

UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA JOSÉ SIMEÓN CAÑAS

UNIVERSIDAD DON BOSCO



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE MODELO DE GESTIÓN DE
MANTENIMIENTO APLICADO A PLANTA DE BIOMASA”**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO PARA LA FACULTAD DE
POSTGRADOS UCA**

Y

FACULTAD DE INGENIERÍA UDB

PARA OPTAR AL GRADO DE:

MAESTRA/O EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

PRESENTADO POR:

DAVID HUMBERTO CALDERÓN MOREIRA

SILVIA CAROLINA GARCÍA VÁSQUEZ

EDWAR ALEXANDER GRANADOS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS PARRA

ANTIGUO CUSCATLÁN, EL SALVADOR, C.A.

SEPTIEMBRE 2020

Rectores

Andreu Oliva de la Esperanza, S.J.
Mario Rafael Olmos Argueta, SDB

Secretarias Generales

Silvia Elinor Azucena de Fernández
Yesenia Xiomara Martínez Oviedo

Decana de Postgrados UCA

Nelly Arely Chévez Reynosa

Decano de Postgrados UDB

Mario Guillermo Juárez Pérez

Directores de la Maestría en Gerencia de Mantenimiento Industrial

Laura Beatriz Orellana UCA
José Luis Martínez UDB

Director de Tesis

Dr. Carlos Parra

Índice General

Índice de Figuras	iii
Índice de Imágenes	iii
Índice de Tablas	iii
Índice de Gráficos	v
Siglas y Abreviaturas	6
I. Introducción	7
II. Objetivos	8
2.1 Objetivo General	8
2.2 Objetivos Específicos	8
III. Alcance	8
IV. Resultados esperados	8
V. Descripción planta biomasa	8
5.1 Funcionamiento planta de biomasa: ¿Qué hace? ¿Cómo lo hace?	9
5.2 Procedimiento de operación planta de biomasa	9
5.3 Flujograma de proceso de generación de vapor en planta de biomasa	10
5.4 Listado y función de los equipos	10
VI. Marco de Referencia	16
6.1 Fiabilidad Mantenimiento y Gestión de Activos	16
6.2 Proceso de Gestión del Mantenimiento	16
6.3 Eficacia y Eficiencia de la Gestión del Mantenimiento	16
6.4 Principios Básicos en la Definición de Estrategias de Mantenimiento	17
6.4.1 Aspectos a Considerar a la Hora de Implementar Estrategias de Mantenimiento	17
6.5 Modelo de Gestión del Mantenimiento Propuesto	18
6.5.1 Caracterización de la Estructura de Soporte al Modelo de Gestión del Mantenimiento	18
6.5.2 Técnicas de Optimización para la Toma de Decisiones y Sistemas de Soporte para el MGM. 18	
6.5.3 Cuadro de Mando Integral e Indicadores Básicos de la Gestión del Mantenimiento	19
6.5.4 Cuadro de Mando Integral e Indicadores Claves de Desempeño Aplicados a la Gestión de Mantenimiento	19
6.5.5 La Importancia de la Selección Adecuada de los Indicadores de Mantenimiento	20
6.6 Análisis de Criticidad o Jerarquización de Equipos	20
6.6.1 Método de Análisis de Criticidad Semi Cuantitativo	21

6.7	Técnica de Análisis de Causa Raíz (Root Cause Analysis).....	22
6.7.1	Implantación de metodología RCA.	22
VII.	Metodología.....	24
7.1	Establecimiento de indicadores iniciales.	25
7.1.1.	Frecuencia de fallas (FF).....	26
7.1.2.	Tiempo promedio de fallas (MDT)	26
7.1.3.	Costes de indisponibilidad por fallas (CIF)	26
7.1.4.	Disponibilidad (D).....	27
7.2	Jerarquización de Equipos: Modelo de Criticidad Semicuantitativo.	27
7.2.1	Factor Frecuencia de fallas. (Escala 1 – 5).....	28
7.2.2	Factores de consecuencias de fallas.	28
7.3	RCA equipos críticos.....	31
7.3.1	Etapa 1: Conformación del equipo de trabajo RCA.	32
7.3.2	Etapa 2: Definición y jerarquización de los problemas.	32
7.3.3	Etapa 3: Definición y priorización de los modos de fallo.....	32
7.3.4	Etapa 4: Definición y validación de hipótesis.	34
7.3.5	Etapa 5: Definición y validación de causas raíces.....	34
7.3.6	Etapa 6: Definición y evaluación de la efectividad de las soluciones propuestas.	34
VIII.	Desarrollo y Resultados.	35
8.1	Establecimiento de indicadores iniciales.	35
8.2	Jerarquización de equipos según el método de criticidad semicuantitativo “CTR” (Criticidad Total por Riesgos).....	36
8.3	RCA equipos críticos.....	38
8.3.1	Etapa 1. Conformación del equipo de trabajo RCA.	38
8.3.2	Etapa 2: Definición y jerarquización de problemas.	38
8.3.3	Etapa 3: Definición y priorización de modos de fallo.	41
8.3.4	Etapa 4 y 5: Definición y validación de hipótesis y causas raíces.....	44
8.3.5	Etapa 6: Definición y evaluación de la efectividad de las soluciones propuestas.	46
8.3.5.1.	Análisis probabilístico de tiempos entre fallas de modos de falla críticos.	56
8.4	Seguimiento de Indicadores.	59
8.4.1	Frecuencia de fallas (FF).....	60
8.4.2	Tiempo promedio de fallas (MDT).	61
8.4.3	Costes por indisponibilidad de fallas (CIF).	62

8.4.4 Disponibilidad (D).....	64
IX. Conclusiones.....	64
X. Recomendaciones.....	65
XI. Bibliografía.....	65
XII. ANEXOS.....	67
12.1 Anexo 1.....	67
12.2 Anexo 2.....	68

Índice de Figuras

Figura 5.1. Flujograma de proceso de generación de vapor planta de biomasa.....	10
Figura 6.1. Modelo de proceso de gestión del mantenimiento (MGM).....	17
Figura 6.2. Tipología de matriz de criticidad.....	20
Figura 7.1. Modelo del proceso de gestión de mantenimiento (Parra y Crespo 2015).....	23
Figura 7.2 Flujograma de pasos para realización de un Análisis de Causa Raíz (RCA).....	29
Figura 7.3. Flujograma de aplicación de metodología causa raíz.....	33

Índice de Imágenes

Imagen 5.1. Motosierras utilizada para cortar trozos de madera.....	11
Imagen 5.2. Bandit utilizada para triturar madera antes de ingresar a caldera de biomasa.....	11
Imagen 5.3. Rastras transportadoras de biomasa.....	12
Imagen 5.4. Mini cargador.....	12
Imagen 5.5 Cortadora de troncos.....	13
Imagen 5.6. Grúa de planta de biomasa.....	13
Imagen 5.7. Cucharón transportador de biomasa.....	14
Imagen 5.8. Caldera de biomasa.....	14

Índice de Tablas

Tabla 7.1. Ponderación del factor frecuencia de fallas.....	26
---	----

Tabla 7.2. Ponderación del factor de consecuencia impacto operacional.....	26
Tabla 7.3. Ponderación del factor de consecuencia flexibilidad operacional.....	27
Tabla 7.4. Ponderación del factor de consecuencia costes de mantenimiento.....	27
Tabla 7.5. Ponderación del factor de consecuencia seguridad, higiene y ambiente.....	27
Tabla 7.6. Clasificación de los distintos equipos según cada criterio de riesgo evaluado.....	28
Tabla 7.7. Inventario de equipos críticos.....	29
Tabla 7.8. Criterios utilizados para definir y jerarquizar los problemas ocurridos.....	30
Tabla 7.9. Parámetros de modos de fallo para cálculo de riesgo total anualizado.....	31
Tabla 7.10. Clasificación de probabilidad de ocurrencia de hipótesis de modos de fallo.....	32
Tabla 8.1. Indicadores correspondientes a julio y agosto equipos de planta biomasa.....	34
Tabla 8.2. Jerarquización semicuantitativa de los equipos CTR.....	35
Tabla 8.3. Ranking de jerarquización de equipos utilizando el método de análisis semicuantitativo CTR.....	35
Tabla 8.4. Definición de fallos de equipos ocurridos en planta de biomasa.....	37
Tabla 8.5. Jerarquización y priorización de modos de fallas de Bandit.....	40
Tabla 8.6. Jerarquización y priorización de modos de fallo de cucharón STEMM 2CH.....	41
Tabla 8.7. Jerarquización y priorización de modos de fallo de grúa GHD 4t.....	41
Tabla 8.8. Modos de fallas, clasificación de hipótesis y causas raíces de Bandit.....	42
Tabla 8.9. Modos de fallas, clasificación de hipótesis y causas raíces de cucharón STEMM 2CH.....	44
Tabla 8.10. Modos de fallas, clasificación de hipótesis y causas raíces de grúa GHD 4t.....	44
Tabla 8.11. Soluciones, responsable, tiempo de ejecución y costos de soluciones a implementar para reducir recurrencia de modos de fallo en Bandit.....	45
Tabla 8.12. Soluciones, responsable, tiempo de ejecución y costos de soluciones a implementar para reducir recurrencia de modos de fallo en cucharón STEMM 2CH.....	48
Tabla 8.13. Soluciones, responsable, tiempo de ejecución y costos de soluciones a implementar para reducir recurrencia de modos de fallo en grúa GHD 4t.....	50
Tabla 8.14. Cálculo de riesgo total anualizado implementando los mantenimientos programados para evitar los modos de falla analizados para cada hipótesis.....	52
Tabla 8.15. Comparación entre tiempo de frecuencia asignado a realización de tareas de mejora en el mantenimiento y tiempo promedio operativo obtenido según el modelo probabilístico de Weibull.....	55
Tabla 8.16. Ahorro resultante esperado luego de implementación de soluciones derivadas del	

método RCA.....	56
Tabla 8.17. Ahorro esperado luego de implementación de soluciones RCA calculada por equipo..	56
Tabla 8.18. Datos registrados indicador frecuencia de fallas.....	58
Tabla 8.19. Datos registrados indicador tiempo promedio de fallas.....	60
Tabla 8.20. Valores de indicador costes de indisponibilidad por fallas.....	61
Tabla 12.1. Costo de toneladas de vapor generado por calderas de fuel oil al momento de algún modo de falla en el cucharón o grúa de la planta de biomasa.....	65
Tabla 12.2. Tiempo operativo transcurrido antes de la ocurrencia del modo de fallo Fractura de chumacera derecha de tambor.....	66
Tabla 12.3. Cálculo del término A_i para los valores de tiempo operativo entre fallas.....	66
Tabla 12.4. Valores utilizados para el cálculo final de los parámetros Alpha (α) y Beta (β).....	67
Tabla 12.5. Valores finales obtenidos para los parámetros Alpha (α) y Beta (β).....	67
Tabla 12.6. Tiempo promedio estimado antes de la próxima falla.....	67

Índice de Gráficos

Gráfico 8.1. Ahorros comparados con RTA actual y optimista por cada equipo crítico analizado...	57
Gráfico 8.2. Indicador frecuencia de fallas por equipos críticos.....	58
Gráfico 8.3. Indicador frecuencia de fallas de planta de biomasa.....	58
Gráfico 8.4. Indicador tiempo promedio de fallas equipos críticos.....	59
Gráfico 8.5. Indicador tiempo promedio de fallas de planta de biomasa.....	59
Gráfico 8.6. Indicador costes por indisponibilidad de fallas.....	60
Gráfico 8.7. Indicador tiempo promedio de fallas de planta de biomasa.....	61
Gráfico 8.8. Indicador disponibilidad equipos críticos.....	62

Siglas y Abreviaturas

AHP	Proceso de Análisis Jerárquico (Analytc Hierarchy Process).
BC	Baja criticidad.
BSC	Cuadro de mando integral (Balance Score Card).
C	Críticos.
CD	Costos directos de indisponibilidad por fallas.
CF	Consecuencia de las fallas ocurridas.
CIF	Costes de indisponibilidad por fallas.
CM	Criticidad moderada.
CMat	Costos de materiales por fallo.
CMO	Costos de mano de obra por fallo.
CMtto.	Factor de costes de mantenimiento.
CP	Costos de penalización por unidad de tiempo.
CRF	Causa raíz física.
CRH	Causa raíz humana.
CRL	Causa raíz latente.
CTR	Criticidad total por riesgo.
D	Disponibilidad.
FF	Frecuencia de fallas
FO	Factor de flexibilidad operacional.
IO	Factor de impacto en la producción.
IP	Impacto en producción.
KPI's	Indicadores claves (Key Performance Indicators).
MC	Muy críticos.
MDT	Tiempo medio de fallas (Mean Down Time).
MGM	Modelo de gestión de mantenimiento.
N	Orden de la matriz.
RCA	Análisis de causa raíz (Root cause analysis).
RI	Valor aleatorio promedio.
RTA	Riesgo total anualizado.
RTAO	Riesto total anualizado optimista.
SHA	Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente.

I. Introducción

En el ámbito industrial es bien sabido que para producir bienes de consumo además de utilizar materia prima y maquinaria, se requieren además diversas formas de energía para poder poner en marcha la maquinaria, entre las cuales podemos mencionar aire comprimido, electricidad, vapor, etc.

La presente investigación se llevará a cabo en una planta de biomasa, dentro de ella se cuenta con una caldera, la cual a partir de materia orgánica (biomasa) como madera, zacate o estopa de coco es capaz de transformar el poder calorífico de este material en energía en forma de vapor. La planta de biomasa tiene como objetivo principal proveer vapor a una planta de tintorería, en la cual se tiñe tela. Debido a lo delicado de los procesos de teñido, en donde es indispensable mantener las temperaturas definidas, la planta de biomasa debe estar en condiciones de suplir las necesidades de vapor de la tintorería las 24 horas del día.

Actualmente se cuenta con un sistema de vapor redundante, en donde la fuente principal de vapor es la caldera de biomasa, sin embargo, históricamente han ocurrido pérdidas de presión de vapor en la planta de tintorería debido a las variaciones de presión en la planta de biomasa causando pérdidas en la producción, es por esta razón que se cuenta con otra caldera de respaldo la cual opera con fuel oil y es la encargada de suplir las caídas de presión de la planta de biomasa.

