especial para poder soportar la abrasión y los impactos de la caña. El trabajo de la picadora sumado al trabajo de la desfibradora entrega un excelente resultado en cuanto a la preparación de la caña

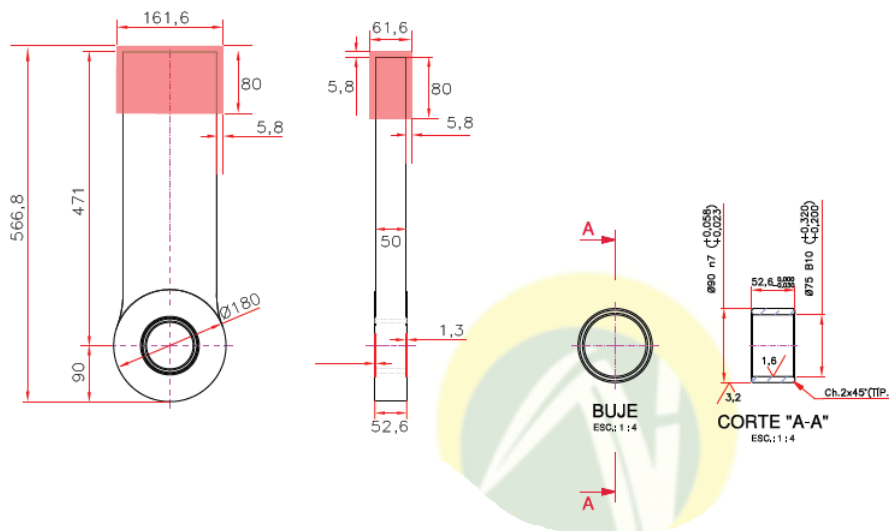
de azúcar antes de ser molida. Una óptima preparación garantiza una buena extracción de jugo y por ende una excelente extracción de sacarosa.

Figura 18. Conjunto desfibrador de Caña SL-COP-10-78”



Fuente: BIOENERGY ZONA FRANCA S.A.S. Ilustración del conjunto Desfibrador SL-COP-10. [Ilustración]. Manual de montaje, operación y mantenimiento de Desfibradora, 2012.

Figura 19. Detalle martillos de la desfibradora



Fuente: Bioenergy Zona Franca S.A.S

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de plan de mantenimiento basado en MCC para la picadora y desfibradora de área de preparación de caña de la planta integrada de producción de Etanol carburante, Bioenergy Zona Franca S.A.S, con el fin de buscar la disminución de las pérdidas de producción por baja eficiencia de extracción.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los sistemas y subsistemas de la picadora y la desfibradora de caña de Bioenergy Zona Franca S.A.S, equipos que se les va a aplicar la metodología MCC.
- Definir las funciones primarias y secundarias de la picadora y la desfibradora en cada uno de los sistemas del conjunto.
- Realizar un análisis de modo de falla, efectos y consecuencias asociados a los sistemas a aplicar la metodología.
- Definir las tareas de mantenimiento para aumentar la confiabilidad operativa y disponibilidad de la picadora y la desfibradora de caña.

4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Sin duda alguna, el impacto económico es el principal motivo para la realización del modelo de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. La estrategia de mantenimiento propuesta busca aumentar la confiabilidad y disponibilidad operativa de la picadora y la desfibradora de caña de Bioenergy Zona Franca S.A.S. Sumado a esto, también motiva el realizar las actividades de preservación de funciones a través de un plan de mantenimiento detallado bajo procedimientos claros, que establezcan el modo de actuar ante cada uno de los sistemas y subsistemas del activo, con el propósito de que cada componente del activo cumpla su función por un periodo de tiempo más extenso, en este caso, durante toda la zafra.

El presente estudio pretende establecer, mediante el MCC, un modelo de plan de mantenimiento que ayude a reducir la indisponibilidad de la picadora y la desfibradora de caña, métodos rutinarios y preventivos, que permita al equipo de mantenimiento y operación actuar ante las posibles fallas potenciales que puedan presentarse, optimizando los métodos tradicionales de mantenimiento que se han estado realizando.

Durante el periodo productivo de la zafra 2018 – 2019, la picadora de caña estuvo inactiva en casi todo el periodo productivo a causa del daño en un rodamiento en el lado libre y el consecuente daño del eje. El equipo no se pudo habilitar porque no se contaba con un eje de repuesto en almacén y el actual había sufrido daños irreparables. Aunque el propósito del presente estudio es preservar las funciones de la picadora y la desfibradora de caña, la gestión de inventarios también es un actor importante que será analizado en el presente estudio debido al inconveniente anteriormente mencionado. La picadora de caña tuvo un tiempo perdido de un poco más de 30 horas, posterior al daño, finalmente se sacó de línea para operar sin picadora, tiempo que muy probablemente se pudo haber evitado implementando

tácticas que permitan estudiar el comportamiento operativo del picador de forma oportuna, sin llegar a paradas no programadas como las actuales. Esta operación sin picadora sacrifica en un 3% la eficiencia de extracción, y esta ineficiencia se resume en menos litros de etanol por tonelada de caña. Además de la sobrecarga que ocasiona en la desfibradora.

Durante el periodo productivo de la zafra 2017 – 2018 la desfibradora de caña estuvo inactiva todo el periodo productivo a causa de vibraciones excesivas (16 mm/s, cuando su operación no debe superar los 6mm/s) Estas vibraciones perjudicaron rodamientos, chumaceras y otros sistemas del equipo. Una operación en la industria de la caña sin este equipo sería impensable; sin embargo, con algunas modificaciones en la picadora se pudo sacar adelante la zafra, sacrificando un 6% de la eficiencia de extracción.

La baja confiabilidad del proceso de preparación de caña, la sobrecarga en la desfibradora, una extracción poco eficiente, material de gran tamaño en los equipos de bombeo, entre otros factores, son consecuencia de operar la planta sin el picador de caña. Este activo es fundamental para operar todos los demás activos involucrados en el área de preparación y extracción, dentro de sus parámetros para lo que fueron diseñados.

5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DEL MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD “MCC”

5.1 Marco Teórico

De acuerdo con la SAE JA1012:

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) fue documentado por primera vez en un reporte escrito por F.S. Nowlan y H.F. Heap y publicado por el Departamento de Defensa de U.S. en 1978. El mismo describió los procesos innovadores y actuales, para ese entonces, usados para desarrollar programas de mantenimiento para aviones comerciales. Desde entonces, el proceso MCC ha sido ampliamente utilizado por otras industrias, y desarrollado y mejorado ampliamente.¹⁰

Según Moubray¹¹, “El mantenimiento centrado en confiabilidad es un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios requieren que haga en su contexto operacional actual”. En ese sentido, lo que se busca es establecer un plan operativo táctico que reduzca los costos sobregirados que traen como resultado el detenimiento no programado de las maquinarias.

Ahora bien, antes de iniciar propiamente con el análisis del mantenimiento de los activos físicos, se pretende implementar la metodología a todo el conjunto del picador de caña de Bioenergy Zona Franca S.A.S, de forma que se puedan asignar

¹⁰ SOCIEDAD DE INGENIEROS DE AUTOMOCIÓN - SAE. *Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)*. JA1012. 2002-01.

¹¹ MOUBRAY, John. *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. Edición en español. Leicester: Aladon Ltd, 2004. 7 p.

los medios financieros para sacar el mayor provecho, optimizando el recurso humano, los repuestos mínimos requeridos en el almacén de materiales, la planificación de tareas específicas, entre otros. Las decisiones por tomar de acuerdo con la estrategia de mantenimiento estarán dadas por las consecuencias de las fallas y el recurso asignado. Para conocer los modos de falla y seleccionar las actividades o tareas, el MCC utiliza dos metodologías muy acertadas: El Análisis de los Modos y Efectos de Fallas (AMEF) y el Árbol Lógico de Decisión (ALD).

5.2 Marco Conceptual

Como derrotero, el objetivo de toda empresa es ser productiva, rentable, sostenible y sustentable; logrando u obteniendo el menor costo posible en la producción, sacando el mayor provecho de los equipos o máquinas. Pero para conseguir esto, se requiere necesariamente que los activos físicos no fallen a consecuencia de paradas de producción no programadas; es aquí, donde toma importancia el rol del mantenimiento, cuyo objetivo es realizar la manutención de los activos para que estos conserven su función dentro de las ventanas operacionales esperadas. Pero, no es sólo realizar mantenimientos, sino hacerlo bajo una estructura organizada y detallada llamada plan de mantenimiento, para que los funcionarios sepan qué es exactamente lo que deben hacer, lo ejecuten en el tiempo planeado y lo lleven a cabo de manera correcta, eficiente y eficazmente para no llegar a reprocesos de manutención, ya que estos derivarían en costos adicionales para la empresa productiva.

En el mundo de mantenimiento de hoy en día, se deben de tener en cuenta varios factores, como lo son: el mercado altamente competitivo, el dinamismo en entornos comerciales, el medio ambiente, la seguridad de la empresa y las personas, mejores precios y servicios, además de la innovación de sus productos. El impacto de los activos que conllevan la actividad industrial de las empresas se enmarca por la degradación de los equipos, que puede ser desgaste natural o por factores humanos

o de diseño, causando menor confiabilidad y disponibilidad, especialmente a los equipos de hoy que son de mayor complejidad y tecnología en diseño y fabricación.

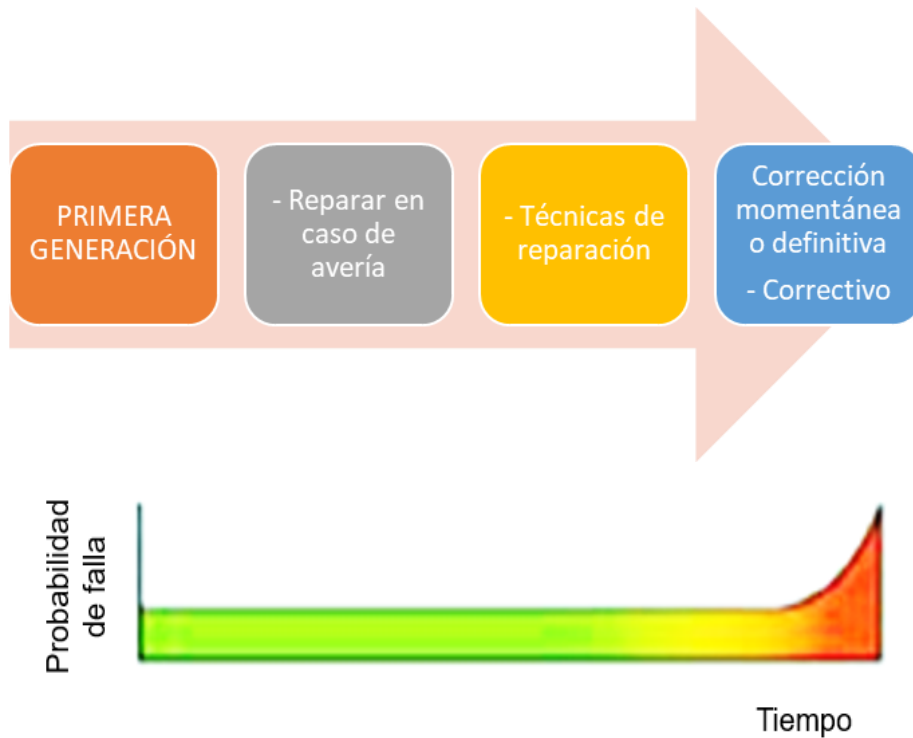
Las exigencias en las empresas requieren, necesariamente para ser costo-efectivas, mayor disponibilidad, durabilidad de los equipos, facilidad para la realización del mantenimiento mediante instructivos, entrenamiento para el personal competente, protección al medio ambiente, seguridad y salud en el trabajo, entre otros.

5.3 Evolución de las expectativas sobre mantenimiento

5.3.1 Primera Generación

Entre los años 1940-1950, los equipos productivos de una empresa eran sobredimensionados y fiables, el mantenimiento no era tan relevante y no se consideraba una prioridad; el personal que realizaba el mantenimiento no requería de mucha experiencia, solo bastaba con que tuviera conocimientos básicos para realizar las labores, solo se trataba de realizar reparaciones en caso de fallas en los equipos. En otras palabras, sólo se realizaba mantenimientos correctivos no planeados.

Figura 20. Primera generación del mantenimiento



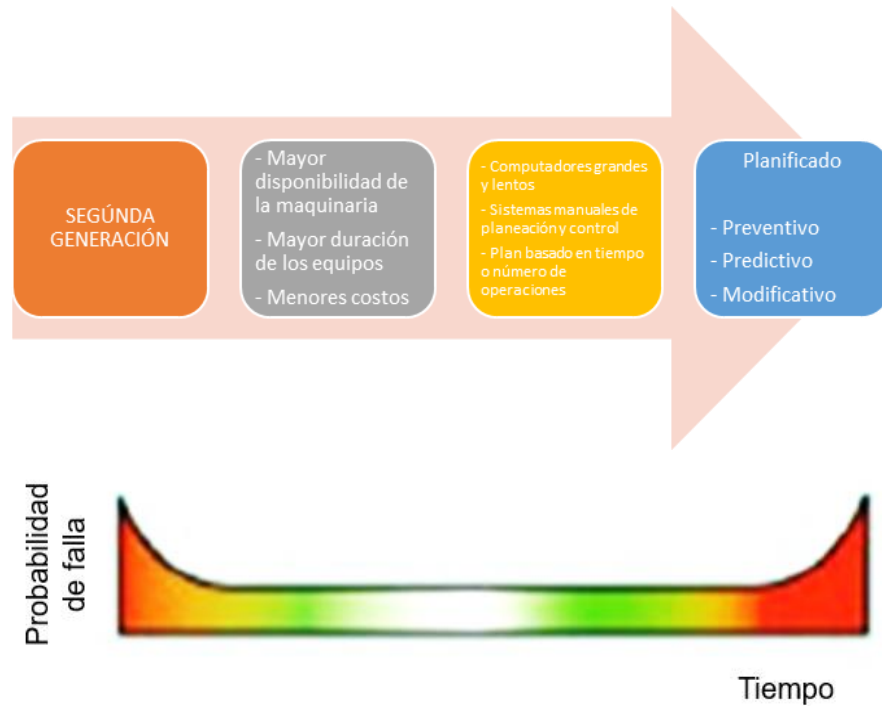
Fuente: Adaptado de MUBRAY, John, RCM II 1997.