Sin embargo, debido a que la organización se encuentra altamente comprometida con el medio ambiente y la reducción de generación de gases perjudiciales, se tiene como compromiso corporativo reducir lo más posible la generación de vapor a partir de combustibles fósiles y a su vez maximizar la generación de vapor a partir de biomasa.

Con el objetivo de maximizar el vapor a partir de biomasa, se ha tenido a bien implementar un sistema formal de mantenimiento a los equipos que conforman la planta de biomasa, ya que actualmente no se cuenta con ningún tipo de control o mantenimiento para estos equipos, teniendo en cuenta que la planta inició operaciones en el año 2012 y las únicas intervenciones mecánicas han sido en repuesta a fallas ocurridas, es decir mantenimiento correctivo.

La implementación de una estrategia de mantenimiento basada en la confiabilidad es el objetivo de este documento, midiendo y evidenciando los costos generados por las fallas ocurridas dentro de la planta de biomasa, así como las mejoras propuestas y los ahorros generados luego de la implementación de las mejoras.

Las principales etapas de la estrategia de mantenimiento son:

- Implementación y definición de indicadores claves de mantenimiento.
- Jerarquización y análisis de criticidad de equipo utilizando el método semi cuantitativo.
- Definir modos de falla de equipos críticos.
- Analizar modos de falla de equipos críticos para definir causas raíces.
- Identificar causas raíz para atacar modos de falla de equipos críticos.
- Implementar plan de mejora de mantenimiento basado en resultados de análisis de causa raíz a equipos críticos.

Al finalizar el documento, se contará con un plan de mejora de mantenimiento enfocado a disminuir la frecuencia de los modos de falla causantes de incrementos en costos de operación y tiempos muertos.

Debe tenerse en cuenta que la estrategia de mantenimiento es un proceso cíclico, el cual no debería finalizar con las conclusiones obtenidas durante esta investigación, al finalizar debe repetirse el proceso nuevamente para entrar en la dinámica de la mejora continua.

II. Objetivos

2.1 Objetivo General

- Implementar una estrategia de gestión de mantenimiento basada en la confiabilidad que permita maximizar la disponibilidad, mantenibilidad, rentabilidad y calidad de la producción de vapor a partir de biomasa.

2.2 Objetivos Específicos

- Implementar y definir indicadores claves de mantenimiento.
- Jerarquizar y analizar equipos críticos utilizando el método de criticidad semi cuantitativa.
- Conformar un equipo para determinación de causas raíces de modos de fallos.
- Definir modos de falla de equipos críticos.
- Analizar modos de falla de equipos críticos para definir causas raíces.
- Identificar soluciones para atacar modos de falla de equipos críticos.
- Implementar plan de mejora de mantenimiento basado en resultados de análisis de causa raíz a equipos críticos.
- Cuantificar mejoras y ahorros resultantes de soluciones implementadas.

III. Alcance

El alcance de este documento es la implementación de una estrategia de mejoras de mantenimiento en la planta de biomasa encargada de suministrar vapor a tintorería, como resultado de la realización de un análisis causa raíz a los equipos definidos como críticos, respaldando los resultados con la mejora de indicadores claves establecidos.

IV. Resultados esperados

- Definición, establecimiento y seguimiento de indicadores claves de mantenimiento.
- Definición de equipos críticos actuales haciendo uso del método de criticidad semi cuantitativo.
- Soluciones definidas a partir del análisis de causa raíz a equipos críticos.
- Plan de mejoras de mantenimiento basado en análisis de causa raíz aplicado a modos de fallas significativos.
- Cuantificación de costos generados por modos de fallas.
- Cuantificación de ahorros generados con la implementación de mejoras de mantenimiento como resultado del análisis de causa raíz realizado a los equipos críticos.

V. Descripción planta biomasa.

En la industria textil, el vapor es uno de los insumos más importantes con los cuales se debe contar durante los procesos de producción, es por esta razón que muchas de las empresas que se encuentran

en el rubro antes mencionado, deben invertir en la adquisición de calderas que son los equipos diseñados para cumplir la función de producir vapor.

Es común que la mayoría de plantas de producción tengan calderas que trabajen con derivados del petróleo, pero en la actualidad por temas de costos y con el propósito de disminuir las emisiones de gases que incrementan el efecto invernadero, han empezado a tomar más fuerza la generación de vapor a partir de biomasa.

5.1 Funcionamiento planta de biomasa: ¿Qué hace? ¿Cómo lo hace?

Este proceso para generar vapor es el resultado de transformar la energía química contenida en el combustible (en este caso biomasa), en energía térmica, la cual se transfiere al agua, produciendo de esta manera el vapor necesario en función de las necesidades de producción del proceso en el cual sea requerido.

Para poder lograr que este tipo de equipos funcione, es indispensable explotar el combustible (biomasa) de manera eficiente, donde la eficiencia es el aprovechamiento del poder calorífico que se genera durante la combustión y la transferencia de calor desde la biomasa hacia el agua para poder entregar vapor.

La complejidad de este proceso radica en saber corresponder en todo momento la demanda de vapor por parte del consumidor, siendo esta una de las razones por las cuales este proceso tiene un comportamiento dinámico y complejo, en el cual se ven intervenidas variables que pueden ser manipuladas, controladas y perturbaciones en constante interacción, es por esta razón que dichos sistemas necesitan sistemas eficientes de control.

Por lo antes mencionado, lograr una alta efectividad y fiabilidad en los equipos de generación depende en gran medida del control integral que puedan tener los procesos asociados, los cuales no solo hacen referencia a la combustión y generación de vapor propiamente, también es importante tener en cuenta la preparación del combustible y el tratamiento del agua con el cual la caldera es alimentada.

5.2 Procedimiento de operación planta de biomasa.

A continuación se realiza una breve descripción del procedimiento de operación de la planta de biomasa:

- **Compra de materia prima para combustión:** El primer paso dentro de la cadena de proceso para la generación del vapor, es la compra de la materia prima, la cual en su mayoría se conforma de leña, estopa de coco, zacate y residuos de cartón.
- **Preparación, recolección y almacenaje:** En el caso de la madera, debe prepararse, los trozos que se compran deben ser cortados utilizando motosierras para ser picado posteriormente. Una vez los componentes utilizados para la combustión se logran consolidar, estos son transportados al área de caldera, luego se almacenan en el pit junto a la caldera para que esta se pueda alimentar de forma constante mientras esta se encuentre en operación.
- **Alimentación de caldera de biomasa:** Al tener la biomasa en la planta se procede a la alimentación de la caldera, la cual se puede realizar de dos maneras utilizando el cucharón y grúa que es la forma adecuada, o en caso de algún inconveniente con alguno de estos dos equipos utilizando el mini cargador.

- **Quema de biomasa:** La parte final del proceso es la colocación de la biomasa a la banda transportadora hasta ser colocada en el punto de ingreso a la caldera.
- **Generación de vapor:** Al estar la biomasa dentro de la caldera se realiza el proceso de combustión, dándose como resultado la generación de vapor.

5.3 Flujograma de proceso de generación de vapor en planta de biomasa.

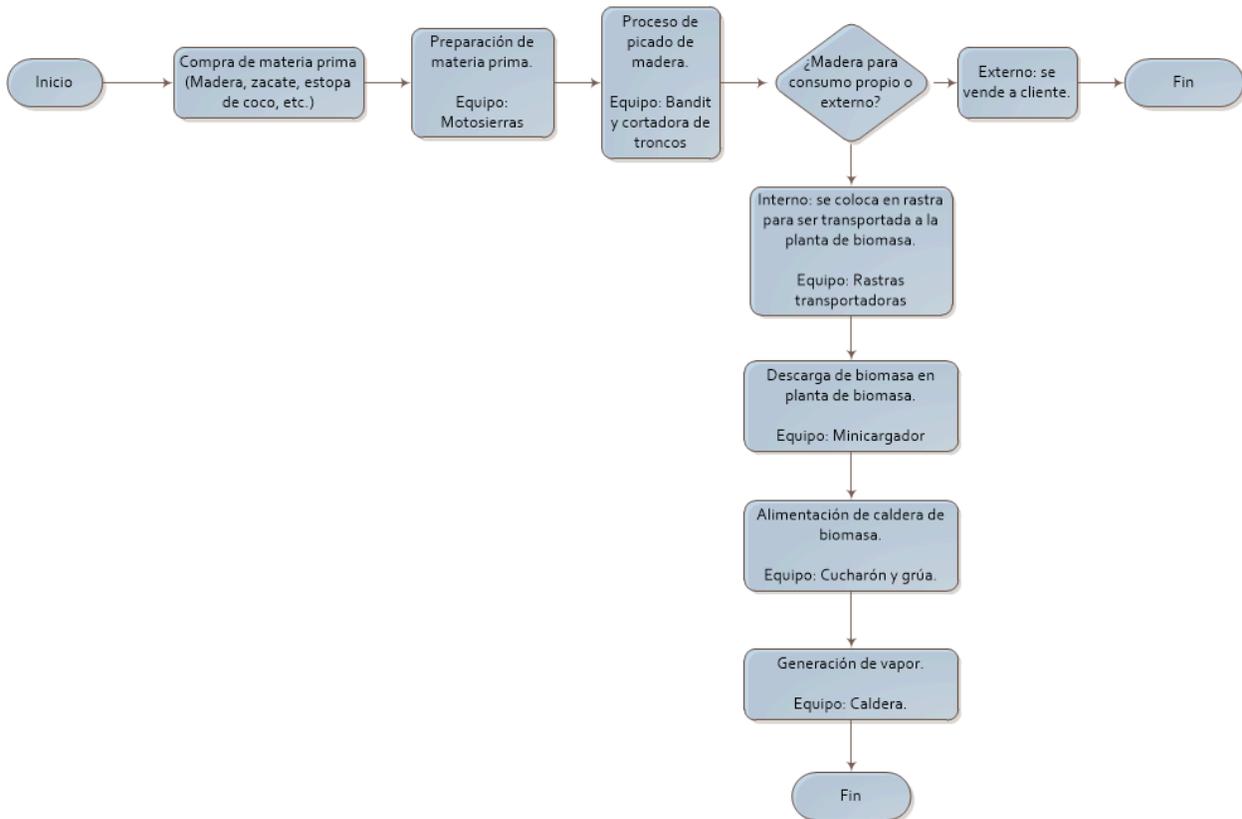


Figura 5.1. Flujograma de proceso de generación de vapor planta de biomasa.

5.4 Listado y función de los equipos.

A continuación se realiza una descripción de los equipos principales:

- **Motosierras cortadoras de madera:** Herramientas con las cuales se reduce el tamaño de los trozos de madera, esto con el fin de alcanzar la medida necesaria para poder triturar en su totalidad y así no tener problemas al momento de ingresar la madera en la caldera.



Imagen 5.1. Motosierras utilizada para cortar trozos de madera.

- **Bandit:** Máquina trituradora de madera, con esta se logra dar la característica final y necesaria a la materia prima (madera) para que esta pueda ingresar a los hornos de la caldera.

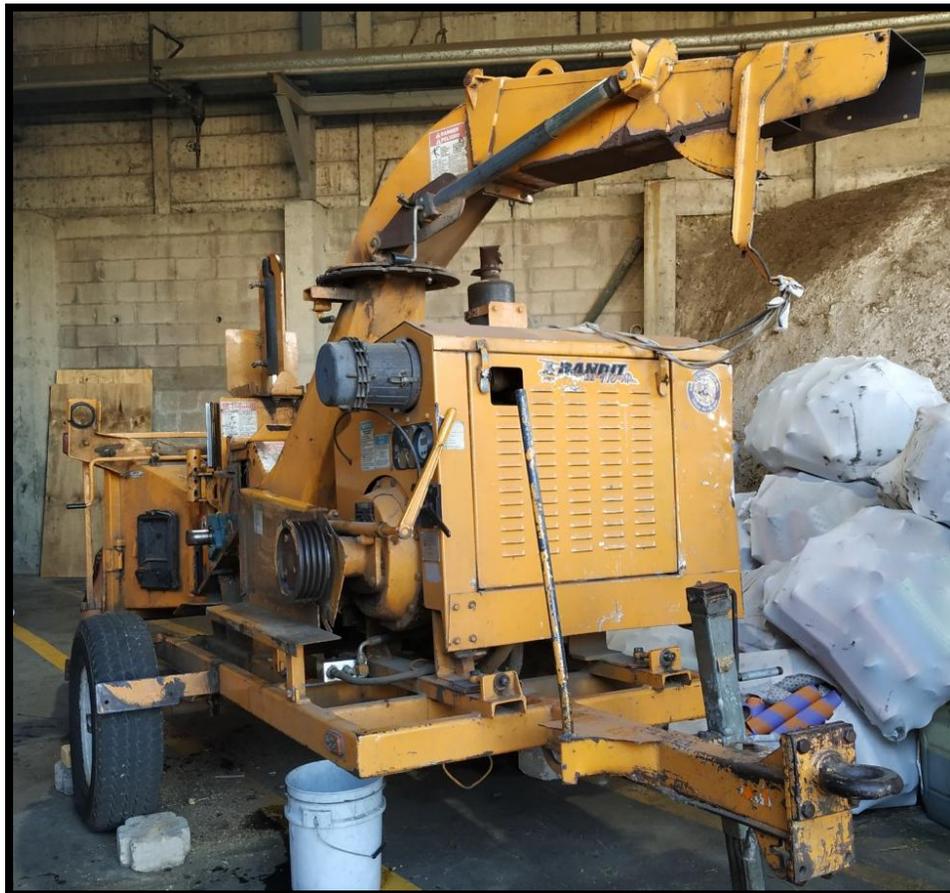


Imagen 5.2. Bandit utilizada para triturar madera antes de ingresar a caldera de biomasa.

- **Rastras transportadoras de biomasa:** Su función es transportar material desde el lugar de preparación, hasta el pit de almacenaje de la planta de biomasa.



Imagen 5.3. Rastras transportadoras de biomasa.

- **Minicargador:** Equipo de movimiento, es el utilizado para bajar el material que viene dentro de la rastra y a su vez llevar este material hasta el pit de almacenaje y alimentación.

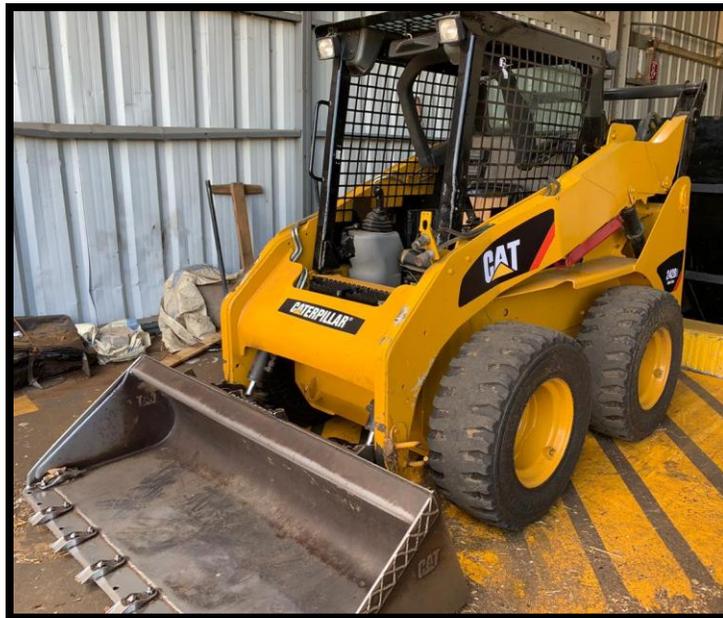


Imagen 5.4. Mini cargador.

- **Cortadora de troncos:** Máquina encargada de reducir el tamaño de los troncos más grandes para que estos puedan entrar en la trituradora, su labor es similar al realizado por las motosierras.



Imagen 5.5 Cortadora de troncos.

- **Grúa GHD 4t:** Equipo con el cual se mueve la biomasa almacenada en el pit hacia la banda de alimentación de la caldera.

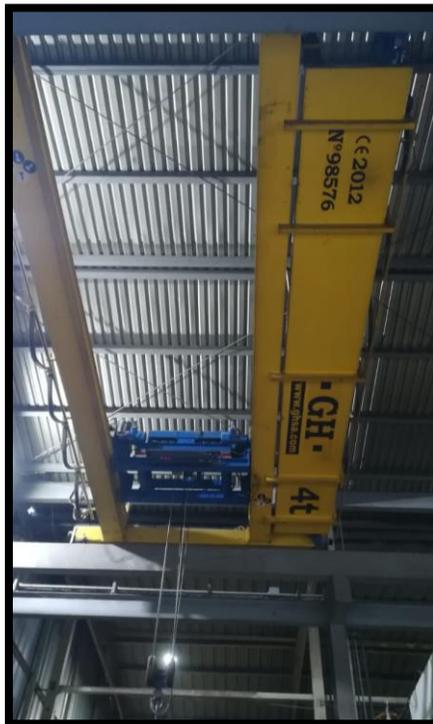


Imagen 5.6. Grúa de planta de biomasa.

- **Cucharón STEMM 2CH:** Equipo encargado de tomar la biomasa, el cual se encuentra enganchado a la grúa.

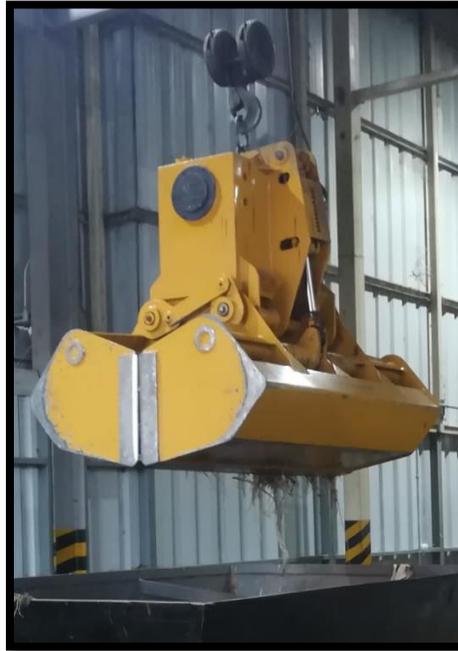


Imagen 5.7. Cucharón transportador de biomasa.

- **Caldera:** su función principal es producir vapor a partir de biomasa.



Imagen 5.8. Caldera de biomasa.

VI. Marco de Referencia.

6.1 Fiabilidad Mantenimiento y Gestión de Activos.

El mantenimiento hace años que pasó de ser sólo un costo para las compañías, el cual solo se veía como la reparación de equipos dañados, a un complejo proceso que bien gestionado puede dar a las empresas una ventaja competitiva y decisiva en las difíciles circunstancias actuales. Así mismo, conceptos como la sostenibilidad han hecho que el mantenimiento deba de dar un salto cualitativo dentro de las empresas como uno de los procesos fundamentales para su supervivencia, funcionamiento y expansión. Esto se debe a que la competitividad en el mercado cada vez es mayor y es necesario encontrar ventajas que permitan a las organizaciones mantenerse siempre en el mercado con los menores costos de operación. La globalización del mundo empresarial ha traído consigo un aumento importante de la competitividad debido a la apertura de nuevos mercados.

Esto obliga a las empresas a competir con entidades cuyos costos de personal, costos financieros, etc. son muy retadores. Es por ello que cualquier estrategia que consiga optimizar o mejorar los procesos importantes a nivel de costos constituye un factor decisivo para la supervivencia de la empresa. Muchos y terribles han sido los ejemplos de accidentes en los que una gestión deficiente del mantenimiento ha traído nefastas consecuencias, causando grandes tragedias humanas y ambientales y poniendo de manifiesto que esta tarea no puede limitarse simplemente a reparar fallos.

Así mismo, el mantenimiento es un proceso global dentro de la empresa, que involucra gestión de las operaciones, gestión de stocks, seguridad industrial, y no solamente ejecución del mantenimiento como tal. Es por ello que la consideración del mismo como un proceso más en la empresa permitirá mejorar su eficacia y eficiencia. La integración del proceso de gestión de mantenimiento aumentará la eficacia de la organización en la medida que exista una mejor comunicación entre los actores involucrados en el proceso y los demás departamentos dentro de la empresa. Así mismo, al estar integrado como una parte más de la empresa permitirá una mejor comunicación y una más adecuada transmisión de las necesidades de los distintos departamentos que redundará en una disminución de costes a largo plazo.

6.2 Proceso de Gestión del Mantenimiento.

El proceso de gestión de mantenimiento se puede dividir en dos partes principales:

- La definición de la estrategia de mantenimiento:

Requiere la definición de objetivos de mantenimiento como inputs, los cuales siempre deben estar orientados al objetivo del negocio de la organización. Es importante que las estrategias de mantenimiento estén alineadas a los objetivos del negocio.

- La implementación de la estrategia de mantenimiento:

Se encuentra enfocada en la habilidad para asegurar niveles adecuados de formación del personal, de preparación de los trabajos, selección de las herramientas adecuadas para realizar las diferentes tareas o, por ejemplo, con el diseño y consecución de la ejecución a tiempo de los diferentes programas de mantenimiento.

6.3 Eficacia y Eficiencia de la Gestión del Mantenimiento.

Eficacia: Muestra la bondad con que un departamento o función consigue los objetivos impuestos en base a las necesidades de la empresa. Es normal que la eficacia empresarial se mida en términos de calidad de servicio realizado por esa función, refiriéndonos siempre al punto de vista cliente y

proveedor. La eficacia entonces se concentra en lo correcto de los procesos y que estos procesos produzcan los resultados esperados. La eficacia del mantenimiento permitirá minimizar los costes indirectos de mantenimiento, todos aquellos costes asociados a la pérdida de producción y calidad de producción.

Eficiencia: Es la relación de actuar o producir con el mínimo esfuerzo, minimizando el desperdicio de los recursos y los gastos asociados al mismo. Lo importante es entonces mejorar el proceso de gestión, significa mejorar los costes directos de mantenimiento, es decir realizar un servicio de mantenimiento de igual o mejor calidad a un coste más competitivo.

6.4 Principios Básicos en la Definición de Estrategias de Mantenimiento.

Las estrategias de mantenimiento pueden realizarse utilizando métodos estándar de planificación de estrategia que generalmente incluyen:

Los objetivos corporativos del negocio y los objetivos de mantenimiento. Estos objetivos pueden incluir por ejemplo valores estimados de las siguientes variables: disponibilidad, fiabilidad, seguridad, riesgos, presupuesto, etc. Estos objetivos deben darse a conocer con todo el personal que está involucrado en mantenimiento.

Determinación de los indicadores del desempeño actual de las instalaciones productivas. Determinación de los medidores claves a considerar para la evaluación del rendimiento de las instalaciones (KPI's).

Determinación de una serie de principios que conducirá a la implementación de la estrategia, y que ayudará más adelante a condicionar la planificación, ejecución y análisis para la mejora continua de las actividades de mantenimiento.

6.4.1 Aspectos a Considerar a la Hora de Implementar Estrategias de Mantenimiento.

La estrategia de gestión de mantenimiento debe estar alineada a la estrategia de la empresa, esto debe hacerse a los tres niveles de actividad de la organización: estratégico o de dirección, activo o de proceso y operativo. Después de transformar los objetivos de la empresa a los objetivos de mantenimiento, buscando obtener un plan de mantenimiento genérico de la empresa, los gerentes deben crear un plan de mantenimiento a corto y largo plazo buscando atacar puntos débiles en el mantenimiento, la capacitación para mejorar habilidades con la tecnología también puede considerarse teniendo en cuenta que requieren inversión.

6.5 Modelo de Gestión del Mantenimiento Propuesto.

El modelo de gestión (MGM) (Crespo 2007) integra muchos de los modelos encontrados en la literatura hasta la fecha, y está compuesto por 8 Fases, como se puede observar en la figura 8.1.



Figura 6.1. Modelo de proceso de gestión del mantenimiento (MGM). (Crespo, 2007, Parra, y Crespo 2015).

De este modelo los primeros 3 condicionan la eficiencia de la gestión, los siguientes aseguran la eficiencia y la mejora de la siguiente manera: los bloques 4 y 5 son de planificación y programación de mantenimiento, los bloques 6 y 7 están enfocados a la evaluación y control de mantenimiento incluyendo los costos de los activos a lo largo de su vida útil. Y por último el bloque 8 se centra en asegurar la mejora continua.

6.5.1 Caracterización de la Estructura de Soporte al Modelo de Gestión del Mantenimiento.

La estructura consta de una serie de pilares que pueden clasificarse a continuación (Crespo y Gupta 2006):

Pilar de la Tecnología de la Información (Pilar IT): Aquí utilizamos las herramientas de soporte informático a la gestión de mantenimiento, entre ellos los ya conocidos: SAP PM, MAXIMO etc.

El Pilar de técnicas de ingeniería de mantenimiento: Aquí se incluyen herramientas como RCM, RCA, TPM, que permiten modelar el proceso de fallos, entre otras técnicas cuantitativas de optimización.

El pilar de técnicas para la mejora organizacional: Este pilar ayuda a promover una mejor competencia en la gestión de las relaciones inter y extra organizacionales.

6.5.2 Técnicas de Optimización para la Toma de Decisiones y Sistemas de Soporte para el MGM.

Las técnicas de optimización se basan en 8 fases las cuales pueden ser de mucha ayuda en los procesos para tomar decisiones en la gestión de mantenimiento:

Fase 1. Técnicas para definir la estrategia de gestión de mantenimiento.

Fase 2. Técnicas para jerarquizar los activos de producción.

Fase 3. Herramientas para eliminar los puntos débiles en equipos/sistemas de alto impacto.

Fase 4. Soporte para la correcta definición de un plan adecuado de mantenimiento preventivo.

Fase 5. Técnicas de optimización para la mejora de los programas de mantenimiento.

Fase 6. Control y supervisión de las operaciones de mantenimiento.

Fase 7. Instrumentos para análisis de costes de ciclo de vida del activo y para su control.

Fase 8. Técnicas para la mejora continua del mantenimiento.

6.5.3 Cuadro de Mando Integral e Indicadores Básicos de la Gestión del Mantenimiento.

En términos generales el desarrollo eficiente de un cuadro de mando integral, ayuda a los gerentes y administradores del negocio a centrarse en un puñado de medidas que son las más críticas para el éxito continuo de la organización. La experiencia de estas organizaciones pioneras indica que el cuadro de mando tiene su mayor impacto en el rendimiento del negocio sólo si es utilizado para conducir un proceso de cambio. Han sido muchas las veces que el BSC ha permitido el desarrollo de sistemas de gestión estratégicos que vinculan los objetivos estratégicos a largo plazo con planes de acción a corto plazo.

6.5.4 Cuadro de Mando Integral e Indicadores Claves de Desempeño Aplicados a la Gestión de Mantenimiento.

El modelo de proceso de gestión de mantenimiento se puede explicar en 8 fases que se dividen en:

Fase 1: Eficiencia, mejora y evaluación. En esta fase deben definirse los objetivos, estrategias y responsabilidades de mantenimiento.

Fase 2: Jerarquización de equipos en función de criterios definidos.

Fase 3: Análisis de puntos débiles en equipos definidos como críticos.

Fase 4: Mejoras de diseño de planes de mantenimiento preventivo y de los recursos necesarios.

Fase 5: Mejoras en programación del mantenimiento preventivo y asignación de los recursos necesarios para su realización.

Fase 6: Evaluación y control de la ejecución del mantenimiento.

Fase 7: Evaluación de ciclo de vida y posible renovación de equipos.

Fase 8: Implantación del proceso de mejora continua y adaptación de nuevas tecnologías.