5.3.2 Segunda Generación

Entre los años 1960 y a mediados de 1980, la dependencia por las máquinas cada vez era mayor, ya de ellas dependía directamente el éxito de la producción a grandes escalas dentro del menor tiempo posible. Se requería mayor disponibilidad de la maquinaria y más duración en los equipos. Esto se lograba con la implementación de sistemas de información a través de equipos de cómputo y sistemas manuales para la planeación y el control de la empresa con respecto al comportamiento de sus activos. En la segunda generación del mantenimiento, entró en vigor el mantenimiento planificado de las actividades por medio del mantenimiento preventivo, un concepto de realización de mantenimientos mayores y cambio de partes o componentes en intervalos de tiempo definidos. Se determinó que la edad de los equipos y la probabilidad de falla estaban estrechamente

relacionadas y la realización de proyectos por medio de controles de cambios para mejorar aún más la producción y ser competitivos a través del tiempo.

Figura 21. Segunda generación del mantenimiento



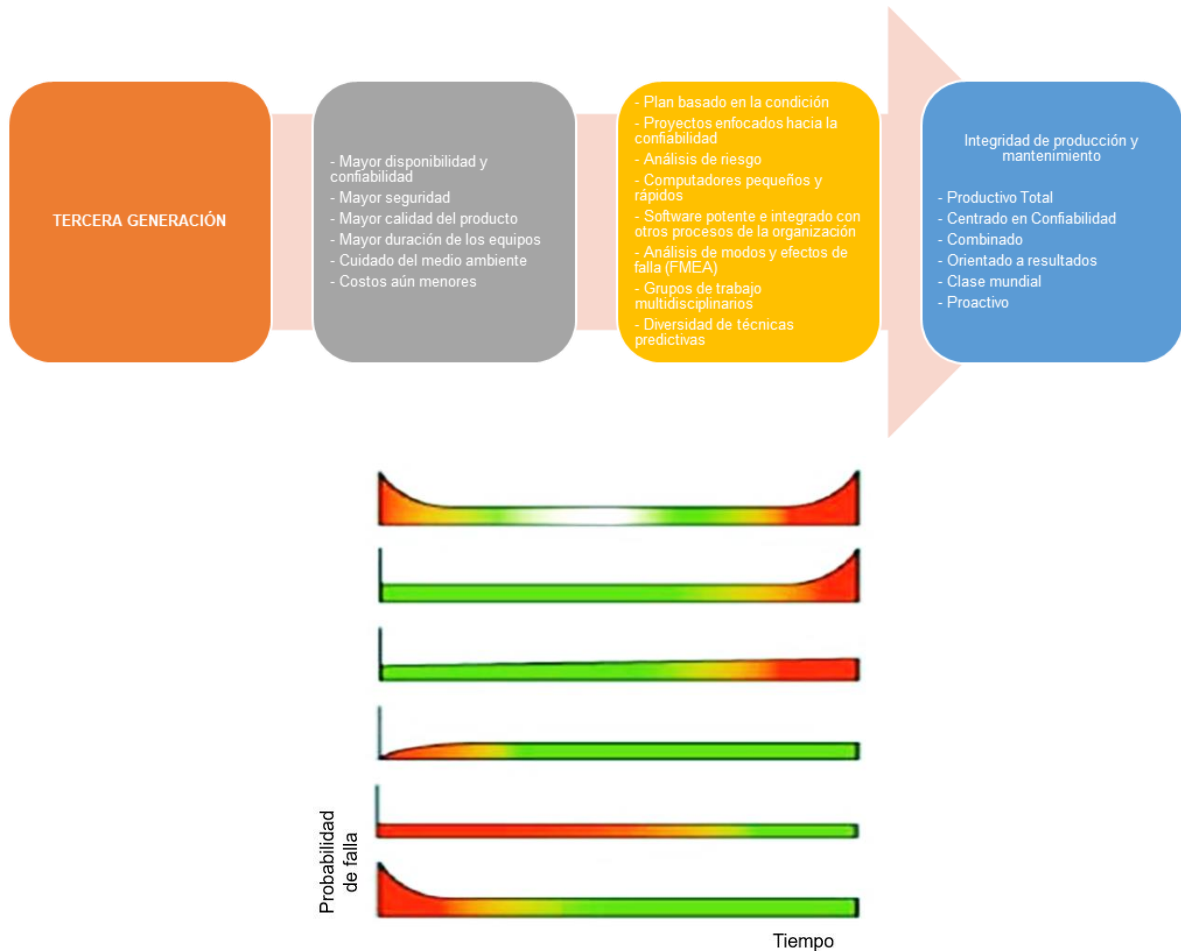
Fuente: Adaptado de MUBRAY, John, RCM II 1997.

5.3.3 Tercera Generación

A finales de 1980 y el año 2000, entró en rigor la preocupación por el medio ambiente, obligando a muchas empresas, incluso por encima de su producción, a adecuar su proceso productivo con el menor impacto posible al medio ambiente dentro de las legislaciones de cada nación. Los conceptos de confiabilidad, seguridad, calidad y duración de los equipos por mayor tiempo de producción a costos aún menores. Planes basados en condición, proyectos enfocados a la confiabilidad soportados con los análisis de riesgo que se puedan contemplar durante la ejecución de proyectos de inversión dirigidos por grupos de trabajo multidisciplinarios para lograr el desarrollo de diversas técnicas predictivas y la

implementación de los planes de mantenimiento estructurados. La tercera generación por primera vez pretende la integración de producción y mantenimiento.

Figura 22. Tercera generación del mantenimiento



Fuente: Adaptado de MUBRAY, John, RCM II, 1997.

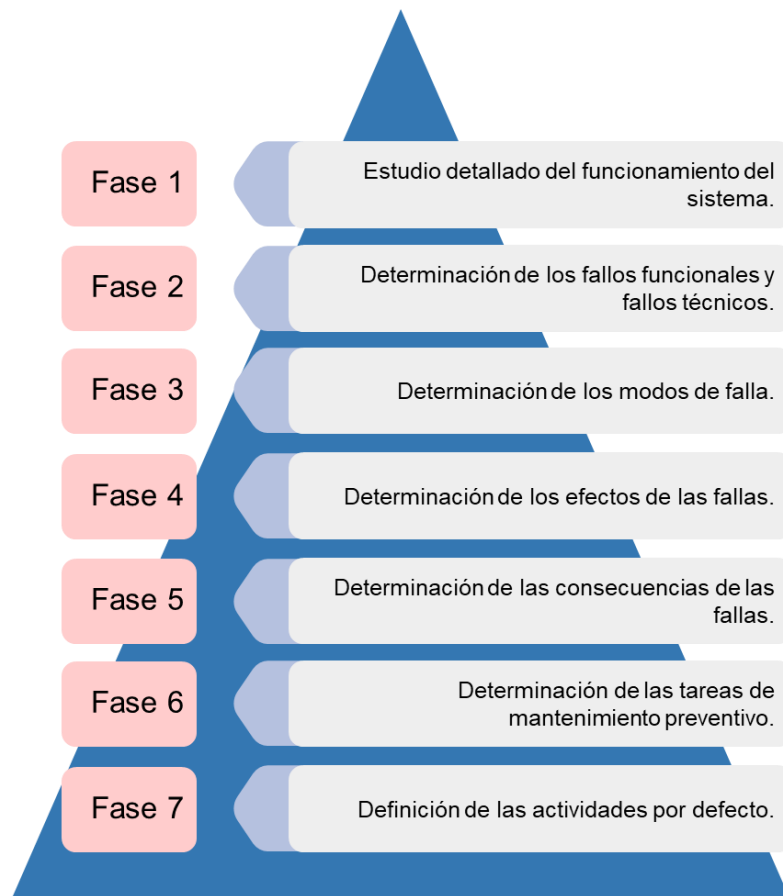
Con el pasar del tiempo, así como los sorprendentes avances tecnológicos, a su vez, la evolución del mantenimiento ha presentado cambios exponenciales, desde el mantenimiento reactivo y planificado hasta el mantenimiento proactivo. Ahora en el nuevo mundo del mantenimiento hablamos de la cuarta generación del mantenimiento que tiene que ver con la innovación, además un mantenimiento táctico y estratégico, cumpliendo con todas las normas vigentes relacionadas con el mundo, donde cada persona que haga parte de la organización sea hábil y

competente en el desarrollo de sus funciones, donde se invierten recursos para la eliminación de defectos y se realice una buena gestión activos.

5.4 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)

El mantenimiento centrado en confiabilidad MCC es una de las formas más eficientes de abordar el mantenimiento en una compañía y se basa en la ejecución de las siguientes fases:

Figura 23. Fases del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad MCC.



Fuente: Elaboración propia con información tomada de SAE-JA1012, 2002.

La implementación del MMC requiere que la compañía disponga de capital humano y asignación de recursos, sin embargo, aunque es una metodología con alto grado

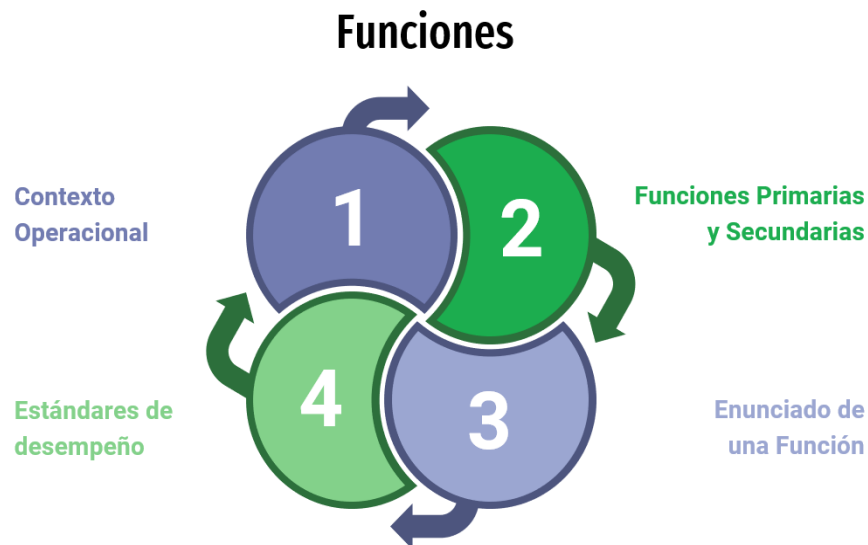
de complejidad y que indudablemente representa un esfuerzo colectivo de la gente, los resultados que puede dejar para la organización son muy buenos y justifican su implementación.

El MMC se enfoca en analizar fallos potenciales que pueden presentar los equipos, categorizándolos y permitiendo la fijación de medidas preventivas que garanticen su funcionalidad.

5.4.1 Funciones

Para la elaboración de un Mantenimiento Centrado en Confiabilidad según la SAE JA1011, comienza por preguntarse ¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente (funciones)? Donde se discuten los cuatro conceptos clave referentes a las funciones de los activos.

Figura 24. Conceptos clave de las funciones de los activos.

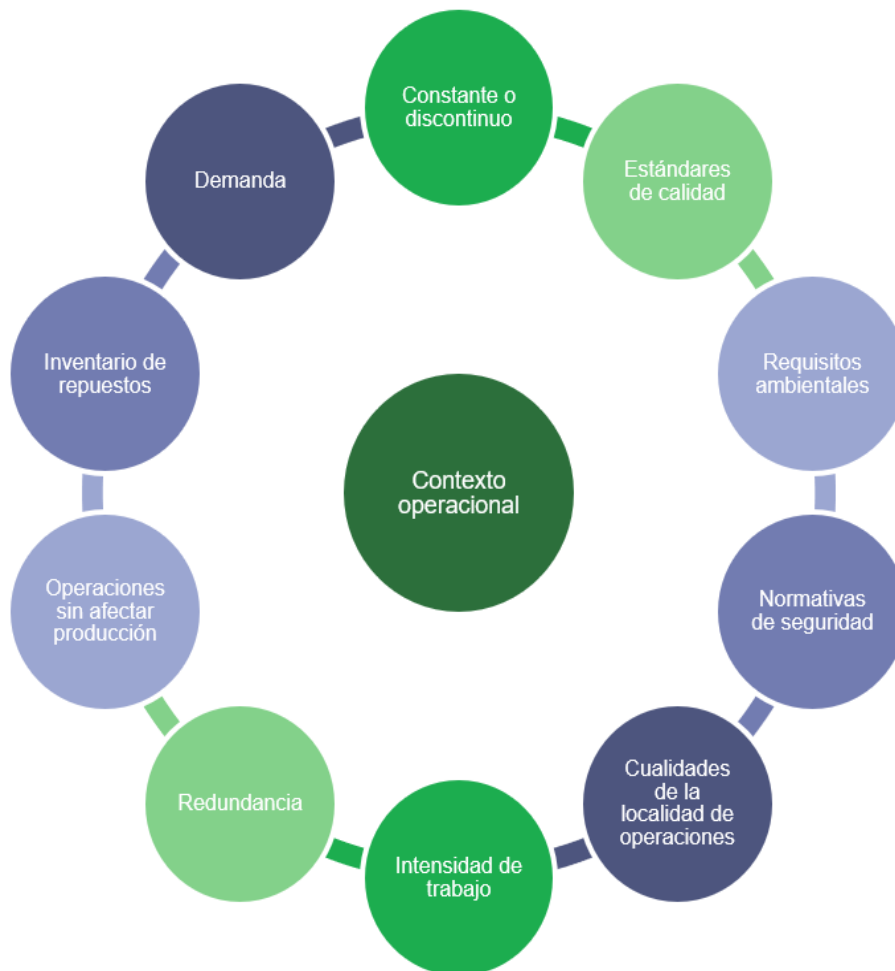


Fuente: Elaboración propia con información tomada de SAE-JA1012, 2002.

5.4.1.1 Contexto Operacional

El contexto operacional de un activo físico define una breve descripción de cómo de usará el activo, donde y los aspectos de desempeño. En el caso de sistemas de gran tamaño y complejos, es conveniente estructurar el contexto operacional de forma jerárquica.

Figura 25. Aspectos específicos del contexto operacional



Fuente: Elaboración propia con información tomada de SAE-JA1012, 2002.

5.4.1.2 Lista de funciones

5.4.1.2.1 Funciones Primarias y Secundarias

El MCC tiene como objetivo desarrollar un conjunto de políticas con el fin de preservar las funciones de los activos conforme a los estándares de desempeño deseados por el usuario. El proceso comienza definiendo todas las funciones de los activos en su contexto operacional.

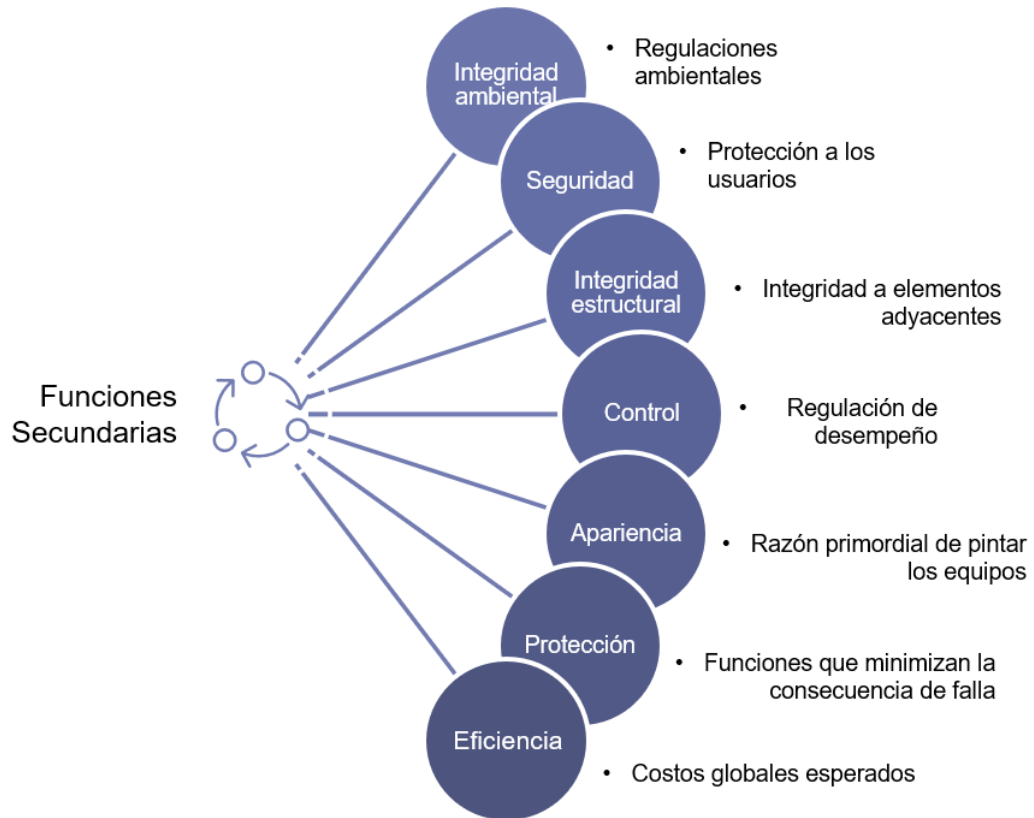
5.4.1.2.1.1 Funciones Primarias

Razón por la cual se adquiere el activo físico o sistema para cumplir con una función o funciones específicas que se espera que se hagan.

5.4.1.2.1.2 Funciones Secundarias

Además de las funciones primarias, se espera que los activos desarrollen otras funciones; éstas son llamadas funciones secundarias, son menos obvias que las funciones primarias, pero son igual e incluso más importantes que las funciones primarias; por lo que deben ser claramente identificadas y no deben ser descuidadas, Las funciones secundarias pueden ser:

Figura 26. Aspectos de las funciones secundarias



Fuente: Elaboración propia con información tomada de SAE-JA1012, 2002.

5.4.1.3 Estándares de desempeño

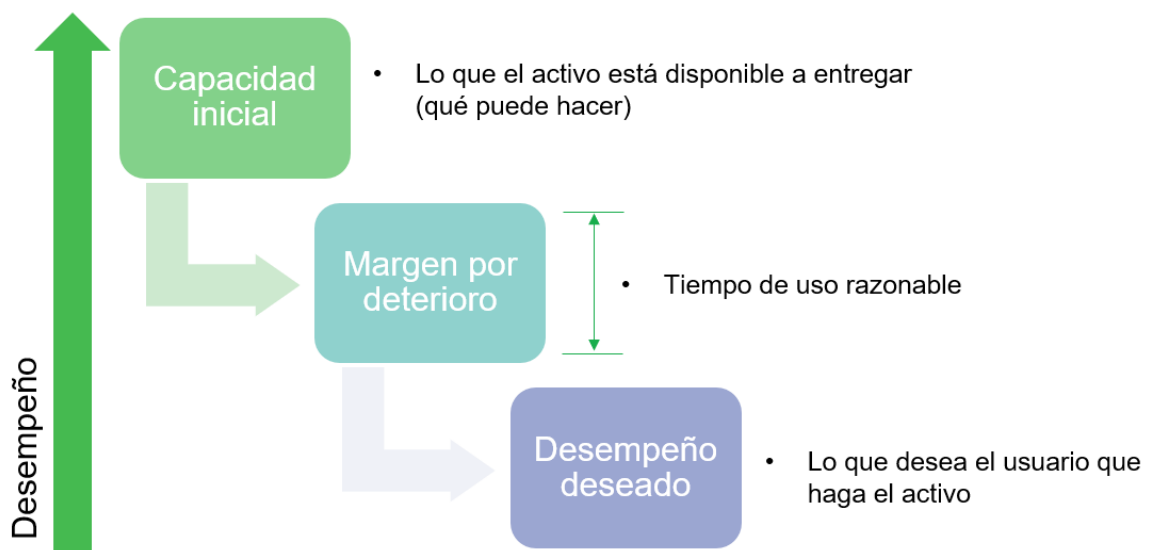
Los estándares de desempeño de las funciones enunciadas deben contar con un nivel de desempeño deseado por el usuario. Cualquier sistema o activo expuesto al ambiente se deteriorará a menos que se tomen medidas para tratar las causas del deterioro.

Cuando el desempeño de un activo cae por debajo del valor mínimo aceptable, es porque el activo ha fallado; de lo contrario, si el activo se mantiene por encima de los parámetros de operación, es satisfactorio para el usuario.

El objetivo del mantenimiento es garantizar que los activos funcionen por encima de los parámetros de operación o nivel mínimo aceptable. Sin embargo, el deterioro es inevitable, por lo cual debe estar permitido en la organización, lo que da lugar que cuando el activo entra en servicio debe funcionar con el estándar de desempeño aceptable por el usuario; lo que significa que el desempeño se puede definir de dos maneras:

- a. Desempeño deseado
- b. Capacidad inicial

Figura 27. Permisividad del deterioro



Fuente: Elaboración propia con información tomada de SAE-JA1012, 2002.

El margen de deterioro en los activos debe ser adecuado y razonable, de lo contrario el sistema estaría sobre dimensionado y pudiera ser demasiado costoso, en la realidad, en la mayoría de los componentes el margen de deterioro es adecuado por lo que normalmente se desarrollan los planes de mantenimiento.

Los estándares de desempeño en lo posible se deben cuantificar, ya que son más claros y precisos que los cualitativos. Sólo se utilizan estándares cualitativos en funciones relativas a la apariencia: éstos deben ser entendibles y aceptados por el usuario.

5.4.2 Fallas funcionales

Corresponde a las deficiencias que se presentan en un equipo o sistema y que impiden la realización de su función principal, dejándolo inactivo o por fuera del proceso. Es un tipo de falla sumamente importante, dado que tiende a generar una “parada de planta”, es decir, un detenimiento parcial del proceso productivo de la compañía.

De acuerdo con la norma SAE JA1012¹², “se deben definir todos los estados de falla asociados con cada función”, es decir que se debe prever de qué maneras podría fallar el equipo al cumplir sus funciones.

5.4.2.1 Falla total y parcial

Una falla total como su nombre lo indica es aquella donde la función del equipo se pierde totalmente. Por otro lado, cuando se presenta una falla parcial, el equipo tendrá parte de su funcionamiento, no obstante, será incapaz de realizar sus tareas habituales correctamente quedando muy por debajo de su rendimiento normal.

5.4.2.2 Límites superiores e inferiores

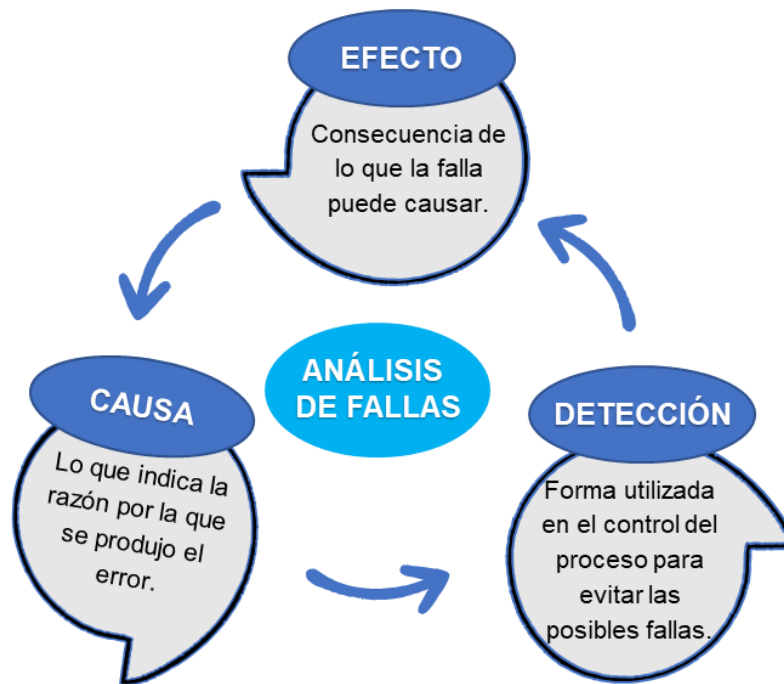
¹² SAE JA1012 Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). 2002. P. 14

Todo equipo debe tener unos estándares de desempeño, los cuales se establecen dentro de un rango delimitado los límites superior e inferior. Cuando el equipo opera con resultados dentro de los límites superior e inferior previamente definidos, indica que su operación está dentro del intervalo de confianza y por tanto su funcionamiento es normal. De la misma manera, cuando el equipo opere por debajo del límite inferior o por encima del límite superior, será un indicador de que presenta una falla.

Es necesario definir adecuadamente los rangos de límite superior e inferior en que opera el equipo y dado que las consecuencias generadas por uno u otro son tan diferentes, es preciso documentar procedimientos de atención del fallo para ambos casos por separado.

5.4.2.3 Análisis de Fallas

Figura 28. Aspectos relevantes del análisis de fallas.



Fuente: Elaboración propia, con información tomada de SAE-JA1012, 2002.

5.4.3 Modos de falla

Los modos de falla en MMC corresponden a las causas que ocasionan que un equipo falle, es decir, los eventos responsables de la condición de la falla, pero también pueden ser las probables y diversas formas en que un equipo podría fallar.

La SAE JA1012¹³ determina que se deben seguir los siguientes pasos para tratar los modos de falla: a) identificar los modos de falla, b) establecer qué se entiende por “probable”, c) determinar los niveles de causalidad, d) establecer las fuentes de información y e) comprobar los tipos de modos de falla.

5.4.3.1 Identificado los modos de falla

Consiste en realizar una evaluación y análisis del equipo, determinando cuáles son los posibles eventos que puedan generar fallas en su funcionamiento.

Entre los modos de falla más comunes que se presentan en los equipos están:

- Los causados por dificultades o errores durante el montaje.
- Los generados por mala praxis en la forma de operar el equipo
- Los motivados como resultado de faltas durante la realización de los mantenimientos que se efectúan en el equipo.
- Los originados por defectos en el diseño.
- Los producidos por la interacción del equipo con los factores ambientales.
- Los que se dan a raíz de problemas con la calidad de los suministros que requiere el equipo, por la falta de estos o por retardo en suplirlos.

¹³ *IDEM*. P. 14

- Los que se deben a causas relacionadas con los componentes internos del equipo.
- Los suscitados por la relación del equipo con otros equipos y que se conocen como fallos consecuenciales.

5.4.3.2 Estableciendo cuál es el significado de “Probable”

La palabra probable indica que es bastante posible la ocurrencia de un suceso. Aplicado a MMC se trata de indicar cuáles modos de falla tienen una verdadera probabilidad de ocurrencia.

5.4.3.3 Niveles de causalidad

Los modos de falla se deben describir o presentar en diferentes niveles, con el propósito de ir determinando la falla raíz, partiendo así de lo general a lo particular.

Al elaborar los niveles de causalidad es importante procurar ser concreto y extenderse demasiado en detalles innecesarios y que, en vez de favorecer el proceso de análisis de fallas, lo ralenticen.

5.4.3.4 Fuentes de información de los modos de falla

Consiste en llevar un registro o base de datos con la información de los modos de falla que han ocurrido previamente en el equipo y aquellos que eventualmente podrían ocurrir y que están siendo prevenidos mediante los programas de mantenimiento predictivo y preventivo.

Las fuentes de información de los modos de falla incluyen el conocimiento que tienen también las personas de la compañía relacionadas con el equipo, tales como

los operadores, el personal mecánico y técnico de mantenimiento, los ingenieros, incluso el personal de compras, dado que al momento de efectuar la consecución de los equipos pudieron haber recibido información relevante sobre el tema, así como los vendedores de los equipos quienes usualmente reciben entrenamiento sobre los detalles técnicos.

5.4.3.5 Tipos de modo de falla

Son listas de modos de falla que incluyen todos los posibles eventos que puedan generar una falla funcional. Los tipos de modo de falla pueden originarse por el deterioro normal del equipo o algunas de sus partes, pero también pueden surgir por errores humanos al momento de la operación o del mantenimiento del equipo, finalmente, están los tipos de modo de falla que emergen por defectos en el diseño del equipo.

Entre los modos de falla por deterioro más comunes están las formas de desgaste o rotura, tales como fatiga, corrosión, abrasión, erosión, evaporación, degradación, entre otras.

5.4.4 Efectos de falla

Los efectos de falla se refieren a las consecuencias dejadas por una falla, es decir, lo que pasa cuando ocurre una falla funcional, por tanto, un efecto de falla se produce posteriormente a cuando falla el equipo. Los efectos de falla pueden generar grandes costos a las compañías.

5.4.4.1 Suposiciones básicas

Se refiere a lo que puede pasar si ocurre o se presenta el modo de falla, por tanto, es indispensable realizar actividades o tareas en pro de anticipar, prevenir o detectar la falla.