Lo antes mencionado da una misión clara en cuanto a una visión de negocio y la estrategia, son un conjunto de medidas cuantificables que giran en torno a diversas perspectivas siendo cuatro las más básicas: la parte financiera desde el punto de vista del inversor, el rendimiento valorado por los clientes, la mejora de procesos internos que se definen económicamente y el aprendizaje para el crecimiento y mejora del mantenimiento. A lo largo de los años, el BSC ha permitido a los sistemas de gestión estratégicos vincular objetivos estratégicos que van desde objetivos a largo plazo hasta planes de gestión inmediatos, mediante pequeños cuadros de análisis que miden la acción, perspectiva y objetivos

estratégicos, a través del proceso interno del financiamiento lo cual generan una misión y estrategia denominada por la BSC como un cuadro de mando integral. Cuando se tiene un enfoque definido, es posible formular una estrategia para la operación de mantenimiento, teniendo opciones estratégicas para el desarrollo de la capacidad de horas hombre en la empresa, creando un enfoque específico utilizado como referente para contratación de servicios de mantenimiento, asegurando personal cualificado para la realización del mantenimientos, teniendo en cuenta que la estrategia de mantenimiento son objetivos a largo plazo, pero se desarrollan planes de mantenimiento, los cuales se vuelven los medios para alcanzar los fines estipulados que recaen en la organización e implementación de una revisión periódica del mantenimiento, funcionamiento y rendimiento siguiendo una estrategia.

6.5.5 La Importancia de la Selección Adecuada de los Indicadores de Mantenimiento.

La importancia adecuada de selección de los indicadores se basa en reforzar la visión y predicción de mantenimiento futuro, esto suele utilizarse para proporcionar información que impulse el entendimiento y la motivación como una herramienta para el control de las gestiones que puedan orientar esfuerzos hacia un pensamiento sistemático que asegure que los indicadores claves del rendimiento son un marco que se alineen con los objetivos que lo coloque en el máximo nivel de organización.

Teniendo en cuenta los puntos mencionados los KPI's deben desarrollarse en un nivel de rendimiento actual con futuros objetivos alejado de metas inalcanzables que desmotiven el proceso de organización sin dejar de ser exigentes, pero que puedan realizarse en base a tiempos realistas.

Los indicadores funcionales son la eficiencia del coste en mantenimiento por unidad producida que se deriva en la planificación y programación de mantenimiento con un cumplimiento de tareas de MP, que buscan la eficiencia de las operaciones mediante la realización de análisis de criticidad cada seis meses que generan una buena base de datos que brindan una integridad en los datos producidos.

6.6 Análisis de Criticidad o Jerarquización de Equipos.

Las técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten identificar y jerarquizar por su importancia los activos de una instalación sobre los cuales vale la pena dirigir recursos. En otras palabras, el proceso de análisis de criticidad ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los eventos potenciales de fallos de los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan.

Podemos tomar como referencia el Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) de 8 fases, esta sección describe las técnicas de jerarquización y criticidad y se relaciona con la Fase 2 del MGM (Parra, y Crespo, 2015) de la figura 8.1.

El término crítico y la propia definición de criticidad pueden tener diferentes interpretaciones dependiendo del objetivo que se está tratando de jerarquizar. El objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de un proceso de producción complejo, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable. Desde esta óptica existe una gran diversidad de posibles criterios que permiten evaluar la criticidad de un activo de producción. Los motivos de priorización pueden variar según las oportunidades y las necesidades de la organización.

Varias de las metodologías de análisis de criticidad a ser evaluadas están constituidas por métodos de priorización que generan resultados de criticidad sustentados en la teoría del riesgo, concepto que mezcla el factor fiabilidad y el factor severidad/consecuencia del fallo. Es importante mencionar que los resultados que se obtienen con la aplicación de las técnicas de criticidad, representan la materia prima con la cual se debe dar inicio a cualquier proceso de optimización basado en la aplicación de técnicas de Ingeniería de fiabilidad y mantenimiento.

6.6.1 Método de Análisis de Criticidad Semi Cuantitativo.

Este método desarrollado se apoya en el mismo concepto de riesgo que el Número de Prioridad de riesgo (RPN). Este método ha sido ampliamente desarrollado por consultoras internacionales. En ella se separan los dos aspectos que determinan el riesgo, que son la frecuencia de fallos y las consecuencias. La ventaja de este enfoque es que ayuda a mejorar y facilitar el análisis de las posibles mejoras, dado que con esta clasificación se conoce si el equipo es crítico por su frecuencia de fallos, severidad o ambos factores.

La expresión que determina el riesgo es la siguiente:

$$CTR = FF * C \quad (\text{Ec. 6.1})$$

Dónde:

CTR: Criticidad total por riesgo

FF: Frecuencia de fallos, contabilizada en nº de fallos/tiempo

C: Consecuencia de los fallos. En la evaluación de las consecuencias se pueden tener en cuenta diversos factores como la seguridad, el medio ambiente o las consecuencias del fallo en la producción.

El cálculo de las consecuencias se hará de manera análoga a la llevada a cabo en el cálculo del RPN. Una vez calculado su valor, los resultados serán presentados en una matriz con la topología que se observa en la Figura a continuación:

Frecuencia	F_n	MC	MC	C	C	C
	F_3	MC	MC	MC	C	C
	F_2	NC	NC	MC	C	C
	F_1	NC	NC	NC	MC	C
		C_1	C_2	C_3	C_4	C_n
		Consecuencias				

Figura 6.2. Tipología de matriz de criticidad.

Dónde:

NC: Representa el conjunto de equipos no críticos.

MC: Representa el conjunto de equipos semi-críticos.

C: Representa el conjunto de equipos críticos.
Cn: Valor umbral de las consecuencias del fallo.
Fn: Valor del intervalo máximo de la frecuencia de fallo.

En la figura puede verse cómo se hace efectiva la separación del riesgo en frecuencia y consecuencia, lo que ayuda a definir las posibles actuaciones paliativas sobre los fallos. Así mismo, cabe destacar que la separación entre estas tres categorías permitirá establecer políticas diferenciadas para el mantenimiento de los equipos, ayudando a la minimización del riesgo y a la optimización de costes.

6.7 Técnica de Análisis de Causa Raíz (Root Cause Analysis).

Ante la demanda constante de crecimiento de desarrollo de negocio en las empresas, en mantenimiento se han desarrollado diversas técnicas para analizar problemas (MDF, modos de fallo) que surgen en equipos y procesos críticos, siendo los objetivos principales de estas técnicas minimizar las averías repetitivas y asegurar una mayor fiabilidad operacional. Dentro de estas técnicas, el Análisis Causa Raíz (RCA) es una de las metodologías más utilizadas para minimizar el impacto de los fallos y optimizar la fiabilidad de los activos.

Dentro de este marco, la técnica de Análisis Causa Raíz es una de las herramientas con el mayor potencial para ayudar a cumplir los objetivos de minimización del impacto de los fallos y de maximización de la fiabilidad operacional.

Tomando como referencia el Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) de las 8 fases propuesto, las técnicas de Análisis Causa Raíz, forman parte de la Fase 3 del MGM.

La metodología de RCA se fundamenta en la necesidad de resolver problemas, los cuales son generalmente entendidos como un suceso que se desea vencer. El proceso de descubrimiento requiere de un cambio de pensamiento donde se debe abandonar el anterior, a esto se le ha llamado «cambio de paradigma» el cual es el fundamento del RCA. Las organizaciones, tradicionalmente se han inclinado a evaluar la fiabilidad operacional desde la perspectiva de mantenimiento estrictamente.

Existen en la bibliografía diversas técnicas y autores que han abordado lo que hoy recibe el nombre de métodos RCA y cuyo propósito ha sido el de buscar soluciones efectivas a los eventos de fallos. Las metodologías de RCA desarrolladas en la actualidad, ayudan a los analistas de problemas a orientarse, en los pasos a seguir y en las consideraciones que deben tomarse para la obtención de soluciones efectivas. Es importante mencionar, que no existen dos problemas exactamente iguales, sin embargo, dentro de un marco de pasos generales que conservan cierta flexibilidad, se pueden establecer ciertas reglas comunes que permitan identificar las causas que los originan. El éxito de la aplicación del RCA depende del esfuerzo de un equipo de trabajo y como tal requiere de cierta experiencia para vencer los paradigmas que tradicionalmente se encuentran en los procesos de análisis de fallos.

6.7.1 Implantación de metodología RCA.

Antes de abordar la descripción metodológica, es necesario hacerse la siguiente pregunta:

¿Cómo pueden resolverse los problemas efectivamente?

De acuerdo con Dean, 1999, deben considerarse cuatro pasos básicos para el proceso de aplicación de un RCA: Definición del problema, Análisis del problema, Identificación de soluciones e Implementación de las mismas.

6.7.1.1. ETAPA 1: Formación de equipo interdisciplinario.

El equipo de trabajo debe ser heterogéneo de tal manera que estén representadas distintas visiones del problema; el apoyo y la participación de los operadores es muy importante en el proceso RCA; ya que ellos conviven día a día con los problemas y generalmente aportan ideas muy valiosas para la resolución de los mismos.

Todos los miembros del equipo deben tener un conocimiento básico del proceso de Análisis de Causa Raíz; dentro del equipo de trabajo se debe designar una persona que coordine, dirija las actividades del grupo y promueva una participación activa de todos los integrantes.

6.7.1.2. ETAPA 2: Definición y jerarquización de los problemas.

Consiste en describir el evento con hechos, se debe incluir atributos cuantitativos y cualitativos de la consecuencia; esto es especificar la naturaleza, la magnitud, la ubicación y el momento del hecho. Se debe proveer información muy precisa del problema a resolver y evitar que existan diversas interpretaciones de los miembros del equipo.

Se ha definido el problema correctamente cuando sucede lo siguiente: La enunciación del problema es clara y práctica. El equipo ha llegado a un consenso acerca de la enunciación del problema. El equipo está de acuerdo con el fundamento acerca del motivo por el que el problema y su solución son importantes. El problema está en su área de control, de modo que el equipo puede asumir la responsabilidad real de resolverlo. (Ruiz-Falcó, 2009).

6.7.1.3. ETAPA 3: Definición y priorización de los modos de fallos.

Con la aplicación de herramientas de calidad y con el soporte del equipo de trabajo; el objetivo es llegar hasta la fuente del problema, descubrir las causas raíz y analizar la fuente del problema para obtener evidencias y hechos.

6.7.1.4. ETAPA 4: Definición y validación de hipótesis.

La tormenta de ideas es una técnica de grupo que permite la obtención de un gran número de ideas sobre un determinado tema de estudio. Esta técnica incrementa la participación y creatividad del grupo de trabajo enfocándola hacia un tema específico, de forma estructurada y sistemática. Complementa las distintas visiones de un problema, de modo que se vislumbren nuevas perspectivas. (Fundación Iberoamericana para la Gestión de Calidad, 2009).

6.7.1.5. ETAPA 5: Definición y validación de causas raíces.

Una vez identificadas las hipótesis, el equipo de trabajo procede a definir las posibles causas raíces para cada una de las hipótesis validadas. La metodología propone identificar y clasificar las causas raíces en tres categorías (Latino & Latino, 2002):

Causa Raíz Física (CRF): Se refiere al tipo de causas raíces que envuelven materiales o cosas tangibles.

Causa Raíz Humana (CRH): Se refiere al tipo de causas raíces que generan fallos debido a una intervención inapropiada del ser humano (errores humanos).

Causa Raíz Latente (CRL): Se refiere al tipo de causas raíces relacionadas con la falta o deficiencia en los sistemas de gestión y administrativos (reglas, procedimientos, guías, etc.) o “normas culturales” que permiten que un fallo ocurra.

6.7.1.6. ETAPA 6: Definición y evaluación de la efectividad de las soluciones propuestas.

En esta etapa los integrantes del grupo evalúan los diferentes indicadores así como los costos generados por fallas ocurridas, en caso de no verse una mejora en la tendencia debe aplicarse nuevamente el RCA.

VII. Metodología

Como se menciona en el capítulo anterior, una estrategia de mantenimiento debe encontrarse alineada con los intereses de la alta dirección, debido a que el objetivo primordial debe ser disminuir los costos de operación a la vez que se busca obtener la mayor rentabilidad y disponibilidad de los equipos.

Cada organización y proceso cuenta con particularidades inherentes a su naturaleza, por lo tanto la estrategia de gestión del mantenimiento debe estar diseñada en función de cada proceso y organización.

Específicamente en el caso de la planta de biomasa debe implementarse una estrategia de mantenimiento con bases sólidas para hacerla sostenible en el tiempo, teniendo en cuenta que en la actualidad no se cuenta con una estrategia definida.

En la presente investigación se realizarán las tres primeras fases del modelo de gestión de mantenimiento propuesto por Crespo y Parra (2019), la siguiente figura muestra el ciclo de mejora completo y dentro del rectángulo rojo se muestran las fases a desarrollar dentro de este documento.

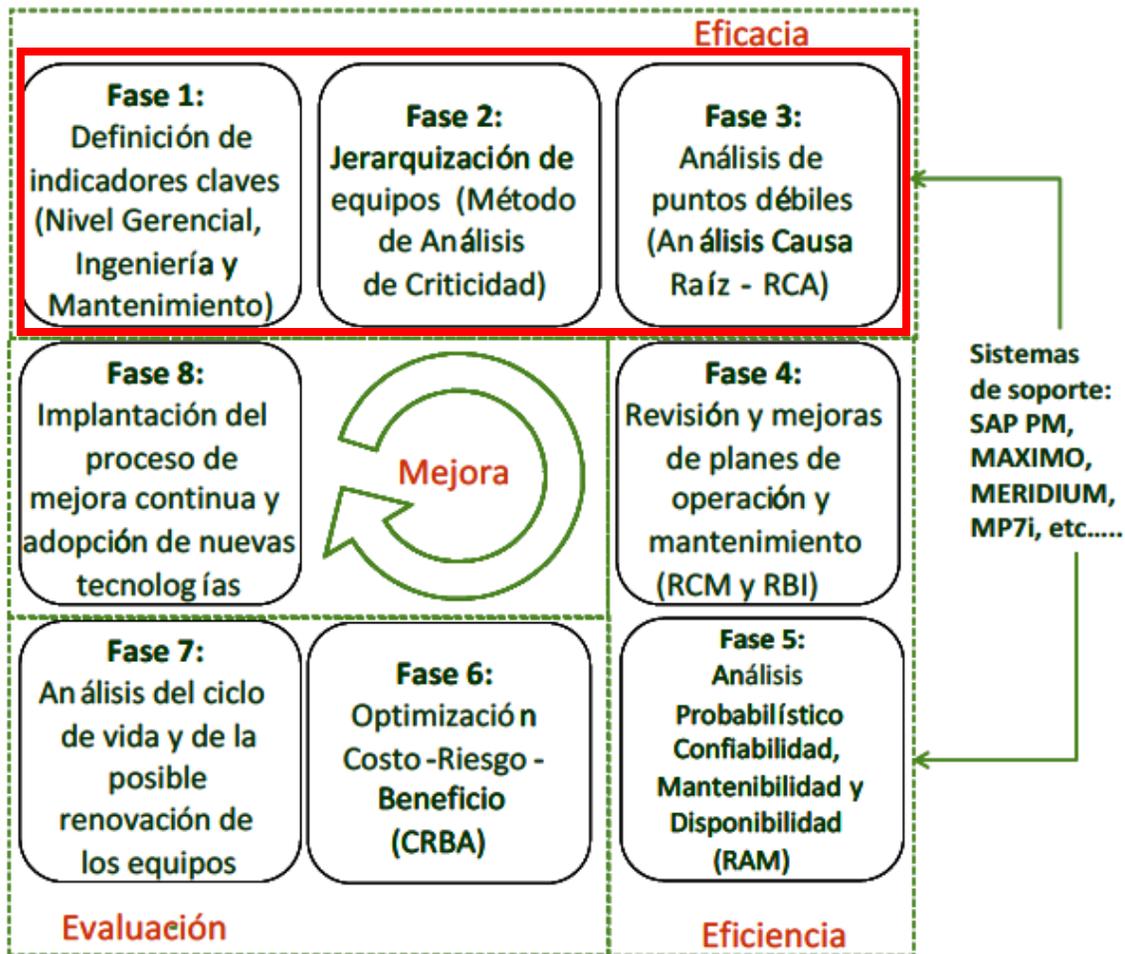


Figura 7.1. Modelo del proceso de gestión de mantenimiento (Parra y Crespo 2015).

7.1 Establecimiento de indicadores iniciales.

Los indicadores claves de desempeño, conocidos como KPI's por sus siglas en inglés (Key Performance Indicators) traducen los intereses de la alta dirección en objetivos cuantificables a través de los cuales se puede medir y posteriormente controlar y mejorar el desempeño de la gestión de mantenimiento.

En el caso particular de la planta de biomasa, al momento de iniciar con este trabajo no se contaba con indicadores de mantenimiento que describieran el desempeño histórico de la planta. Por lo tanto una de las primeras reuniones sostenidas con el personal encargado de mantenimiento y operación de la planta fue sobre lo que era necesario medir.

Debido a que el objetivo fundamental de la planta de biomasa es producir vapor para alimentar máquinas teñidoras de tela, el principal indicador sería la cantidad de vapor producido, sin embargo al inicio del estudio no se contaba con un medidor de vapor, en ese sentido para poder iniciar con el establecimiento de indicadores se acordó en conjunto con el personal de operación y mantenimiento de la planta el establecimiento de los siguientes indicadores:

- Frecuencia de fallas.
- Tiempo medio de fallas.

- Costes de indisponibilidad por fallos.
- Disponibilidad.

7.1.1. Frecuencia de fallas (FF)

El KPI frecuencia de falla, se definió en conjunto con el equipo de mantenimiento y operación de la planta de biomasa que se mediría por semana, es decir el número de fallas ocurrido por equipo en una semana.

$$FF = \frac{\# \text{ de fallas}}{\text{semana}} \quad (\text{Ec. 7.1})$$

7.1.2. Tiempo promedio de fallas (MDT)

El tiempo medio de fallas conocido como MDT por sus siglas en inglés (Mean Down Time), es el tiempo que toma a un equipo volver a sus condiciones normales de operación desde que ha ocurrido una falla. Se determinó que este indicador se mediría en horas por semana.

$$MDT = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} DT_i}{n} \quad (\text{Ec. 7.2})$$

Donde:

n: Número de fallas ocurridas en una semana.

DT_i : Tiempos fuera de servicio.

7.1.3. Costes de indisponibilidad por fallas (CIF)

Mide los costos ocasionados por las consecuencias de un fallo y los costos de reparación de directos de dicha falla en un periodo de tiempo de una semana.

$$CIF = FF \times MDT \times (CD + CP) \quad (\text{Ec. 7.3})$$

Donde:

FF: Frecuencia de fallas.

MDT: Tiempo medio de fallas.

CD: Costos directos causados por falla por unidad de tiempo.

CP: Costos de penalización por unidad de tiempo.

7.1.4. Disponibilidad (D)

Mide el tiempo que un equipo cumple sus funciones operativas. Se contabiliza como la razón del tiempo que los equipos trabajan realizando sus funciones operativas y el tiempo total que los equipos deberían haber realizado su función operativa.

$$D = \frac{\text{Tiempo operativo de un equipo}}{\text{Tiempo total de funcionamiento de un equipo}} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Este indicador se mide en porcentaje.

7.2 Jerarquización de Equipos: Modelo de Criticidad Semicuantitativo.

Las técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten distribuir de manera eficiente los recursos, ya sean económicos, humanos, tecnológicos, etc. dirigiéndolos a los equipos cuyas consecuencias de falla generan un mayor impacto ya sea en la interrupción de la producción del producto o servicio, en este caso vapor, en los costos generados por la falla ocurrida o en ambas.

La finalidad de las técnicas de análisis de criticidad es determinar la importancia de las fallas ocurridas a los equipos que forman parte de una cadena de valor, para identificar qué equipos provocan las peores consecuencias en los procesos de producción y enfocar los recursos para tratar de disminuir las pérdidas lo más que se pueda.

Existen diferentes métodos de jerarquización de equipos, en este caso se utilizará el modelo de criticidad semicuantitativo "CTR", también conocido como Criticidad Total por Riesgo.

Como se describió anteriormente el modelo de criticidad total por riesgo, se basa en un análisis semicuantitativo que se obtiene como resultado de la multiplicación de la frecuencia de fallas y la severidad de las fallas ocurridas.

La expresión matemática utilizada para calcular la criticidad total por riesgo de los equipos es la siguiente:

$$CTR = FF \times CF \quad (\text{Ec. 7.5})$$

Donde:

CTR: Criticidad total por riesgo.

FF: Frecuencia de fallas.

CF: Consecuencia de las fallas ocurridas.

Además la variable CF de la ecuación (7.5), está definida por la siguiente expresión:

$$CF = (IO \times FO) + CMtto. + SHA \quad (\text{Ec. 7.6})$$

Donde:

IO: Factor de impacto en la producción.

FO: Factor de flexibilidad operacional.

CMtto.: Factor de costes de mantenimiento.

SHA: Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente.

Teniendo una expresión matemática final para el cálculo de criticidad total por riesgo como sigue:

$$CTR = FF \times [(IO \times FO) + CMtto. + SHA] \quad (\text{Ec. 7.7})$$

Luego de definir la expresión para el cálculo de la criticidad total por riesgo se procedió a elaborar las escalas ponderadas asociadas a cada término de la ecuación, las cuales son el resultado de diversas reuniones en conjunto con el equipo de operación y mantenimiento de la planta de biomasa. Las escalas fueron definidas en base a los indicadores de mantenimiento implementados en la planta.

7.2.1 Factor Frecuencia de fallas. (Escala 1 – 5).

Ponderación	Nivel de frecuencia de fallas	Descripción de nivel
5	Muy frecuente	Mayor a 2 eventos por semana.
4	Frecuente	1 a 2 eventos al mes.
3	Promedio	Menos de 1 evento al mes.
2	Bueno	Menos de 1 evento cada 6 meses.
1	Excelente	Menos de 1 evento cada 9 meses.

Tabla 7.1. Ponderación del factor frecuencia de fallas.

7.2.2 Factores de consecuencias de fallas.

- Impacto operacional. (Escala 1 – 5).

Ponderación	Nivel de impacto operacional	Descripción de nivel
5	Muy alto	Pérdidas de producción superior al 75%.
4	Alto	Pérdidas de producción entre el 50% - 74%.
3	Sensible	Pérdidas de producción entre 25% - 49%.
2	Moderado	Pérdidas de producción entre 10% - 24%.
1	Bajo	Pérdidas de producción menor al 10%.

Tabla 7.2. Ponderación del factor de consecuencia impacto operacional.

- Impacto por flexibilidad operacional. (Escala 1 – 5)

Ponderación	Nivel de flexibilidad operacional	Descripción de nivel
5	Equipos únicos.	No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.
3	Equipos reemplazables en periodos cortos de tiempo.	Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.
1	Equipos que cuentan con redundancia dentro de la planta.	Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.

Tabla 7.3. Ponderación del factor de consecuencia flexibilidad operacional.

- Impacto en costes de mantenimiento. (Escala 1-5)

Ponderación	Nivel de costes de mantenimiento	Descripción de nivel
5	Muy altos	Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a \$20,000.
4	Altos	Costes de reparación, materiales y mano de obra entre \$10,000 y \$20,000.
3	Moderados	Costes de reparación, materiales y mano de obra entre \$5,000 y \$10,000.
2	Bajos	Costes de reparación, materiales y mano de obra entre \$1,000 y \$5,000.
1	Muy bajos	Costes de reparación, materiales y mano de obra menores a \$1,000.

Tabla 7.4. Ponderación del factor de consecuencia costes de mantenimiento.

- Impacto en seguridad, higiene y ambiente. (Escala 1-5)

Ponderación	Nivel de seguridad, higiene y ambiente	Descripción de nivel
5	Alto riesgo	Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o accidente ambiental mayor (catastrófico) que excedan los límites permitidos.
4	Riesgoso	Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración.
3	Riesgo moderado	Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas.
1	Riesgo mínimo	No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales.

Tabla 7.5. Ponderación del factor de consecuencia seguridad, higiene y ambiente.

Luego de definidos los niveles para cada variable, se procede a realizar la valoración de los equipos, esto fue realizado en conjunto con el personal de operación y mantenimiento de la planta de biomasa.

Equipo	Frecuencia de fallas	Impacto Operacional	Flexibilidad operacional	Impacto en costes de mantenimiento	Impacto en seguridad, higiene y ambiente
Motosierras cortadoras de madera	3	1	1	1	4
Bandit	5	5	3	5	5
Rastras transportadoras de biomasa	3	3	1	1	3
Bobcat	3	2	1	2	3
Cortadora de troncos	2	1	1	1	3
Grúa	3	4	5	2	1
Cucharón	4	4	3	5	3
Caldera	2	5	5	1	4

Tabla 7.6. Clasificación de los distintos equipos según cada criterio de riesgo evaluado.

Para definir el nivel de criticidad de cada equipo se toman los totales de los valores principales, los cuales son frecuencia de fallas y consecuencias de los fallos. En conjunto con el equipo de trabajo se define una matriz de criticidad dentro de la cual se ubicaran los diferentes equipos en función de los puntajes obtenidos.

En conjunto con el equipo de trabajo de la planta de biomasa, luego de generar una lluvia de ideas se estableció que la matriz de criticidad estará formada por cuatro niveles de criticidad:

- MC: Muy críticos.
- C: Críticos.
- CM: Criticidad moderada.
- BC: Baja criticidad.

En el eje vertical de la matriz de criticidad se evalúa el factor de frecuencia de falla asignado a cada equipo, mientras que en el eje horizontal se evalúan las consecuencias de los fallos ocurridos, es decir el resultado de la expresión matemática (7.6).

La matriz de criticidad a utilizar es la siguiente:

Frecuencia de Fallas	5	C	MC	MC	MC	MC	MC
	4	C	C	C	C	C	MC
	3	CM	CM	C	C	C	MC
	2	BC	BC	CM	CM	CM	CM
	1	BC	BC	BC	CM	CM	CM
		5	10	15	20	25	30
		Consecuencias de fallas ocurridas					

Los equipos que se encuentren clasificados como críticos y muy críticos serán los que se tomarán en cuenta para la continuación del estudio.

7.3 RCA equipos críticos.

El Análisis de Causa Raíz es una de las metodologías más utilizadas en las estrategias de gestión de mantenimiento, ya que a través de un razonamiento lógico evalúa el origen real de las fallas ocurridas así como el impacto que estas fallas generan. En este documento se procederá a realizar un análisis de causa raíz a los equipos considerados como críticos y muy críticos en el apartado anterior, los cuales son Bandit, cucharón STEEMM 2CH y grúa GHD4t.

En la siguiente tabla se muestra un inventario detallado de los equipos críticos que serán incluidos en el RCA.

Equipo	Marca	Modelo	Año	Cantidad equipos
Picadora de madera.	Bandit	990	2013	1
Picadora de madera.	Bandit	18XP	2017	1
Grúa.	GHD	4t	2012	1
Cucharón hidráulico.	Stemm	2CH	2012	1

Tabla 7.7. Inventario de equipos críticos.

El método RCA propone la realización de un análisis profundo de las causas que provocan las fallas para poder atacarlas y buscar una solución en función de las causas, lo cual es contrario a lo que generalmente suele hacerse, que es emitir juicios y soluciones sin analizar profundamente qué causas han generado la falla.

A continuación se muestra el flujograma para la realización de un análisis RCA:

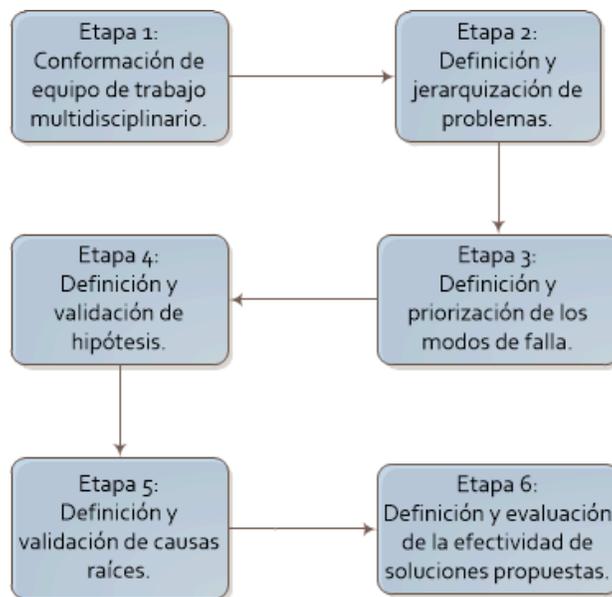


Figura 7.2 Flujograma de pasos para realización de un Análisis de Causa Raíz (RCA).