5.4.4.2 Información necesaria

Consiste en recopilar toda la información necesaria para sustentar los efectos de falla. Dentro de la información más relevante a recopilar está:

- Evidencia de que ha ocurrido la falla.
- Amenazas a la seguridad y al ambiente.
- Efecto en la producción o en las operaciones.
- Daño secundario.
- Acción correctiva requerida.

5.4.5 Categoría de consecuencia de fallas

Se debe realizar una categorización de los modos de falla, es decir, una organización y/o clasificación de los modos de falla por categoría.

5.4.5.1 Categorías de consecuencias

Con el apoyo de la descripción de los efectos de falla, el paso siguiente en MCC es evaluar las consecuencias de modo de falla, la cuales pueden ser afectaciones a la calidad, a la seguridad, al medio ambiente, a la productividad, al consumo de energía o a la estructura de costos.

Para realizar el proceso de categorización, las consecuencias se agrupan en dos grandes grupos que a su vez se encuentran subcategorizados:

- Grupo 1: por tipos de fallas.
 - Fallas evidentes.
 - Fallas ocultas.

- Grupo 2: Por tipos de consecuencias.
 - Consecuencias en la seguridad.
 - Consecuencias en el ambiente.
 - Consecuencias operacionales.
 - Consecuencias no operacionales.

5.4.5.2 Evaluando las consecuencias de falla

Para realizar el proceso de evaluación de consecuencias de falla, la gerencia de mantenimiento debe liderar una valoración haciendo de cuenta que no se realiza ninguna acción para anticipar, prevenir o detectar la falla, lo que implica obviar las gestiones de los mantenimientos preventivos y predictivos programados, partiendo de cero.

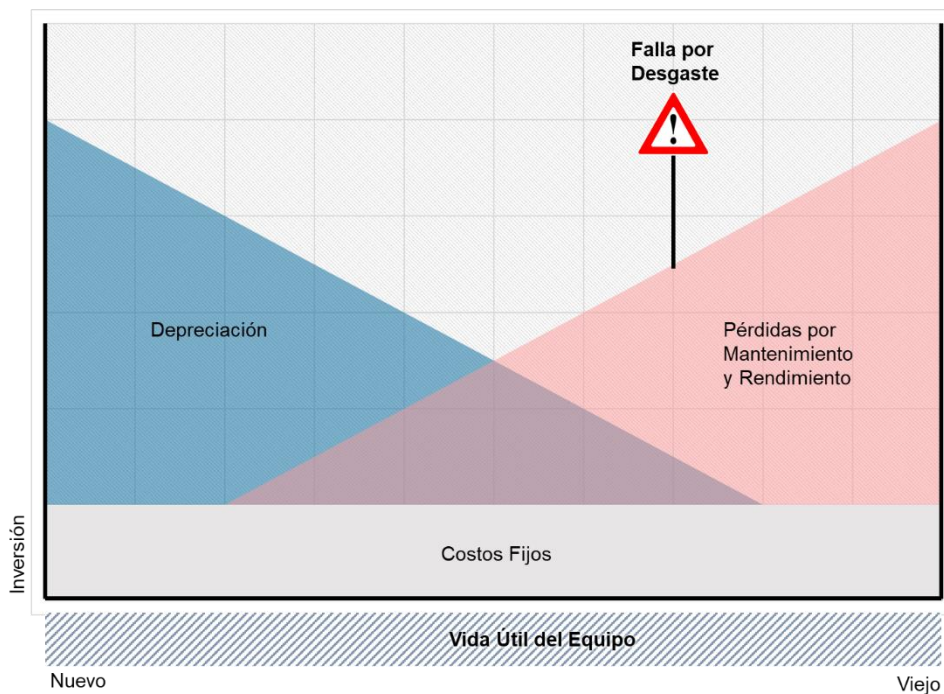
5.4.6 Selección de las políticas y manejo de las fallas

5.4.6.1 Relación entre longevidad y falla

La longevidad consiste en la exposición al esfuerzo que realiza el equipo. Hay una relación directa entre la falla y la longevidad del equipo. Todo equipo tiene un período de vida útil, por lo que es natural que con el uso y el paso del tiempo el equipo se desgaste hasta sufrir un fallo que implique su inmediata sustitución.

Es importante anotar que mediante el mantenimiento correctivo muchas veces se procura extender la vida útil de los equipos efectuando reparaciones mayores. La longevidad también puede traer consigo que el equipo se vuelva obsoleto o atrasado con respecto a los avances tecnológicos que van surgiendo para equipos con capacidades funcionales similares, por lo que algunas veces, habrá equipos que, aunque su funcionamiento perdure, su atraso tecnológico los orillará a quedar fuera de línea y formar parte de la maquinaria en desuso de la compañía.

Figura 29. Relación entre longevidad del equipo y falla.



Fuente: Adaptado de SAE-JA1012, 2002.

5.4.6.2 Técnicamente factible y vale la pena hacerlo

Hace referencia a que todas las tareas o actividades que se planeen dentro de los programas de mantenimiento predictivo y preventivo deben ser factibles y para la

compañía debe valer la pena el esfuerzo que imprime y los costos que asume para su realización, lo que se traduce en aplicabilidad y efectividad de estas tareas.

5.4.6.3 Efectividad de costo

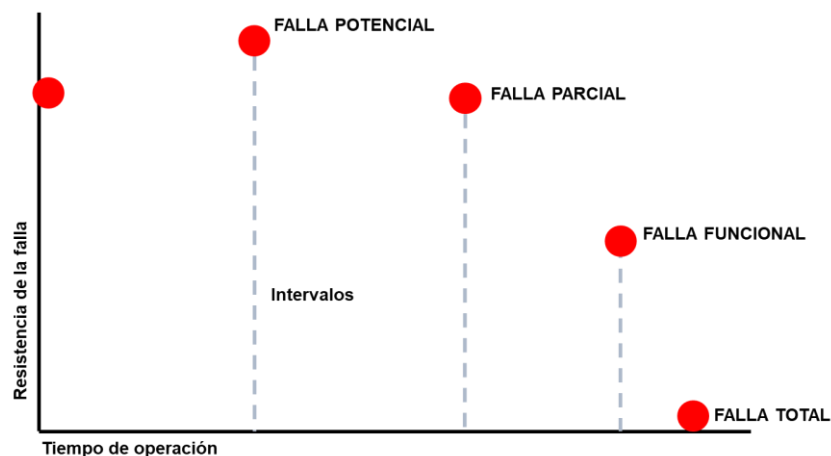
Es necesario que compañía seleccione la política que tenga una mejor relación en términos de costo-beneficio. Es decir, debe tratarse de una política aplicable y efectiva que valga la pena implementarla y cuyo costo quede plenamente justificado. Si hay una política que resulte mucho más económica, aunque no se trate de la más sofisticada, deberá primar su elección, puesto que tendrá un resultado similar en cuanto al funcionamiento de los equipos.

5.4.6.4 Selección de las políticas de manejo de fallas

Al momento de seleccionar las políticas de manejo de fallas, la compañía debe hacer de cuenta que no cuenta con ningún programa de mantenimiento preventivo ni predictivo y suponer el escenario con las consecuencias más graves.

5.4.7 Manejo de las consecuencias de falla

Figura 30. Comportamiento de las fallas.



Fuente: Elaboración propia con información tomada de SAE-JA1012, 2002.

5.4.7.1 Modo de falla evidente

El modo de falla evidente es cuando al producirse una falla los efectos generados se tornan evidentes para el personal operativo y de mantenimiento.

5.4.7.2 Modo de falla oculta

Cuando se presenta el modo de falla oculta, los efectos no son evidentes para el personal operativo y de mantenimiento.

5.4.7.3 Falla Potencial

Un equipo, en forma similar a cómo lo hace el cuerpo humano, presentará síntomas antes de sucumbir a una falla total. Es muy poco habitual que un modo de falla ocurra instantáneamente, el área de mantenimiento de la compañía estará en capacidad de detectar qué elementos o partes del equipo están presentando deterioro, lo que se conoce como una falla potencial.

Una falla potencial que no es atendida a tiempo sin dudas se convertirá en una falla total.

5.4.8 Políticas de manejo de fallas- Tareas programadas

5.4.8.1 Tareas basadas en condición

Las tareas basadas en condición son actividades diseñadas con el propósito de detectar las fallas potenciales. Para que sean exitosas es fundamental tener en cuenta dos aspectos: el primero, que las tareas sean suficientemente claras para que resulten verdaderos facilitadores del proceso de detección de fallas potenciales

y lo segundo, es que las personas de mantenimiento u operación que realizarán las actividades estén bien entrenadas para hacerlo.

Siguiendo la SAE-JA1012¹⁴ las tareas basadas en condición deben seleccionarse teniendo en cuenta los siguientes criterios:

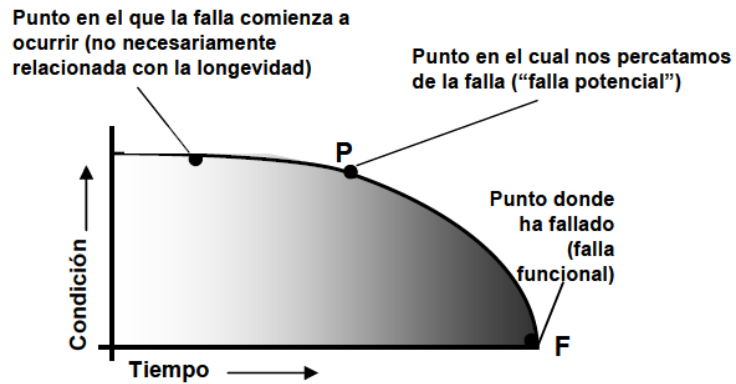
- Debe existir una falla potencial claramente definida.
- Debe existir un intervalo P-F identificable (o período para el desarrollo de falla).
- El intervalo de la tarea debe ser menor que el intervalo P-F probable más corto.
- Debe ser físicamente posible realizar la tarea en intervalos menores que el intervalo P-F.
- El tiempo más corto entre la detección de una falla potencial y la ocurrencia de una falla funcional (el intervalo P-F menos el intervalo de la tarea) debe ser suficientemente largo para predeterminar la acción a ser tomada a fin de evitar, eliminar o minimizar las consecuencias del modo de falla.

5.4.8.1.1 Curva P-F

A continuación, se muestra el gráfico de la curva P-F donde se puede evidenciar cómo comienza una falla y se va deteriorando hasta llegar al punto donde se detecta, cuando no es corregida se convierte en una falla funcional que podrá transformarse a su vez en una falla total.

¹⁴ IDEM. P. 33

Figura 31. Curva P-F.

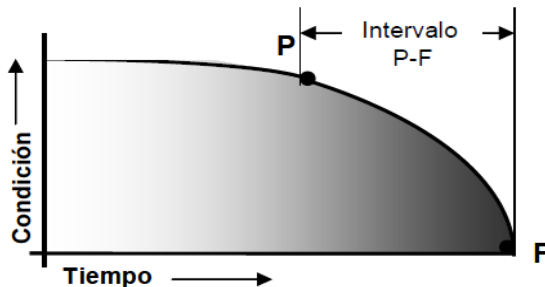


Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 34.

5.4.8.1.2 Intervalo P-F

El intervalo P-F corresponde a la variable del tiempo o número de ciclos de esfuerzo realizado por el equipo entre el punto en el cual se presenta la falla potencial y el punto en el que se deteriora y se convierte en falla funcional, de allí la sigla P-F.

Figura 32. Intervalo P-F.



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 34.

Al observar el intervalo P-F, el área de mantenimiento podrá definir la frecuencia de las tareas basadas en condición, de manera que se realicen en forma oportuna y con una periodicidad no más allá de la realmente necesitada. El intervalo entre una

revisión y otra debe ser menor al intervalo P-F, con lo que se podrá evitar que ocurra la falla funcional, sin embargo, no puede ser demasiado corto, ya que se incurriría en sobrecostos por exceso de revisiones.

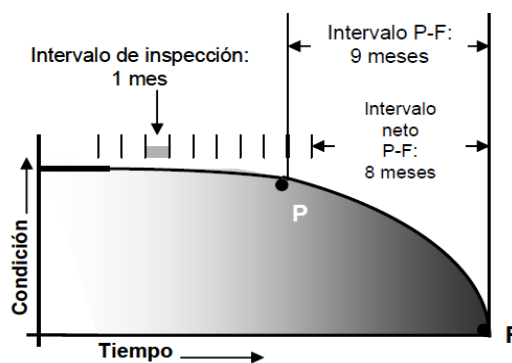
Las compañías que cuentan con un software para apoyar en la administración del mantenimiento tendrán una mayor probabilidad de éxito al momento de determinar los intervalos para las revisiones, ya que los datos históricos de los equipos les darán un valor bastante acertado.

5.4.8.1.3 Intervalo Neto P-F

Corresponde al intervalo mínimo o real con el que se cuenta para evitar que una falla potencial se convierta en una falla funcional. El intervalo neto P-F está dado por la frecuencia con la que se realizan las revisiones del equipo. Su objetivo es proporcionar al área de mantenimiento una capacidad de reacción adecuada para atender la falla potencial evitando la ocurrencia de una falla funcional.

En la siguiente gráfica se puede observar un ejemplo donde un intervalo P-F de 9 meses, cuyo intervalo de inspección es de 1 mes, tiene un intervalo neto P-F de 8 meses.

Figura 33. Intervalo neto P-F.



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 34

5.4.8.1.4 Relación entre el intervalo P-F y la longevidad

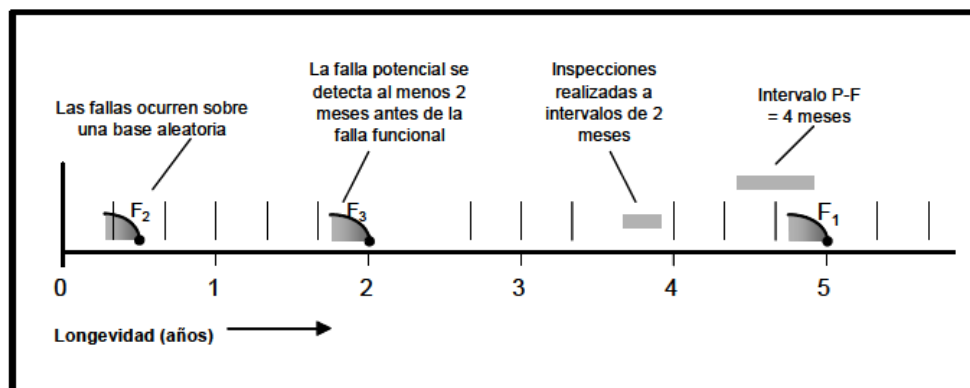
No se debe confundir la vida del equipo con el intervalo P-F. La vida del equipo corresponde al tiempo en que perdura el equipo, lo que también se puede llamar longevidad. Entretanto, el intervalo P-F, como ya se indicó anteriormente, es el número de ciclos de esfuerzo que realiza el equipo entre la falla potencial (P) y la falla funcional (F). Es importante anotar que la longevidad o vida del equipo, empieza a medirse no desde el momento en que se crea sino desde el instante en que inicia su operación o funcionamiento.