7.3.1 Etapa 1: Conformación del equipo de trabajo RCA.

En esta etapa se conforma un equipo multidisciplinario, dentro del cual se incluyen personas de los diferentes departamentos de la organización pero que se encuentran involucrados en el proceso productivo y operativo de la planta de biomasa.

7.3.2 Etapa 2: Definición y jerarquización de los problemas.

Con la finalidad de describir la magnitud del problema, se procede a responder en conjunto con el equipo de trabajo las preguntas que se muestran en la siguiente tabla.

Pregunta	Descripción
¿Qué?	¿Qué fue lo que ocurrió? ¿Cuál fue la falla presentada por el equipo en cuestión?
¿Cuándo?	¿En qué momento ocurrió?
¿Dónde?	¿En qué lugar ocurrió?
¿Importancia?	Se cuantifica el daño y las consecuencias utilizando la siguiente expresión matemática: $R = FF \times MDT \times CD \quad (\text{Ec. 7.8})$ Donde: FF: Frecuencia de fallas. MDT: Tiempo promedio fuera de servicio. CD: Costos promedios directos por fallo por hora.

Tabla 7.8. Criterios utilizados para definir y jerarquizar los problemas ocurridos.

7.3.3 Etapa 3: Definición y priorización de los modos de fallo.

En la etapa anterior se procedió a definir cada uno de los modos de fallos y el impacto que cada uno tiene evidenciando los costos generados por cada equipo crítico; en esta etapa se sugiere realizar un análisis de Pareto y enfocarse en los modos de fallos con mayor importancia.

En conjunto con el equipo de trabajo, se evalúan las fallas registradas y el costo que cada una de estas ha ocasionado al funcionamiento de la planta, luego de definir los costos de cada modo de fallo, deben priorizarse los más críticos.

En esta etapa se sugiere calcular el valor de riesgo total anualizado, el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$RTA = [FF \times (CMO + CMat)] + [FF \times MDT \times IP] \quad (\text{Ec. 7.9})$$

Donde:

RTA: Riesgo total anualizado, \$/año.

FF: Frecuencia de fallas, No. de fallas /año.

CMO: Costos de mano de obra por fallo, \$/fallo.

CMat: Costos de materiales por fallo, \$/fallo.

MDT: Tiempo de reparación, horas/fallo.

IP: Impacto en producción: \$/hora.

En la siguiente tabla se muestran los valores correspondientes a cada variable de la ecuación riesgo total anualizado (7.9), posteriormente en el capítulo de resultados se realizará la jerarquización de las fallas con mayor valor de riesgo de los tres equipos críticos a analizar.

Equipo	Modo de fallo	FF/año	MDT (horas/falla)	CMO + CMat (\$/falla)	IP (\$/hora) ¹
Bandit 18XP	Fractura de chumacera derecha de tambor.	1	237.6	\$ 3,681.86	\$ 331.25
Bandit 18XP	Fallo de rosca de chumacera de rodillo de alimentación inferior.	3	45.65	\$ 251.67	\$ 331.25
Bandit 18XP	Fractura de pin cónico de acople de motor hidráulico superior.	3	91.41	\$ 71.67	\$ 331.25
Bandit 18XP	Fractura de espiga de rodillo de alimentación superior.	1	25.96	\$ 325.00	\$ 331.25
Bandit 18XP	Fractura de carcasa de chumacera de rodillo alimentador inferior.	1	29.21	\$ 139.90	\$ 331.25
Bandit 18XP	Fisuras en Tambor.	2	56.43	\$ 250.00	\$ 331.25
Bandit 18XP	Ruptura de conexión de solenoide de válvula de control rodillos alimentadores.	1	14.74	\$ -	\$ 331.25
Bandit 990	Fallo en resortes de yugo.	1	18.15	\$ 813.60	\$ 331.25
Bandit 990	Fractura de pernos de sujeción de yunque.	2	26.73	\$ 84.88	\$ 331.25
Bandit 990	Fallo de cuña de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador superior.	1	25.08	\$ 175.00	\$ 331.25
Bandit 990	Fuga de motor hidráulico superior.	3	7.59	\$ 211.54	\$ 331.25
Bandit 990	Fuga de aceite en motor hidráulico de alimentación inferior.	2	11.55	\$ 532.58	\$ 331.25
Bandit 990	Fallo de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador inferior.	1	2.31	\$ 175.00	\$ 331.25
Bandit 990	Fuga de aceite de manguera de alta presión.	3	0.99	\$ 154.36	\$ 331.25
Cucharón STEMM 2CH	Fractura de eje de articulación superior y estructura.	1	486.98	\$ 4,434.78	\$ 18.86
Cucharón STEMM 2CH	Desgaste en bomba hidráulica.	1	56	\$ 3,876.00	\$ 26.69
Cucharón STEMM 2CH	Sobrecalentamiento.	1	34	\$ 120.00	\$ 26.69
Cucharón STEMM 2CH	Fractura de rotula de articulación inferior izquierda.	1	29	\$ 700.00	\$ 4.68
Grua GHD 4t	Rotura de cable de acero.	1	112	\$ 273.00	\$ 26.69
Grua GHD 4t	Fractura de freno de motor principal de elevación.	1	40	\$ 75.00	\$ 33.04
Grua GHD 4t	Fractura de ventilador de motor principal de elevación.	1	1	\$ 36.00	\$ 33.04

Tabla 7.9. Parámetros de modos de fallo para cálculo de riesgo total anualizado.

¹ Ver anexo 1.

7.3.4 Etapa 4: Definición y validación de hipótesis.

Luego de jerarquizar los modos de fallo que más impactan la producción en la cadena de valor de la planta de biomasa, se procede en conjunto con el equipo de trabajo a responder la siguiente pregunta para cada modo de falla:

¿Por qué ocurren los modos de fallos?

Esta pregunta debe responderse con diferentes hipótesis, de las cuales únicamente se analizarán las hipótesis validadas como verdaderas para su posterior análisis.

Se define una escala de probabilidad de ocurrencia para cada hipótesis, en este caso se utilizará la siguiente:

Tipo de hipótesis	Probabilidad de ocurrencia de hipótesis
Tipo A	Probabilidad alta
Tipo B	Probabilidad media
Tipo C	Probabilidad baja

Tabla 7.10. Clasificación de probabilidad de ocurrencia de hipótesis de modos de fallo.

7.3.5 Etapa 5: Definición y validación de causas raíces.

Luego de tener las posibles hipótesis que podrían generar los diferentes modos de fallo, el grupo de trabajo debate en conjunto para definir las causas raíces, las cuales pueden ser físicas, humanas o latentes, utilizando la siguiente nomenclatura:

- Causa raíz física (CRF).
- Causa raíz humana (CRH).
- Causa raíz latente (CRL).

7.3.6 Etapa 6: Definición y evaluación de la efectividad de las soluciones propuestas.

Luego de definir las causas raíces para cada modo de falla, se procede en conjunto con el equipo de trabajo a definir recomendaciones y acciones específicas que ataquen directamente la causa raíz de las fallas generadas, también se define el tiempo de ejecución de las medidas tomadas y los encargados de realizarlas, las mejoras obtenidas deben reflejarse en los indicadores de mantenimiento previamente definidos. Luego de ejecutadas las soluciones y recomendaciones se procede a evaluar la efectividad de las medidas realizadas, en caso de no ver mejora de repetirse el ciclo del análisis de causa raíz.

El flujograma utilizado para definir si las recomendaciones y soluciones resultado del análisis de causa raíz son las correctas o no, es el siguiente:

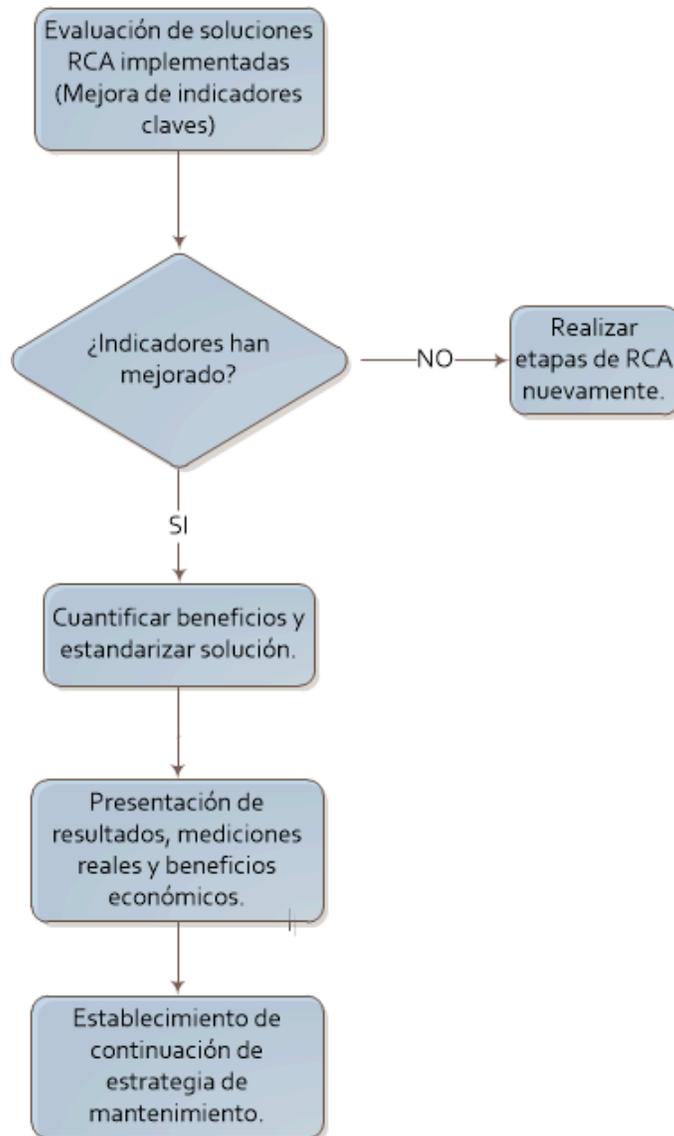


Figura 7.3. Flujograma de aplicación de metodología causa raíz.

Finalmente se realizará un análisis de los beneficios económicos obtenidos luego de implementar las soluciones establecidas en el RCA, así como también las mejoras en los indicadores de mantenimiento.

VIII. Desarrollo y Resultados.

En cada uno de los apartados siguientes se muestran los resultados obtenidos al ejecutar la metodología descrita anteriormente.

8.1 Establecimiento de indicadores iniciales.

Debido a que al inicio de esta investigación en la planta de biomasa no se contaba con indicadores de mantenimiento, se procedió luego de realizar un consenso con el equipo de trabajo a implementar los siguientes indicadores:

- Frecuencia de fallos (FF).
- Tiempo medio de duración de fallas (MDT).
- Costes de indisponibilidad por fallas (CIF).
- Disponibilidad (D).

Los resultados obtenidos durante los 2 primeros meses de medición se presentan en la siguiente tabla:

Equipo	FF (fallas/mes)		MDT (horas/mes)		Disponibilidad	
	Julio	Agosto	Julio	Agosto	Julio	Agosto
Motosierras	0.6	0.5	2	5	99.73%	99.33%
Bandit	4	9	132.66	26.51	67.34%	89.78%
Rastras	3	3.5	24	50	96.77%	93.28%
Bobcat	3	1	35	240	95.30%	67.74%
Cucharón STEEMM	2	1	45	230	93.95%	69.09%
Grúa GHD	1	2	112	20.5	84.95%	97.24%
Caldera	0	1	0	3	100.00%	99.60%
Cortadora de troncos*	-	-	-	-	-	-

Tabla 8.1. Indicadores correspondientes a julio y agosto equipos de planta biomasa. *En el caso de la cortadora de troncos no se cuenta con indicadores ya que fue adquirida en el mes de septiembre.

Inicialmente el indicador de costes de indisponibilidad por fallas no se tomó en cuenta debido a que no se contaba con un método de recolección de datos que permitiera calcularlo en ese momento.

Durante los primeros dos meses de análisis, los equipos que presentaban una mayor oportunidad de mejora son los marcados en rojo en la tabla 8.1. sin embargo, se procedió a aplicar el análisis de criticidad de equipos utilizando los criterios definidos en el apartado 7.2.

8.2 Jerarquización de equipos según el método de criticidad semicuantitativo “CTR” (Criticidad Total por Riesgos).

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de realizar el método de jerarquización y análisis de criticidad semicuantitativo.

Como se describió en el capítulo anterior, se asignó un factor de criticidad a cada equipo, obteniendo dos factores principales, el primero corresponde a la frecuencia de falla de los equipos y el segundo corresponde a las consecuencias generadas por la falla ocurrida, lo cual corresponde a la expresión matemática (7.5), en la siguiente tabla se puede observar la clasificación de cada equipo con respecto a la matriz de riesgos definida en el capítulo anterior.

Equipo	Frecuencia de fallas	Impacto Operacional	Flexibilidad operacional	Impacto en costes de mantenimiento	Impacto en seguridad, higiene y ambiente	Frecuencia	Consecuencias	Total CTR	Jerarquización (Tipo de criticidad)
Motosierras	3	1	1	1	4	3	6	18	Moderada
Bandit	5	5	3	5	5	5	25	125	Muy crítico
Rastras	3	3	1	1	3	3	7	21	Moderada
Bobcat	3	2	1	2	3	3	7	21	Moderada
Cortadora de troncos	2	1	1	1	3	2	5	10	Baja
Grúa	3	4	5	2	1	3	23	69	Crítico
Cucharón	4	4	3	5	3	4	20	80	Crítico
Caldera	2	5	5	1	4	2	30	90	Moderada

Tabla 8.2. Jerarquización semicuantitativa de los equipos CTR.

En la tabla siguiente se muestra el orden según la jerarquización semicuantitativa CTR de los equipos.

Equipo	Total CTR ²	Jerarquización	Ranking
Bandit	125	Muy crítico	1
Cucharón	80	Crítico	2
Grúa	69	Crítico	3
Caldera	90	Criticidad moderada	4
Bobcat	21	Criticidad moderada	5
Rastras transportadoras de biomasa	21	Criticidad moderada	6
Motosierras cortadoras de madera	18	Criticidad moderada	7
Cortadora de troncos	10	Baja criticidad	8

Tabla 8.3. Ranking de jerarquización de equipos utilizando el método de análisis semicuantitativo CTR.

² Valor CTR se calculó en tabla 8.2.

8.3 RCA equipos críticos.

Como se menciona en el capítulo anterior, se siguen una serie de etapas para la realización de un análisis RCA de equipos críticos previamente definidos, a continuación se presentan los resultados obtenidos en cada etapa.

8.3.1 Etapa 1. Conformación del equipo de trabajo RCA.

Se procedió a la conformación del equipo de trabajo, en el cual se incluye personal administrativo y operativo, con la finalidad de tener la opinión de todos los involucrados y definir en qué manera cada uno se ve afectado.

El equipo en cuestión está formado por las siguientes figuras:

- Gerente financiero.
- Ingeniero de operación de la planta de biomasa.
- Ingeniero de mantenimiento.
- Mecánicos de la planta de biomasa.
- Operadores de la planta de biomasa.

8.3.2 Etapa 2: Definición y jerarquización de problemas.

Se procedió a definir los problemas, respondiendo las diferentes preguntas propuestas por la metodología: ¿Qué equipo falló?, ¿Qué ocurrió?, ¿Cuándo ocurrió la falla?, ¿En qué lugar ocurrió? La información recabada se muestra en la siguiente tabla:

¿Qué equipo falló?	¿Qué ocurrió?	¿Cuándo?	¿Dónde ocurrió?
Bandit 18XP	Fractura de rodamiento derecho de tambor.	7/3/2019	Área de picado de madera
Cucharón STEMM 2CH	Sobrecalentamiento.	7/4/2019	Planta de biomasa
Cucharón STEMM 2CH	Desgaste en bomba hidráulica.	7/8/2019	Planta de biomasa
Bandit 990	Fractura de pernos de sujeción de yunque.	7/10/2019	Área de picado de madera
Grúa GHD 4t	Rotura de cable de acero.	7/13/2019	Planta de biomasa
Bandit 990	Fuga de aceite de manguera de alta presión.	7/24/2019	Área de picado de madera
Bandit 990	Fallo de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador inferior.	7/29/2019	Área de picado de madera
Bandit 990	Fallo de cuña de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador superior.	8/2/2019	Área de picado de madera
Grúa GHD 4t	Fractura de ventilador de motor principal de elevación.	8/6/2019	Planta de biomasa
Bandit 990	Fallo en resortes de yugo.	8/12/2019	Área de picado de madera
Grúa GHD 4t	Fractura de freno de motor principal de elevación.	8/13/2019	Planta de biomasa
Bandit 18XP	Fractura de pin cónico de acople de motor hidráulico superior.	8/14/2019	Área de picado de madera
Bandit 18XP	Fractura de pernos de sujeción de yunque.	8/18/2019	Área de picado de madera
Bandit 18XP	Fractura de espiga de rodillo de alimentación superior.	8/21/2019	Área de picado de madera
Bandit 990	Fuga de motor hidráulico superior.	8/21/2019	Área de picado de madera
Cucharón STEMM 2CH	Fractura de eje de articulación superior y estructura.	8/22/2019	Planta de biomasa
Bandit 990	Falta de Presión en hidráulico superior.	8/27/2019	Área de picado de madera
Bandit 990	Falta de presión a motor hidráulico de alimentación inferior.	8/28/2019	Área de picado de madera
Bandit 18XP	Ruptura de conexión de solenoide de válvula de control rodillos alimentadores.	8/30/2019	Área de picado de madera
Cucharón STEMM 2CH	Fractura de eje de articulación superior y estructura.	9/1/2019	Planta de biomasa
Bandit 18XP	Fisuras en tambor.	9/6/2019	Área de picado de madera
Bandit 990	Fuga de aceite en motor hidráulico de alimentación.	9/7/2019	Área de picado de madera
Bandit 990	Fractura de pin cónico de acople de motor hidráulico inferior.	9/13/2019	Área de picado de madera
Bandit 18XP	Fisuras en tambor.	9/14/2019	Área de picado de madera
Bandit 18XP	Fractura de pin cónico de acople de motor hidráulico superior.	9/18/2019	Área de picado de madera
Bandit 18XP	Fractura de carcasa de chumacera de rodillo alimentador inferior.	9/19/2019	Área de picado de madera
Bandit 18XP	Fallo de rosca de chumacera de rodillo de alimentación inferior.	9/23/2019	Área de picado de madera

¿Qué equipo falló?	¿Qué ocurrió?	¿Cuándo?	¿Dónde ocurrió?
Bandit 990	Fuga de aceite en motor hidráulico de alimentación.	9/25/2019	Área de picado de madera
Cucharón STEMM 2CH	Fractura de rotula de articulación inferior izquierda.	9/28/2019	Planta de biomasa
Bandit 18XP	Fallo de rosca de chumacera de rodillo de alimentación inferior.	10/5/2019	Área de picado de madera
Bandit 990	Ruptura de manguera de alta presión.	10/5/2019	Área de picado de madera
Bandit 990	Fallo de rosca de chumacera de rodillo de alimentación inferior.	10/11/2019	Área de picado de madera
Bandit 18XP	Ruptura de manguera de alta presión.	11/25/2019	Área de picado de madera

Tabla 8.4. Definición de fallos de equipos ocurridos en planta de biomasa.

8.3.3 Etapa 3: Definición y priorización de modos de fallo.

Luego de contar con el registro de fallas ocurridas se procedió a definir el riesgo total anualizado de cada modo de fallo en función de los costos generados, identificando qué modos de falla representan el 80% de los costos generados por cada equipo. Los modos de fallo que representan el 80% de los costos aparecen resaltados en las tablas.

La fórmula utilizada para calcular el coste de fallos fue:

$$RTA = [FF \times (CMO + CMat)] + [FF \times MDT \times IP] \quad (\text{Ec. 8.1})$$

Donde:

RTA: Riesgo total anualizado, \$/año.

FF: Frecuencia de fallas, No. De fallas /año.

CMO: Costos de mano de obra por fallo, \$/fallo.

CMat: Costos de materiales por fallo, \$/fallo.

MDT: Tiempo de reparación, horas/fallo.

IP: Impacto en producción: \$/hora.

En el caso del valor FF, se contabilizó cada uno de los modos de fallo listados en la tabla 8.4. Por otra parte los valores monetarios de CMO y CMat, se extrajeron del software de compras utilizado en la empresa. El tiempo promedio de reparación de cada modo de fallo fue registrado y posteriormente proporcionado por el ingeniero encargado de la planta de biomasa.

- Bandit.

Modo de fallo	FF/año	MDT (horas)	(CMO+CMat)/falla	IP/hora	RTA (\$/año)	%	% Acumulado
Fractura de chumacera derecha de tambor.	1	237.6	\$ 3,681.86	\$ 331.25	\$ 82,386.86	29%	29%
Fallo de rosca de chumacera de rodillo de alimentación inferior.	3	45.6	\$ 251.67	\$ 331.25	\$ 46,118.60	16%	45%
Fallo en resortes de yugo.	1	91.4	\$ 813.60	\$ 331.25	\$ 31,093.16	11%	55%
Fractura de pin cónico de acople de motor hidráulico superior.	3	26.0	\$ 71.67	\$ 331.25	\$ 26,013.85	9%	64%
Fractura de pernos de sujeción de yunque.	2	29.2	\$ 84.88	\$ 331.25	\$ 19,518.07	7%	71%
Fallo de cuña de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador superior.	1	56.4	\$ 175.00	\$ 331.25	\$ 18,867.44	7%	78%
Fuga de motor hidráulico superior.	3	14.7	\$ 211.54	\$ 331.25	\$ 15,283.59	5%	83%
Fuga de aceite en motor hidráulico de alimentación inferior.	2	18.1	\$ 532.58	\$ 331.25	\$ 13,089.54	4%	87%
Fallo de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador inferior.	1	26.7	\$ 175.00	\$ 331.25	\$ 9,029.31	3%	90%
Fractura de espiga de rodillo de alimentación superior.	1	25.1	\$ 325.00	\$ 331.25	\$ 8,632.75	3%	93%
Fuga de aceite de manguera de alta presión.	3	7.6	\$ 154.36	\$ 331.25	\$ 8,005.64	3%	96%
Fractura de carcasa de chumacera de rodillo alimentador inferior.	1	11.6	\$ 139.90	\$ 331.25	\$ 3,965.84	1%	97%
Fisuras en tambor.	2	2.3	\$ 250.00	\$ 331.25	\$ 2,030.38	1%	98%
Ruptura de conexión de solenoide de válvula de control rodillos alimentadores	1	1.0	\$ -	\$ 331.25	\$ 327.94	0%	98%
TOTAL:					\$ 284,362.97		

Tabla 8.5. Jerarquización y priorización de modos de fallas de Bandit.

- Cucharón STEMM 2CH.

Modo de fallo	FF/año	MDT (horas)	(CMO+CMat)/falla	IP/hora	RTA (\$/año)	%	% Acumulado
Fractura de eje de articulación superior y estructura.	1	486.98	\$ 4,434.78	\$ 18.86	\$ 13,619.22	65%	65%
Desgaste en bomba hidráulica.	1	56	\$ 3,876.00	\$ 26.69	\$ 5,370.64	26%	91%
Sobrecalentamiento.	1	34	\$ 120.00	\$ 26.69	\$ 1,027.46	5%	96%
Fractura de rotula de articulación inferior izquierda.	1	29	\$ 700.00	\$ 4.68	\$ 835.72	4%	100%
TOTAL:					\$ 20,853.04		

Tabla 8.6. Jerarquización y priorización de modos de fallo de cucharón STEMM 2CH.

- Grúa GHD 4t.

Modo de fallo	FF/año	MDT (horas)	(CMO+CMat)/falla	IP/hora	RTA (\$/año)	%	% Acumulado
Rotura de cable de acero.	1	112	\$ 273.00	\$ 26.69	\$ 3,262.28	69%	69%
Fractura de freno de motor principal de elevación.	1	40	\$ 75.00	\$ 33.04	\$ 1,396.60	30%	99%
Fractura de ventilador de motor principal de elevación.	1	1	\$ 36.00	\$ 33.04	\$ 69.04	1%	100%
TOTAL:					\$ 4,727.92		

Tabla 8.7. Jerarquización y priorización de modos de fallo de grúa GHD 4t.

8.3.4 Etapa 4 y 5: Definición y validación de hipótesis y causas raíces.

Luego de evaluar los costos que genera cada modo de falla y jerarquizar los más representativos de cada equipo, se procedió en conjunto con el grupo de trabajo a analizar las posibles hipótesis y causas raíces generadoras de los diferentes modos de falla.

Se clasificaron las hipótesis en tres tipos, hipótesis de tipo A (probabilidad alta), hipótesis tipo B (probabilidad media) e hipótesis tipo C (probabilidad baja), la clasificación se indica a la par de cada hipótesis por la letra que lo representa. También se listan las causas raíces, las cuales se han clasificado dependiendo de su naturaleza: causas raíces físicas (F), causas raíces humanas (H) y causas raíces latentes (L).

- Bandit.

Modo de fallos	Hipótesis	Causas raíces
1. Fractura de chumacera derecha de tambor.	1.1 Fatiga (A).	1.1.1. Falta de programa de mantenimiento (H). 1.1.2. Desconocimiento de tiempo de vida útil de chumacera (F).
	1.2. Sobrecarga (B).	1.2.1. Cambio abrupto de velocidad (H). 1.2.2. Cuchillas desafiladas (F).
	1.3. Selección de chumacera incorrecta (A).	1.3.1. Chumacera hechiza (F). 1.3.2. Chumacera elaborada de aluminio (F). 1.3.3. Mala selección de chumacera (H).
	1.4. Lubricación inadecuada (C)	1.4.1. Falta de programa de lubricación (H).
2. Fallo de rosca de chumacera de rodillo de alimentación inferior.	2.1. Mal Apriete (A).	2.1.1. Falta de herramientas adecuadas (F). 2.1.2. Apriete excesivo que favorece a la fatiga (L).
	2.2. Fatiga (B).	2.2.1. Falta de programa de mantenimiento (L). 2.2.2. Se desconoce tiempo de vida útil (F).
	2.3. Instalación incorrecta de rosca (A).	2.3.1. No se aplicó pegamento durante instalación de rosca (H). 2.3.2. Falta de

Modo de fallos	Hipótesis	Causas raíces
		capacitación de personal (L).
3. Fallo en resortes de Yugo.	3.1. Fatiga (B).	3.1.1. Se desconoce tiempo de vida útil (F). 3.1.2. Falta de programa de mantenimiento (H).
	3.2. Resortes incorrectos (A)	3.2.1. Resortes seleccionados con diferente longitud (H).
4. Fractura de pin cónico de acople de motor hidráulico.	4.1. Fatiga (B).	4.1.1. Se desconoce tiempo de vida útil (F).
	4.2. Sobrecarga (A).	4.2.1. Trozos de madera demasiado grandes (H). 4.2.2. Cuchillas desafiladas (F).
5. Fractura de pernos de sujeción de yunque.	5.1. Fatiga (B).	5.1.1. Falta de programa de mantenimiento (L). 5.1.2. Se desconoce tiempo de vida útil (F).
	5.2. Mala selección de pernos (A).	5.2.1. Desconocimiento de características de pernos adecuados (H).
	5.3. Mal apriete (A).	5.3.1. Falta de herramientas adecuadas (F).
6. Fallo de cuña de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador superior.	6.1 Mala operación (A)	6.1.1. Cambio abrupto de dirección de marcha de motor (H).
	6.2. Sobrecarga (B).	6.2.1. Trozos de madera demasiado grandes (H). 6.2.2. Cuchillas desafiladas (F).
	6.3 Fatiga (B).	6.3.1. Falta de programa de mantenimiento (L). 6.3.2. Se desconoce tiempo de vida útil (F).