5.4.8.1.4.1 Intervalo P-F y fallas aleatorias

Los modos de falla que ocurren sobre una base aleatoria tienen la cualidad de que no se sabe cuándo pasarán, por tanto, solamente con el apoyo del ciclo de inspecciones, se podrán detectar las fallas potenciales y evitar que deriven en fallas funcionales.

El siguiente gráfico muestra un ciclo de inspecciones de 2 meses.

Figura 34. Fallas aleatorias y el intervalo P-F.



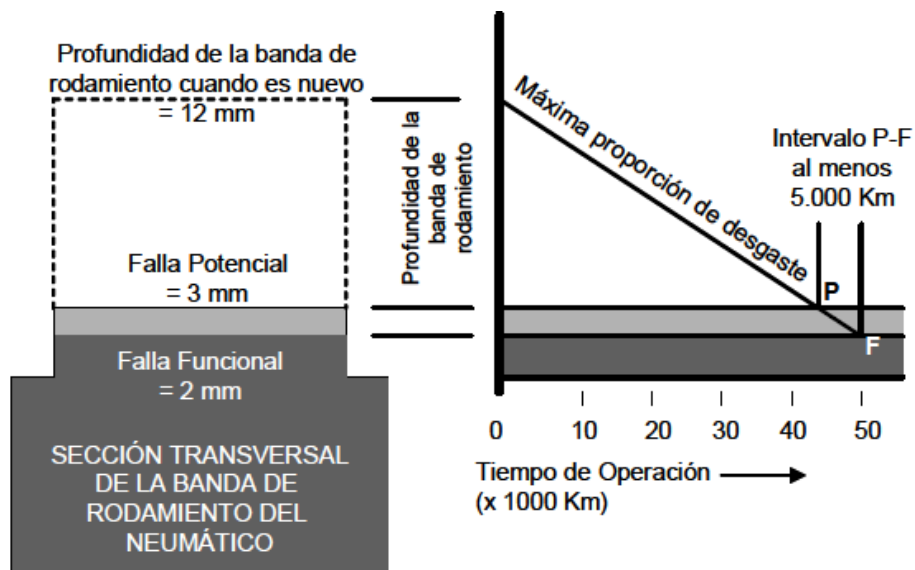
Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 36

5.4.8.1.4.2 Intervalo P-F y modos de falla relacionados con la longevidad

Algunos equipos se desgatarán en forma lineal, es decir, comenzarán a presentar fallas relacionadas con su longevidad. En este caso, las inspecciones realizadas están orientadas a detectar el desgaste del equipo. En estos casos el intervalo P-F puede estar previamente definido. Por ejemplo, cuando se compra un automóvil cero kilómetros, el usuario sabe que debe hacer mantenimiento cada 5000 kilómetros.

El siguiente gráfico muestra una curva P-F de tipo lineal.

Figura 35. Curva P-F de tipo lineal

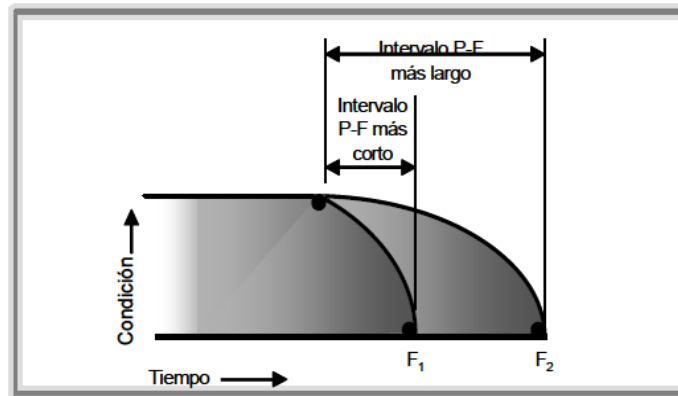


Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 37

5.4.8.1.5 Consistencia del intervalo P-F

Para los casos en que el intervalo P-F no es constante, es decir, cuando tenga una variación muy alta, el área de mantenimiento deberá elegir el intervalo de tarea que sea más pequeño que los intervalos P-F probables más cortos.

Figura 36. Intervalos P-F inconsistentes

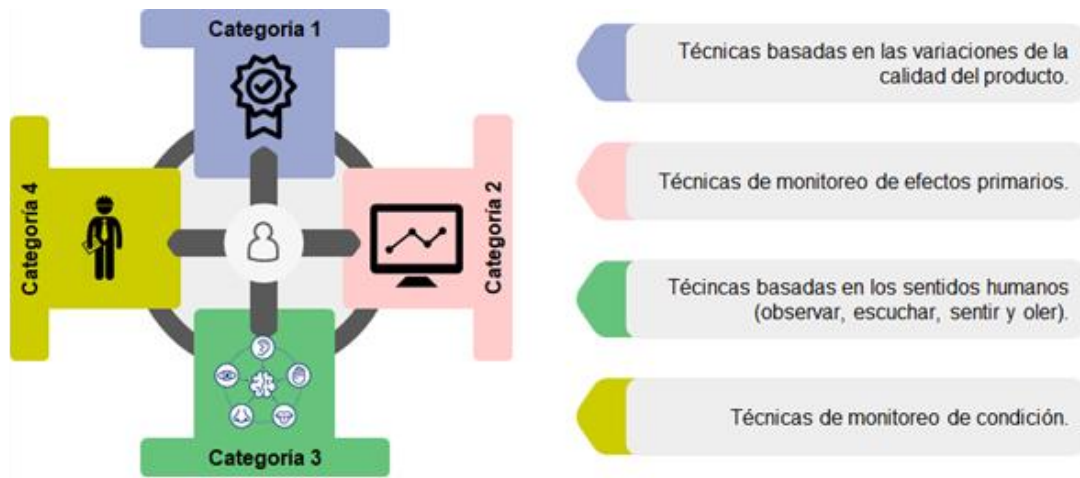


Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 38

5.4.8.1.6 Categorías de técnicas basadas en condición

Se trata de cuatro categorías que son las siguientes:

Figura 37. Categorías de técnicas basadas en condición

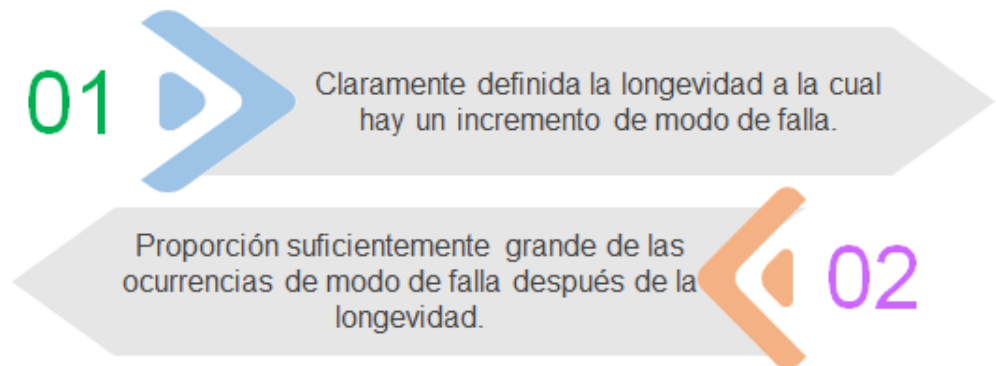


Fuente: Elaboración propia con información tomada de SAE-JA1012, 2002.

5.4.8.2 Tarea de restauración programada y de desincorporación programada

Se realiza sobre la base de los siguientes criterios:

Figura 38. Criterios de la tarea de desincorporación programada.



Fuente: Elaboración propia con información tomada de SAE-JA1012, 2002.

Figura 39. Criterios de la tarea de restauración programada.

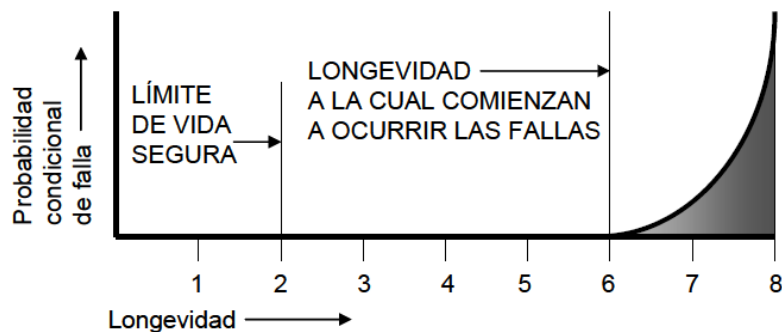


Fuente: Elaboración propia con información tomada de SAE-JA1012, 2002.

5.4.8.2.1 Límites de vida segura

Solamente se utilizan para aquellos modos de falla con efectos o consecuencias a la seguridad o el medio ambiente. Como se trata de proteger la vida de las personas, es necesario que los límites de vida segura sean establecidos antes de que el equipo entre en operación o funcionamiento.

Figura 40. Límite de vida segura.



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 40.

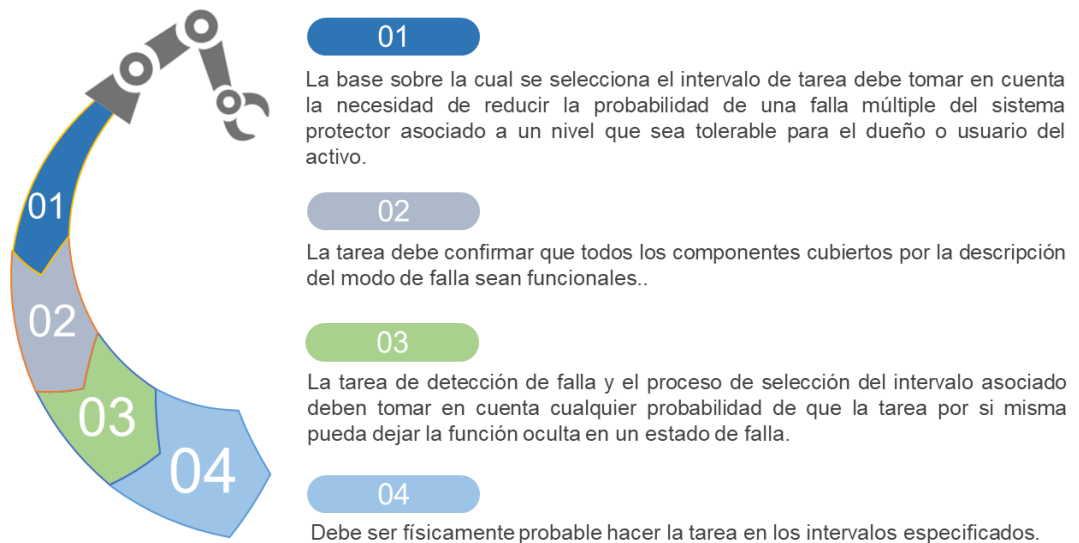
5.4.8.2 Límites de vida económica

La tarea debe ser justificable en términos económicos, es decir, debe haber una relación positiva del costo-beneficio.

5.4.8.3 Tareas de detección de fallas

Son clave para asegurar la confiabilidad y se deben realizar dando cumplimiento a los siguientes criterios:

Figura 41. Criterios de detección de fallas.



Fuente: Adaptado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, PP. 40-41.

5.4.8.3.1 Fallas múltiples y detección de fallas

La falla múltiple se presenta cuando ocurre una falla durante la función protegida, lo que se puede visualizar en la siguiente ecuación:

Figura 42. Ecuación de probabilidad de falla múltiple.

$$\text{Probabilidad de una falla múltiple} = \left(\text{Probabilidad falla de la función protegida} \times \text{Promedio de Indisponibilidad de la protección} \right)$$

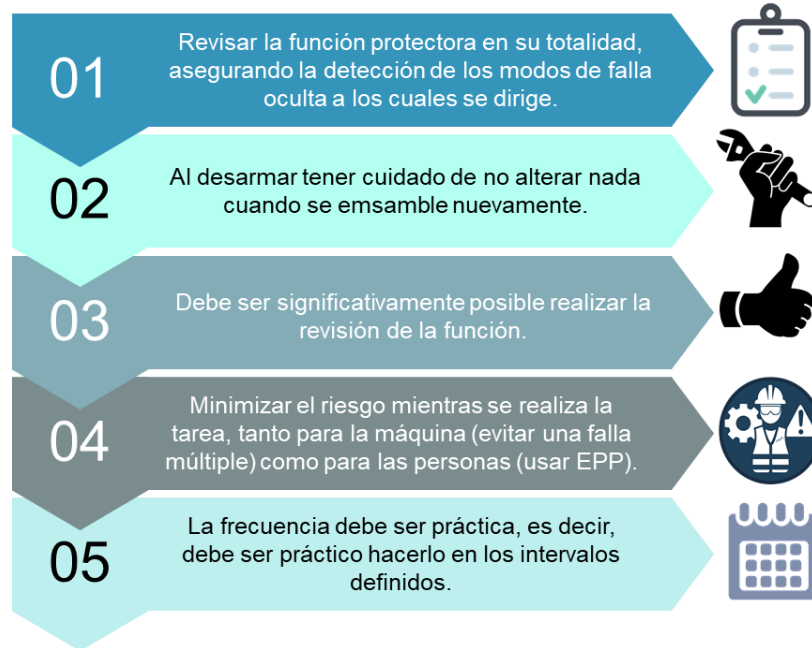
Fuente: Adaptado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 41.

El promedio de indisponibilidad de la protección incide directamente en la probabilidad de la falla múltiple, por tanto, si la empresa trabaja en disminuir la indisponibilidad de la protección, reducirá considerablemente el riesgo de que haya falla múltiple.

5.4.8.3.2 Aspectos técnicos de la detección de fallas

Al momento de realizar la detección de fallas, es importante no perder el objetivo, el cual corresponde a determinar si un modo de falla oculta o su combinación han alterado la función protectora, para esto se recomienda seguir los siguientes aspectos técnicos:

Figura 43. Aspectos técnicos de la detección de fallas



Fuente: Elaboración propia con información tomada de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002.

5.4.8.3.3 Intervalos de tarea de detección de fallas

La disponibilidad y la confiabilidad son las variables principales que se utilizan para establecer los intervalos de detección de fallas, lo que se puede evidenciar en la siguiente ecuación:

Figura 44. Ecuación de indisponibilidad

$$\text{Indisponibilidad} = 0,5 \times \left(\frac{\text{Intervalo de detección de fallas}}{\text{TPEF de la función protectora}} \right)$$

Fuente: Adaptada de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002.

5.4.8.4 Combinación de tareas

La combinación de tareas puede reducir el riesgo de falla a un nivel tolerable, por ejemplo, combinar una tarea basada en condición con una tarea de desincorporación programada. No obstante, raramente se necesitará realizar combinación de tareas, por lo que el área de mantenimiento deberá tener cuidado de no realizarla a menos que sea absolutamente indispensable.

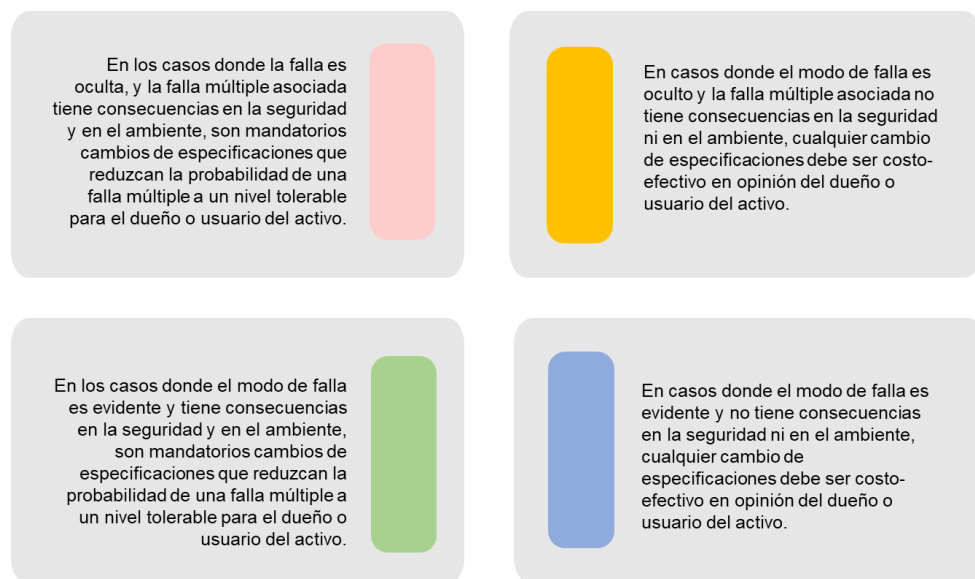
5.4.9 Políticas de manejo de fallas

5.4.9.1 Cambio de especificaciones

Para realizar mantenimiento centrado en confiabilidad es necesario aplicar tareas programadas apropiadas y así el sistema funcionará cómo debe.

En caso de que se requiera realizar cambios en las especificaciones, se deberán realizar atendiendo los siguientes criterios:

Figura 45. Criterios para realizar cambios en las especificaciones



Fuente: Adaptada de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 45.

5.4.9.1.1 Consecuencias en la seguridad o el ambiente

Cuando se trata de un modo de falla de afecte la seguridad o el ambiente y la gerencia de mantenimiento de confiabilidad no encuentre una tarea programada o una combinación de tareas que pueda atender la amenaza y reducir el riesgo a un nivel tolerable para el usuario, es indispensable modificar lo que haya que modificar, lo que significa un rediseño de objetivos.

Jamás la empresa podrá aceptar riesgos que impliquen amenazas a la seguridad de las personas o la contaminación del medio ambiente.

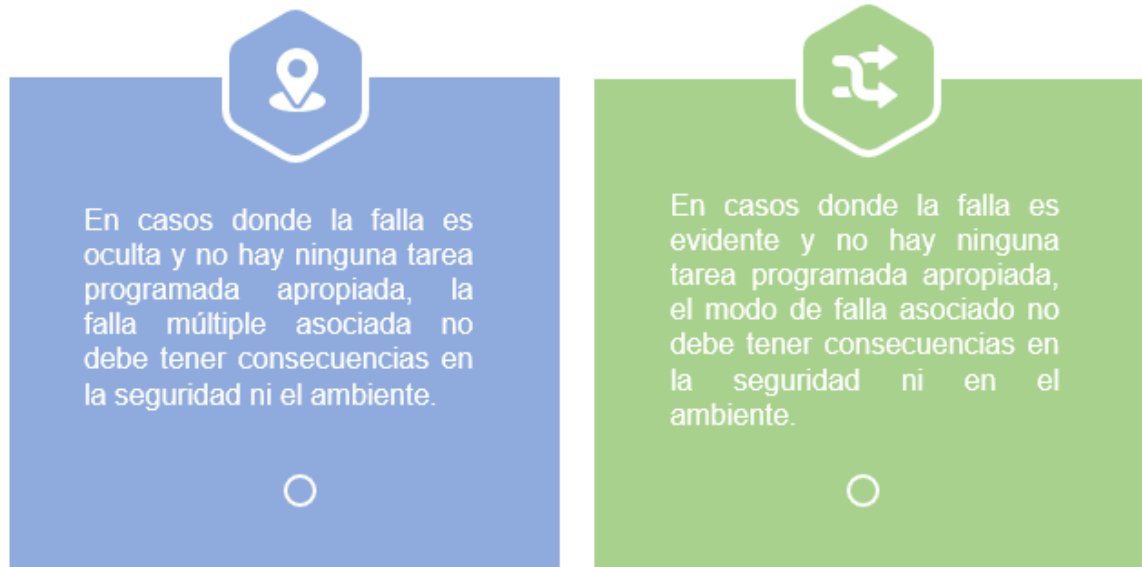
5.4.9.1.2 Consecuencias operacionales y no operacionales

Cuando se trata de este tipo de consecuencias, usualmente lo más conveniente es cambiar el sistema.

5.4.9.2 Operar hasta fallar

Este tipo de políticas debe operar bajo los siguientes criterios:

Figura 46. Políticas para operar hasta fallar.



Fuente: Adaptada de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 45.

5.4.10 Selección de la política de manejo de fallas

5.4.10.1 Dos aproximaciones

Para cada modo de falla identificado, es necesario seleccionar una política de manejo de fallas adecuada, para lo cual se pueden utilizar dos aproximaciones distintas: la primera se trata de una aproximación rigurosa y la segunda de un diagrama de decisión.

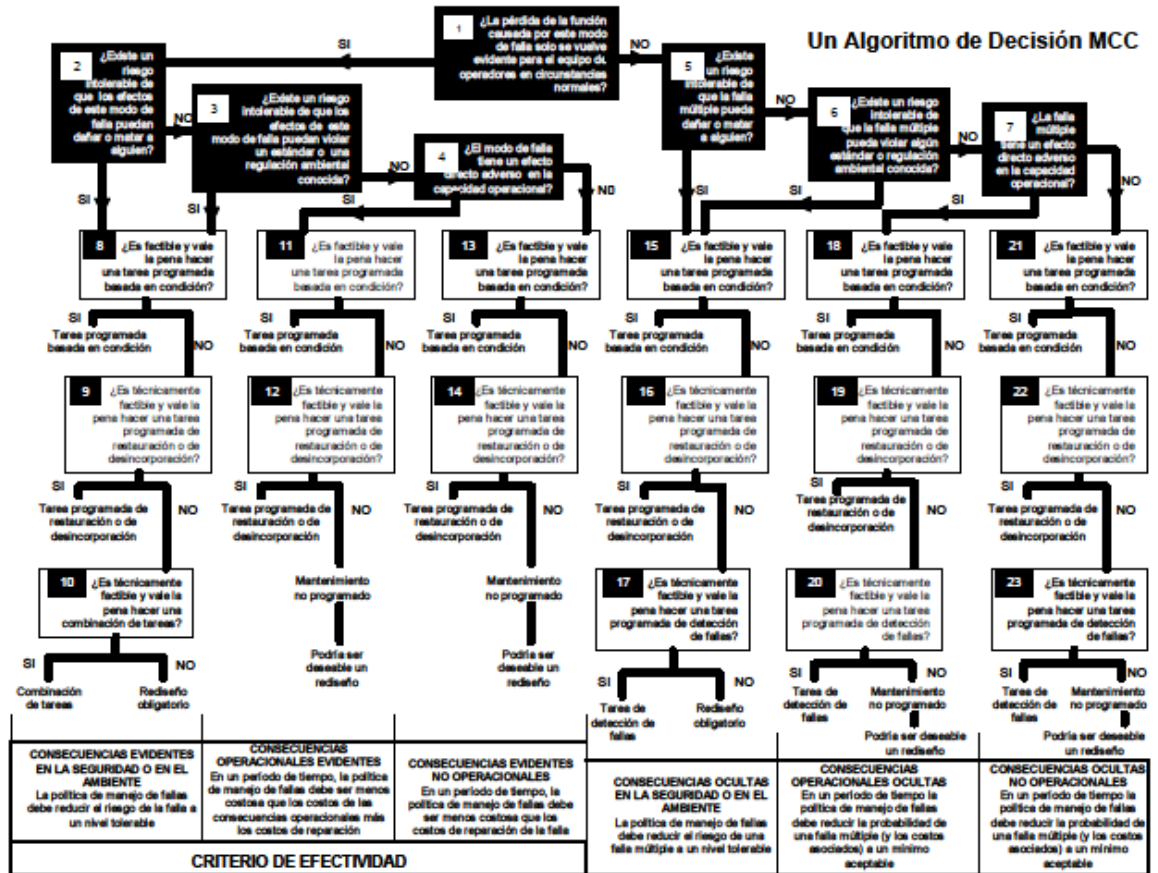
5.4.10.2 Aproximación rigurosa

Requiere que al momento de seleccionar la política de manejo de fallas se tomen en cuenta todas las opciones de política de manejo de fallas técnicamente factibles teniendo en cuenta su impacto a la seguridad y al medio ambiente, así como las consecuencias económicas.

5.4.10.3 Aproximación del diagrama de decisión

Se basan en dos suposiciones, la primera es que las consecuencias para la seguridad y el medio ambiente han sido previamente alineadas a las consecuencias económicas y la segunda, que algunas políticas tendrán un mejor costo-beneficio que otras.

Figura 47. Ejemplo del diagrama de decisión.



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

6. MANTENIMIENTO ACTUAL

Aunque hoy en día, en Bioenergy Zona Franca S.A.S existen planes de mantenimiento para el área industrial, en esta investigación se muestra que estos planes de mantenimiento tienen muchas oportunidades de mejora, teniendo en cuenta los tiempos perdidos por paros no programados en el área de preparación de caña, especialmente en equipos críticos como la picadora y la desfibradora. Sin llegar a fondo de otras áreas funcionales y de otros equipos que también generaron tiempos perdidos, pero de menor magnitud.

Figura 48. Engranaje operacional



Fuente: Mantenimiento Industrial HL

Actualmente la lista de equipos críticos es muy alta, lo que hace que los planes de mantenimiento sean planes extensos y a la vez incumplibles, teniendo en cuenta el recurso humano y económico con que cuenta la compañía.

Otro punto que es muy importante resaltar es que los planes de mantenimiento se realizaron bajo un concepto de “La Planta Ideal” y se determinaron muchos meses antes de que la planta entrara en operación, es decir que los equipos no tenían

ningún tipo de información e historial de operación para ser más asertivos a la hora de hacer un plan de mantenimiento.

Aunque parezca que no es un factor determinante es importante resaltar que en los tres años de operación han pasado cuatro jefes de mantenimiento y esta rotación tan alta en un cargo tan estratégico en la compañía no ha permitido consolidar otro plan de mantenimiento diferente al que ya estaba establecido desde antes del arranque de la planta.

Dentro de estos planes también se encontraron estrategias que se destacan y que con un poco de refuerzo pueden llegar a tomar mucho protagonismo y aumentar la disponibilidad de los equipos, estas estrategias son:

6.1 Plan Padrino

se distribuyeron todos los técnicos de la parte de mantenimiento industrial (mecánicos, electricistas e Instrumentistas) responsabilizando a cada uno de un área funcional de la compañía, es decir que deberían responder por un área a su cargo según su especialidad. Aunque ha dado un buen resultado, se deben fortalecer los conocimientos de operación a todo el personal técnico de mantenimiento, para lograr un mayor entendimiento del porque que de las cosas.

6.2 Ronda Autogestión

Se realizan rondas diarias de inspecciones básicas determinadas como VOSO (Ver, Oír, Sentir, Oler). La cueles están ayudando a encontrar fallas tempranas, evitando daños considerables en los equipos. Esta práctica también se trasmitió al personal operativo y está causando muy buen efecto.

7. MODELO DE MANTENIMIENTO PROPUESTO

Con lo recopilado en la investigación del marco teórico, se aplicó el modelo de la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad según la norma SAE JA1012.

este modelo es una consecuencia paso a paso determinado por el algoritmo de decisión MCC, que conllevará de manera más practica a la elaboración del plan de mantenimiento de los equipos del área de preparación de Bioenergy zona franca s.a.s y que se servirá para la implementación MCC de cualquier equipo en cualquier industria.

Para hacer este análisis con el algoritmo de decisión se debe desarrollar lo propuesto en esta investigación en el capítulo 5, especialmente tener claridad en la definición del contesto operacional, diagrama EPS, funciones primarias y secundarias, fallas funcionales, modos de falla, causas de fallas, efecto consecuencia de las fallas y selección de las tareas según norma SAE JA1012.

7.1 Modos de falla actuales


La siguiente tabla contiene los campos mínimos requeridos para la realización de un mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC); es un esquema simple de trabajo que permite desarrollar tareas de mantenimiento con alto grado de ajuste a las necesidades de la empresa el cual debe estar complementado con la matriz de valoración de riesgos.

Tabla 4 Hoja de mantenimiento centrado en confiabilidad

MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFAIBILIDAD DESFIBRADORA Y PICADORA							
EQUIPO	SISTEMA	SUBSISTEMA	FUNCION	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	VALORACION RAM	RIESGO
Picadora	Sistema de lubricacion	Sistema de lubricación cojinetes	Lubricar rodamientos del rotor de la picadora	No lubrica	Impulsor suelto	3E	H
	Rotor	Rodamientos	Girar facilmente el rotor	No gira rotor	Rodamiento fundido	3E	H
	Rotor	Tambor principal	Soportar y rotar cuchillas	Aumento de Vibraciones	Desbalanceo dinámico	3E	H
	Rotor	Eje principal	Rotar conjunto rotor	No rota el conjunto	Fractura en el eje principal	2E	M
	Rotor	Cuchillas	Trozar caña	No troza caña	Desbalanceo dinámico por perdida de material en las cuchillas	1E	M
	Transmision	Motor de accionamiento	Generar rotación al rotor dela picadora	Parar rotación de rotor	Calentamiento de rodamientos	1E	M
Desfibradora	Sistema de lubricacion	Sistema de lubricación cojinetes	Lubricar rodamientos del rotor de la picadora	No lubrica	Impulsor suelto	3E	H
	Rotor	Rodamientos	Girar facilmente el rotor	No gira rotor	Rodamiento fundido	3E	H
	Rotor	Tambor principal	Soportar y rotar martillos	Aumento de Vibraciones	Desbalanceo dinámico	5E	VH
	Rotor	Martillos	Desfibrar caña	No desfibra caña	Desbalanceo dinámico por perdida de material en los martillos	1E	M
	Transmision	Motor de accionamiento	Generara rotación al rotor de picadora	Paro del motor	Calentamiento de rodamientos	1E	M

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Matriz de valoración de riesgos

		SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL				BE-HSE-FI-0301						
		MATRIZ DE VALORACION DE RIESGOS RAM				Versión:	2					
						Fecha Actualización:	ago-18					
		CONSECUENCIAS				PROBABILIDAD DE OCURRENCIA						
NIVEL DE CONSECUENCIA	HSE		OPERATIVOS		ECONOMICAS		REPUTACIÓN Y CLIENTES	A	B	C	D	E
	PERSONAS	AMBIENTE	Días de Retraso / Parada de planta		Costos (US\$)			No ha ocurrido en la Industria	Sucede varias veces por año en el mundo	Sucede varias veces por año en la Industria a nivel mundial	Sucede varias veces por año en la Industria a nivel nacional	Sucede varias veces por año en BIOENERGY
			Desde	Hasta	Desde	Hasta						
5	Una o Múltiples Fatalidades	Efecto Masivo	Mas de 30 días		Mas de \$11.500.000		Impacto Internacional	M	M	H	H	VH
4	Incapacidad Permanente (Parcial o Total)	Efecto Mayor	15	29	\$ 3.833.112	\$ 11.500.000	Impacto Nacional	L	M	M	H	H
3	Incapacidad Temporal (< 1 día)	Efecto Localizado	7	14	\$ 766.656	\$ 3.833.111	Impacto Regional	N	L	M	M	H
2	Lesión Menor (Sin Incapacidad)	Efecto Menor	1	6	\$ 76.656	\$ 766.656	Impacto Local	N	N	L	M	M
1	Lesión Leve (Primeros Auxilios)	Efecto Leve	Menor a 1 día		0	\$ 76.656	Impacto Interno	N	N	N	L	M

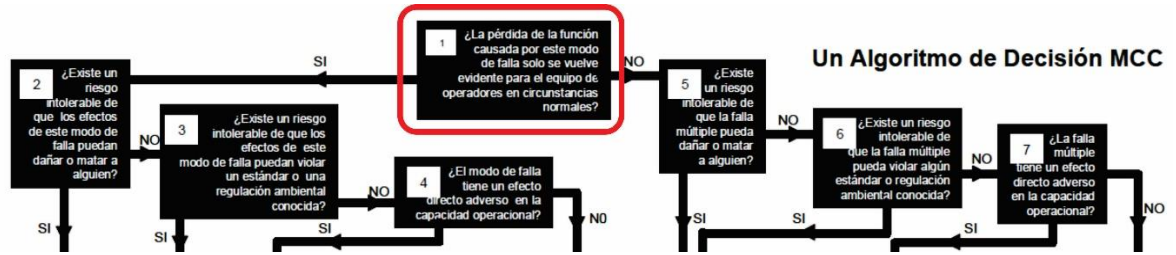
Fuente: Bioenergy

Con la información clara, analizamos los modos de falla en el algoritmo de decisión paso a paso, como se describe a continuación:

7.2 Pasos para el análisis en el algoritmo de decisión

Paso 1. definir si el modo de falla a evaluar es evidente u oculto.

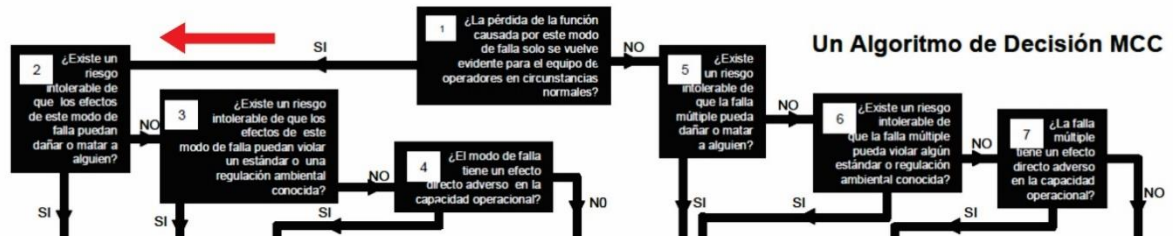
Figura 49. Paso 1 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

Paso 2. Selección del modo de falla evidente.

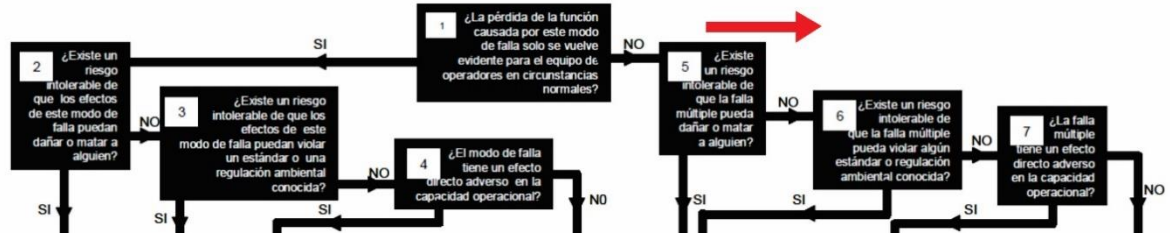
Figura 50. Paso 2 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

Paso 3. Selección del modo de falla oculto.

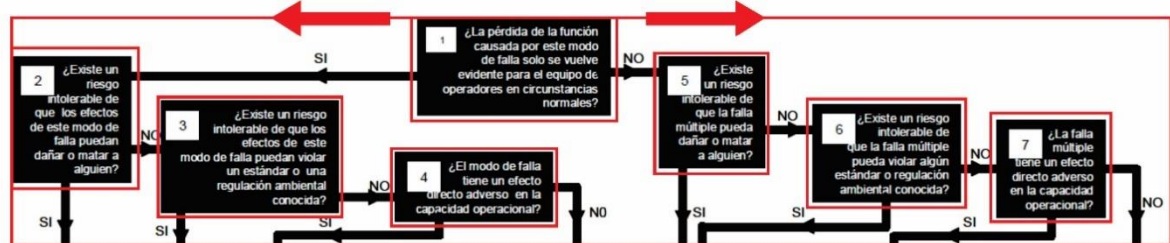
Figura 51. Paso 3 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

Paso 4. Selección de la consecuencia del modo de falla, seguridad, ambiente y/o producción.

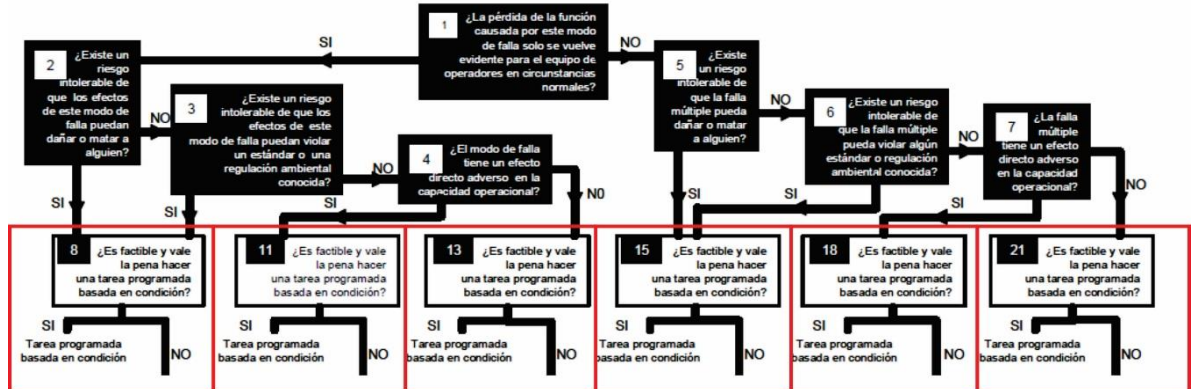
Figura 52. Paso 4 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

Paso 5. Evaluación de las estrategias y tareas basadas en la condición

Figura 53. Paso 5 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

Paso 6. Evaluación de las estrategias y tareas de restauración programada y de desincorporación programada.

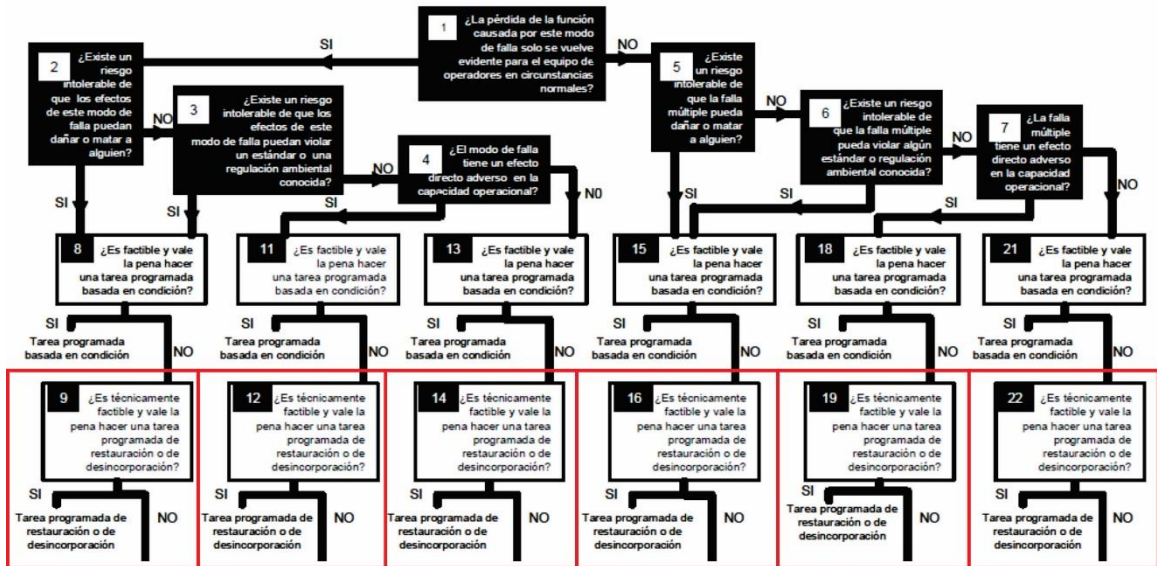
Las tareas de desincorporación programada deben de cumplir con los siguientes criterios:

- Estar claramente definida la longevidad, en la cual hay incremento en la probabilidad condicional del modo de falla en consideración.
- Debe existir una proporción grande de las ocurrencias de este modo de falla después de esta longevidad para reducir la probabilidad de una falla prematura a nivel que sea tolerable para el dueño del activo.

Las tareas de restauración programada deben de cumplir con los siguientes criterios adicionales a los anteriormente nombrados:

- a. La tarea debe restaurar la resistencia a fallar del componente a un nivel que sea tolerable para el dueño del activo.

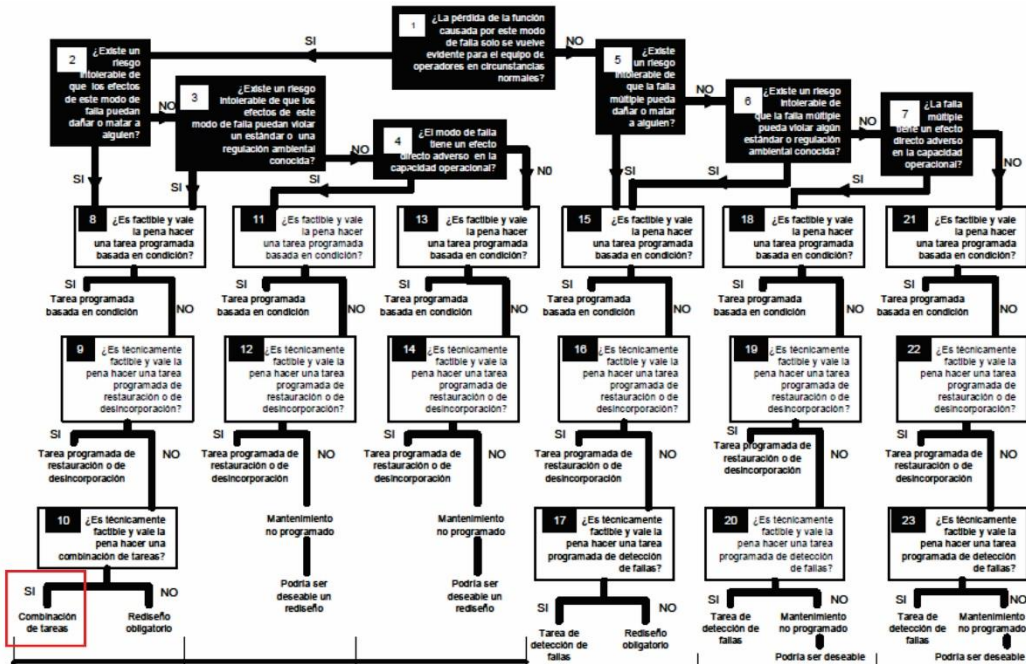
Figura 54. Paso 6 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

Paso 7. combinación de tareas, monitoreo de la condición y mantenimiento preventivo.

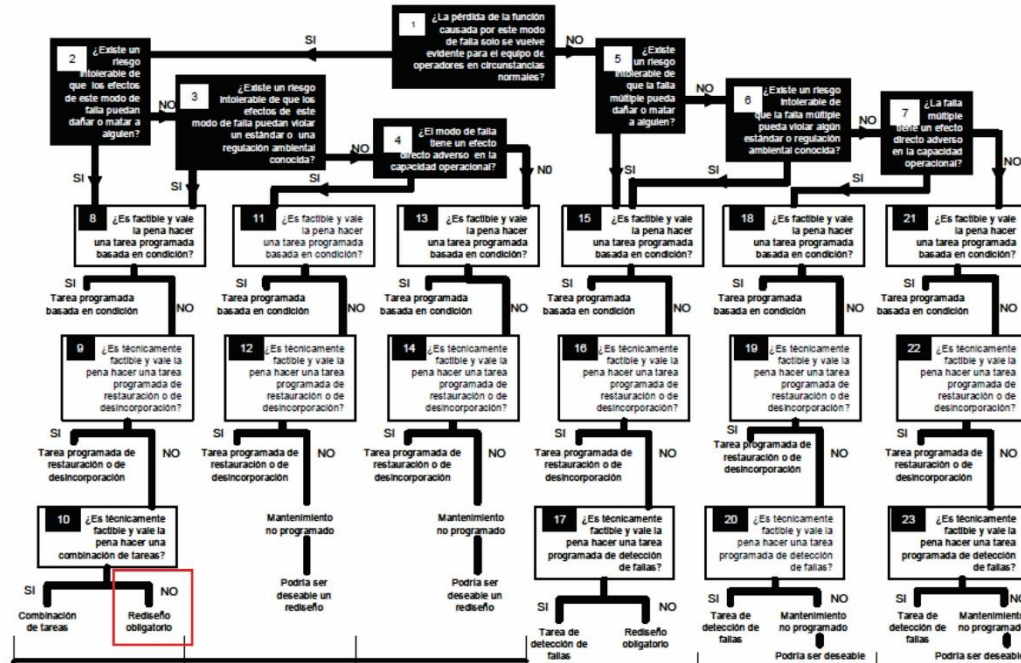
Figura 55. Paso 7 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

Paso 8. Rediseño obligatorio debido a las consecuencias en la seguridad

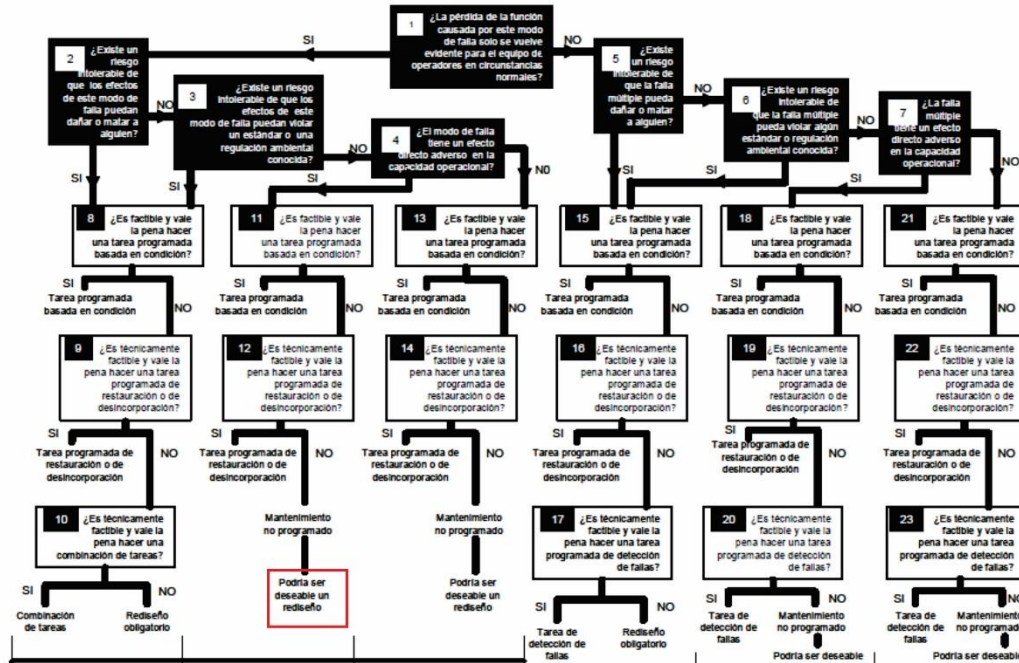
Figura 56. Paso 8 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

Paso 9. Puede ser deseable un rediseño por que las consecuencias son en operación.

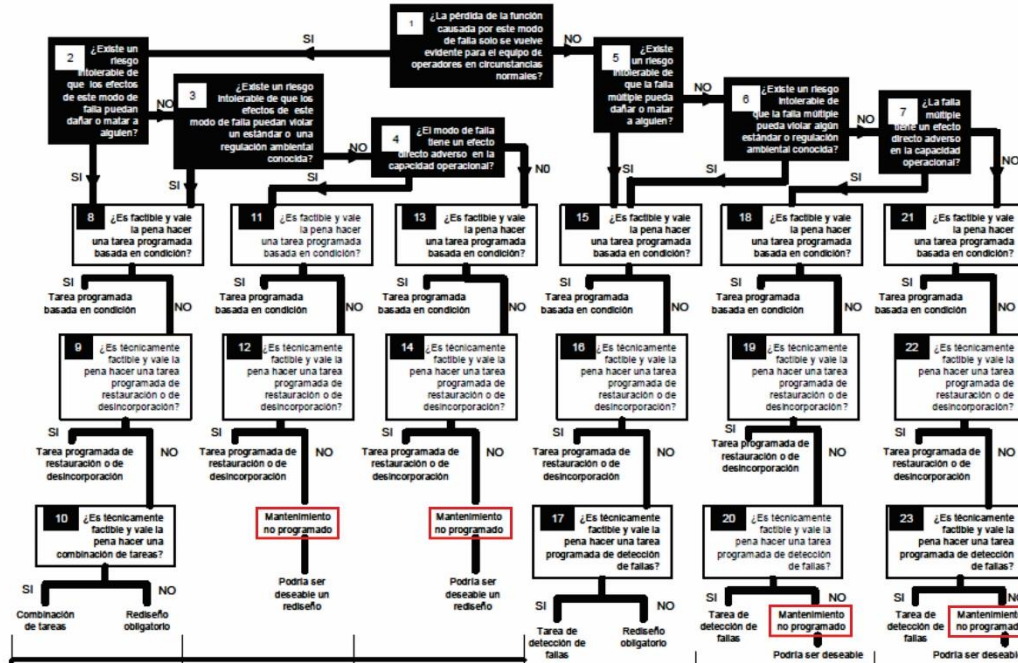
Figura 57. Paso 9 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

Paso 10. Mantenimiento no programado, llevar a falla (correctivo).

Figura 58. Paso 10 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

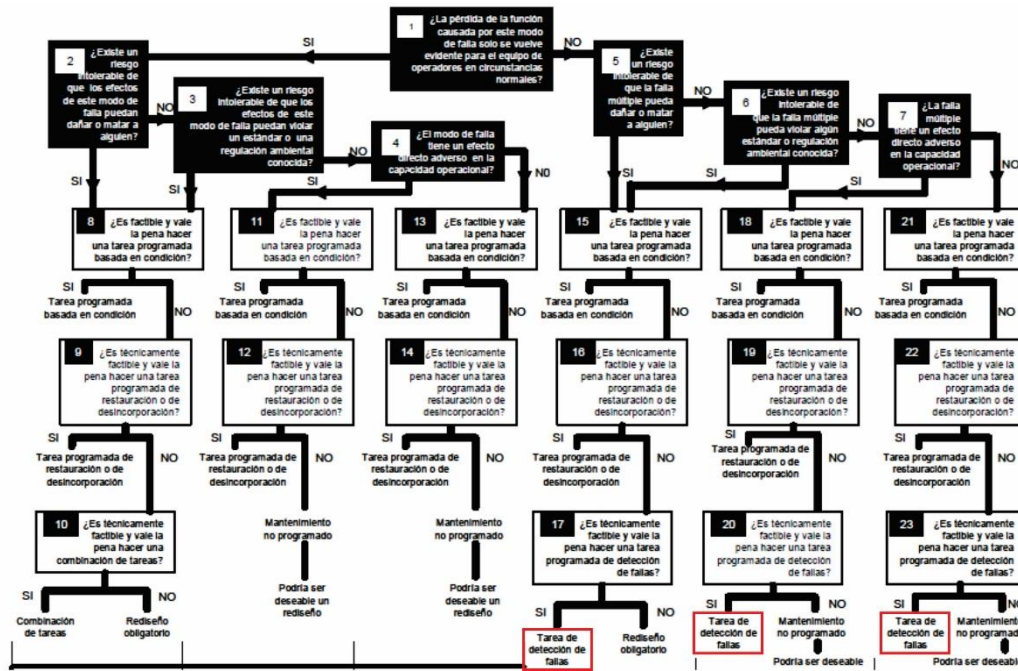
Paso 11. Tareas programadas de detención de fallas, para los modos de falla ocultos se requieren tareas de búsquedas de fallas.

Cualquier tarea de detección de fallas debe contar con los siguientes criterios:

- a. La base sobre la cual se seleccione el intervalo de tarea debe tomar en cuenta la necesidad de reducir la posibilidad de una falla múltiple del sistema protector asociado a un nivel que sea tolerable para el dueño del activo.
- b. La tarea de contar con todos los componentes contemplados por la descripción del modelo de falla que se encuentre en estado funcional.

- c. Las tareas de detección de falla y proceso de selección de intervalo asociado deben tomar en cuenta cualquier probabilidad de que la tarea por si misma pueda dejar la función oculta en un estado de falla.

Figura 59. Paso 11 algoritmo de decisión MCC



Fuente: Tomado de SAE-JA1012, Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC), 2002, P. 53.

Paso 12. El último paso hace referencia a la verificación que la estrategia seleccionada cumpla con los criterios de efectividad para la mitigación de las consecuencias de los modos de falla analizados.

7.3 Tareas de mantenimiento

El siguiente paso consiste en listar cada modo de falla en donde se definirán las tareas de mantenimiento con la ayuda del algoritmo de decisión, las actividades la frecuencia y el responsable ejecutor, como se indica a continuación.

Tabla 6. Tareas propuestas

Tareas basadas en el diagrama de decisión				
Modo de falla	Tarea	Actividad	Frecuencia	Responsable
Pérdida de la función de la bomba	Tarea programada basada en condición	Realizar ronda de autogestión de mantenimiento autónomo	Diario	Auxiliar de área
Rodamiento fundido	Tarea programada basada en condición	Realizar ronda de autogestión de mantenimiento autónomo, toma de temperatura, vibraciones y VOSO	Diario	Mecánico de Turno
Vibraciones altas	Rediseño obligatorio	Instalación de monitoreo continuo	Una vez	Jefe de área / Gerente
Fractura en el eje principal	Técnica de detección de fallas	Realizar ultrasonido en paradas de planta / interzafra	Cada 6 meses	Jefe de mantenimiento / compañía externa
Desbalanceo dinámico por pérdida de material en las cuchillas/martillos	Programada de restauración o de desincorporación	Realizar lista de chequeo verificando la calidad de la soldadura y la geometría de las cuchillas/martillos	Inspección por cada juego reparado	Supervisor de molienda
Calentamiento en rodamientos	Tarea programada basada en condición	Realizar ronda de autogestión de mantenimiento autónomo, toma de temperatura, vibraciones y VOSO	Diario	Mecánico de Turno

Fuente: Elaboración propia

Con la implementación del modelo propuesto basado en “MCC” se disminuirán sin duda alguna los tiempos perdidos que han ocasionado anteriormente los modos de falla analizados. Lo que permitiría el aumento de la confiabilidad y disponibilidad de la picadora y desfibradora, permitiendo así ahorros económicos por lucro cesante y pérdidas por baja eficiencia.

8. CONCLUSIONES

Para realizar un buen plan de mantenimiento es muy importante conocer la naturaleza de los equipos, entender un poco su operación y realizar una tarea disciplinada para definir la criticidad de cada uno de ellos.

Hoy en día, las compañías tienden a ser de clase mundial y para poder lograrlo desde el departamento de mantenimiento es muy importante conocer y aplicar de la mejor manera las herramientas del mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC). La aplicación de esta metodología conlleva a un mejor conocimiento de los equipos industriales y proporciona una relación más directa entre humano – maquina.

Es muy importante destacar que los planes de mantenimiento centrados en confiabilidad se deben trabajar de la mano con la metodología PHVA, esto conlleva al mejoramiento continuo y nos promocionará la suficiente información para tomar las mejores decisiones según sean los casos.

BIBLIOGRAFÍA

ASOCAÑAS. Experiencia Proyecto Energía Renovable – Ingenio de Risaralda. {En línea} {Consultado:11 de junio de 2020} disponible en: <https://www.ccc.org.co/bion/wp-content/uploads/pdf/27-abril-2018/EladioCastroIngenioRisaralda.pdf>

BIOENERGY. *Nuestra empresa – Historia*. [En línea] [Consultado: 20 de agosto de 2020]. disponible en: (<http://www.bioenergy.com.co/SitePages/NuestraEmpresa.aspx>)

BIOENERGY. Ilustración Inclinação máxima del conductor metálico. [Gráfico]. Manual de montaje, operación y mantenimiento – Picador, 2012.

MENART. Palm oil EFB compost & MENART self-propelled turner [captura de pantalla]. [Consultado: 17 de octubre de 2020]. Disponible en: www.menart.eu/maquinas-de-compostaje/volteadoras-autopropulsadas/?lang=es

MOUBRAY, John. *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. Edición en español. Leicester: Aladon Ltd, 2004.

ORTIZ PLATA, Daniel. *Memorias del curso mantenimiento centrado en confiabilidad RCM* [diapositivas]. Yopal. 2018. ¿Para qué RCM?

RAMOS A. Aulio Alberto. *Proceso de Elaboración de Azúcar y Etanol de la Caña*. Santiago de Cali: Universidad del Valle, Unidad de Artes Gráficas de la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, 2019.

RIVAS, Diego. *Área de destilación [fotografía]*. En: Bioenergy Zona Franca S.A.S. Colombia. 10 de diciembre de 2019.

SOCIEDAD DE INGENIEROS DE AUTOMOCIÓN - SAE. *Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC)*. JA1012. 2002-01.