Tabla 8.8. Modos de fallas, clasificación de hipótesis y causas raíces de Bandit.

- Cucharón STEMM 2CH.

Modo de fallos	Hipótesis	Causas raíces
1. Fractura de eje de articulación superior y estructura.	1.1. Fatiga (A).	1.1.1. Golpes continuos en foso de almacenamiento de biomasa (H). 1.1.2. Falta de programa de mantenimiento (L).
	1.2. Mala operación (A).	1.2.1. Operadores golpean bruscamente la cucharón durante operación (H).
	1.3. Reparaciones inadecuadas (A).	1.3.1. Fisuras reparadas con soldaduras superficiales (H).
2. Desgaste en bomba hidráulica.	2.1. Fatiga (A).	2.1.1. No existe programa de mantenimiento ni revisión (H).
	2.2. Aceite inadecuado (A).	2.2.1. Se utilizó aceite de turbina el cual no es adecuado para las necesidades de la bomba (H).
	2.3. Filtros en mal estado (A).	2.3.1. No se realiza cambio de aceite a bomba (L).

Tabla 8.9. Modos de fallas, clasificación de hipótesis y causas raíces de cucharón STEMM 2CH.

- Grúa GHD 4t.

Modo de fallos	Hipótesis	Causas raíces
1. Rotura de cable de acero.	1.1. Fatiga (A).	1.1.1. No existe método de revisión de estado de cable (L). 1.1.2. Falta de programa de mantenimiento (L).
	1.2. Cable fuera de especificaciones (A).	1.2.1. Cable comprado localmente que no cumplía con las especificaciones requeridas (F).
2. Fractura de freno de motor principal de elevación.	2.1. Fatiga (A).	2.1.1. Falta de programa de mantenimiento (L).

Tabla 8.10. Modos de fallas, clasificación de hipótesis y causas raíces de grúa GHD 4t.

8.3.5 Etapa 6: Definición y evaluación de la efectividad de las soluciones propuestas.

Luego de definir las hipótesis y causas raíces correspondientes a cada modo de fallo, se procede a plantear posibles soluciones y recomendaciones, siempre en conjunto con el equipo de trabajo designado en la etapa 1, además se agrega un responsable a cada recomendación o solución y un tiempo o plazo estimado dentro del cual debe realizarse lo acordado.

- Bandit.

Modo de fallo	Hipótesis y causas raíces	Soluciones y recomendaciones	Responsable	Tiempo asignado	Costos de mantenimiento anuales
1. Fractura de chumacera derecha de tambor.	1.1 Fatiga (A). 1.1.1. Falta de programa de mantenimiento (H). 1.1.2. Desconocimiento de tiempo de vida útil de chumacera (F).	-Diseño y desarrollo de un plan de revisión y sustitución periódico de chumaceras.	Ingeniero de mantenimiento.	15 días.	-Costo de chumacera: \$134.90 (cada máquina utiliza 2). -Se sugiere recambio anual.
	1.2. Sobrecarga (B). 1.2.1. Cambio abrupto de velocidad (H). 1.2.2. Cuchillas desafiladas (F).	-Definir tiempo de afilado de cuchillas. -Capacitación a personal sobre correcta operación de equipo.	Ingeniero de mantenimiento.	5 días.	-Costo de afilado de par de cuchillas \$110 (cada máquina utiliza 1 par). -Se sugiere cambio de cuchillas cada 4 días.
	1.3. Selección de chumacera incorrecta (A). 1.3.1. Chumacera hechiza (F). 1.3.2. Chumacera elaborada de aluminio (F). 1.3.3. Mala selección de chumacera (H).	-Capacitación a personal sobre características y especificaciones de chumacera.	Ingeniero de mantenimiento.	5 días.	
	1.4. Lubricación inadecuada (C). 1.4.1. Falta de programa de lubricación (H).	-Diseñar y desarrollar un calendario de lubricación de maquinaria.	Ingeniero de mantenimiento.	20 días	-Se realiza lubricación diaria a ambas máquinas. -Costo cubeta grasa \$100 (Se utiliza para todos los equipos de la planta dura alrededor de 3

Modo de fallo	Hipótesis y causas raíces	Soluciones y recomendaciones	Responsable	Tiempo asignado	Costos de mantenimiento anuales
					meses).
2. Fallo de rosca de chumacera de rodillo de alimentación inferior.	2.1. Mal Apriete (A). 2.1.1. Falta de herramientas adecuadas (F). 2.1.2. Apriete excesivo que favorece a la fatiga (L).	-Proporcionar herramientas adecuadas a personal. -Procedimiento de apriete correcto con valores de torque especificados.	Ingeniero de mantenimiento.	1 semana	-Costo torquímetro \$100.00. -Revisión de apriete 1 vez al mes.
	2.2. Fatiga (B). 2.2.1. Falta de programa de mantenimiento (L). 2.2.2. Se desconoce tiempo de vida útil (F).	-Diseño y desarrollo de un plan de revisión de estado de roscas.	Ingeniero de mantenimiento.	15 días.	
	2.3.1. No se aplicó pegamento durante instalación de rosca (H). 2.3.2. Falta de capacitación de personal (L).	-Procedimiento de colocación de rosca. -Capacitación a personal sobre instalación correcta de roscas.	Ingeniero de mantenimiento.	20 días.	
3. Fallo en resortes de yugo.	3.1. Fatiga (B). 3.1.1. Se desconoce tiempo de vida útil (F). 3.1.2. Falta de programa de mantenimiento (L).	-Diseño y desarrollo de un plan de revisión de estado de resortes.	Ingeniero de mantenimiento.	20 días.	-Costo de resortes \$ 33.00 c/u. (Cada máquina utiliza 2 resortes). -Se sugiere cambio anual de resortes.
	3.2. Resortes incorrectos (A). 3.2.1. Resortes seleccionados con diferente longitud (H).	-Capacitación y entrenamiento de personal sobre selección y montaje de resortes correctos.	Ingeniero de mantenimiento.	1 semana	

Modo de fallo	Hipótesis y causas raíces	Soluciones y recomendaciones	Responsable	Tiempo asignado	Costos de mantenimiento anuales
4. Fractura de pin cónico de acople de motor hidráulico.	4.1. Fatiga (B). 4.1.1. Se desconoce tiempo de vida útil (F).	-Diseño y desarrollo de un plan de revisión de estado de pines.	Ingeniero de mantenimiento.	20 días.	-Costo de pin \$ 215.00 c/u. (Se utilizan dos pines por máquina). -Se sugiere recambio anual de ser necesario.
	4.2. Sobrecarga (A). 4.2.1. Trozos de madera demasiado grandes (H). 4.2.2. Cuchillas desafiladas.	-Capacitación a personal sobre tamaño adecuado de trozos de madera a picar. -Recambio de cuchillas cada 4 días.	Ingeniero de mantenimiento.	1 semana	
5. Fractura de pernos de sujeción de yunque.	5.1. Fatiga (B). 5.1.1. Falta de programa de mantenimiento (L). 5.1.2. Se desconoce tiempo de vida útil (F).	-Diseño y desarrollo de un plan de revisión de estado de pernos de sujeción.	Ingeniero de mantenimiento.	20 días	-Costo de perno \$1 c/u. (5 pernos por máquina). -Se sugiere recambio cada 6 meses de ser necesario.
	5.2. Mala selección de pernos (A). 5.2.1. Desconocimiento de características de pernos adecuados (H).	-Capacitación a personal sobre selección y características de pernos adecuados.	Ingeniero de mantenimiento.	1 semana	
	5.3. Mal apriete (A). 5.3.1. Falta de herramientas adecuadas (F).	-Proporcionar herramientas adecuadas a personal. -Procedimiento de apriete correcto con valores de torque especificados.	Ingeniero de mantenimiento.	1 semana.	

Modo de fallo	Hipótesis y causas raíces	Soluciones y recomendaciones	Responsable	Tiempo asignado	Costos de mantenimiento anuales
6. Fallo de cuña de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador superior.	6.1. Mala operación (A). 6.1.1. Cambio abrupto de dirección de marcha de motor (H).	-Capacitación a personal sobre correcta operación de maquinaria.	Ingeniero de mantenimiento.	1 semana.	
	6.2. Sobrecarga (B). 6.2.1. Trozos de madera demasiado grandes (H). 6.2.2. Cuchillas desafiladas.	-Capacitación a personal sobre tamaño adecuado de trozos de madera a picar. -Recambio de cuchillas cada 4 días.	Ingeniero de mantenimiento.	1 semana.	
	6.3. Fatiga (B). 6.3.1. Falta de programa de mantenimiento (L). 6.3.2. Se desconoce tiempo de vida útil (F).	-Diseño y desarrollo de un plan de revisión de estado de cuñas de acople.	Ingeniero de mantenimiento.	20 días.	-Costo de fabricación de cuña \$ 175.00 (Dos por máquina). -Se sugiere realizar recambio anual si es necesario.

Tabla 8.11. Soluciones, responsable, tiempo de ejecución y costos de soluciones a implementar para reducir recurrencia de modos de fallo en Bandit.

- Cucharón STEMM 2CH.

Modo de fallo	Hipótesis y causas raíces	Soluciones y recomendaciones	Responsable	Tiempo asignado	Costos de mantenimiento anuales
1. Fractura de eje de articulación superior y estructura.	1.1. Fatiga (A). 1.1.1. Golpes continuos en foso de almacenamiento de biomasa (H). 1.1.2. Falta de programa de	-Capacitación a personal sobre correcta operación. -Diseño de plan de mantenimiento.	Ingeniero de mantenimiento.	20 días.	

	mantenimiento (L).				
	1.2. Mala operación (H). 1.2.1. Operadores golpean bruscamente la cucharón durante operación (H).	-Capacitación a personal sobre correcta operación.	Ingeniero de mantenimiento.	1 semana.	
	1.3. Reparaciones de fisuras incorrectas.	-Reparaciones estructurales realizadas adecuadamente.	Ingeniero de mantenimiento.		-Se sugiere realizar una reparación estructural profunda cada 2 años. Cucharón nueva \$23,000.
2. Desgaste en bomba hidráulica.	2.1. Desgaste (A). 2.1.1. No existe programa de mantenimiento ni revisión (H).	-Diseño y desarrollo de plan de mantenimiento.	Ingeniero de mantenimiento.	20 días.	
	2.2. Aceite inadecuado (A). 2.2.1. Se utilizó aceite de turbina el cual no es adecuado para las necesidades de la bomba (H).	-Capacitación de personal sobre tipo de aceite y especificaciones.	Ingeniero de mantenimiento.	1 semana.	-Se sugiere realizar cambio de aceite cada 2 meses. -Costo de galón de aceite \$ 37.50 (Se utilizan 5 galones).
	2.3. Filtros en mal estado (A). 2.3.1. No se realiza cambio de aceite a bomba.	-Establecimiento de periodos de cambio de filtros.	Ingeniero de mantenimiento.	20 días.	-Cambio de filtros cada 2 meses. -Cada filtro cuesta \$ 130 (Se utilizan dos filtros).

Tabla 8.12. Soluciones, responsable, tiempo de ejecución y costos de soluciones a implementar para reducir recurrencia de modos de fallo en cucharón STEMM 2CH.

- Grúa GHD 4t

Modo de fallo	Hipótesis y causas raíces	Soluciones y recomendaciones	Responsable	Tiempo asignado	Costo de mantenimiento anuales
1. Rotura de cable de acero.	1.1. Fatiga (A). 1.1.1. No existe método de revisión de estado de cable (L). 1.1.2. Falta de programa de mantenimiento (L).	-Procedimiento de revisión de hebras reventadas. -Lubricación semanal de cables.	Ingeniero de mantenimiento.		-Lubricación semanal de cable. -Costo de cubeta de lubricante \$70. (Se utiliza 1 cubeta al mes).
	1.2. Cable fuera de especificaciones (A). 1.2.1. Cable comprado localmente que no cumplía con las especificaciones requeridas (F).	-Comprar cable según norma.	Ingeniero de mantenimiento	1 semana	-Cambio anual de cable en caso de ser necesario. -Costo de cable \$ 250.00
2. Fractura de freno de motor principal de elevación.	2.1 Fatiga (A). 2.1.1 No existe método de inspección de estado de freno (L). 1.1.2. Falta de programa de mantenimiento (L).	-Diseño y desarrollo de plan de mantenimiento.	Ingeniero de mantenimiento	20 días.	-Se sugiere realizar cambio de freno cada 2 años si es necesario. -Costo freno: \$ 260.08.

Tabla 8.13. Soluciones, responsable, tiempo de ejecución y costos de soluciones a implementar para reducir recurrencia de modos de fallo en grúa GHD 4t.

A continuación se muestra la cuantificación de los costos de mantenimiento programado, los cuales deben evitar en su mayoría que los modos de fallo analizados se repitan, inicialmente se muestran por hipótesis y luego en la tabla 8.16 se realiza una comparación por modo de falla entre el RTA antes del análisis RCA y el RTAO después de realizado el RCA.

El valor de RTAO se calculó según la siguiente expresión matemática:

$$RTAO = [FM \times (CMO + CMat)] + [FM \times MDT \times IP] \quad (\text{Ec. 8.2})$$

Dónde:

RTAO: Riesgo total anualizado optimista en dólares.

FM: Frecuencia de realización del mantenimiento preventivo.

CMO: Costos de mano de obra del mantenimiento preventivo.

CMat: Costos de materiales a utilizar en el mantenimiento preventivo.

MDT: Tiempo promedio fuera de servicio de los equipos.

IP: Impacto en la producción.

Equipo	Modo de falla	Hipótesis	Solución a implementar	FM/año (Frecuencia de mtto./año)*	MDT (horas) ³	CMO+CMat (Costos directos mtto.) (\$)*	IP (Costos de penalización) (\$)⁴	RTAO (Riesgo total anualizado optimista) (\$)⁵
Bandit	Fractura de chumacera derecha de tambor.	Fatiga (A).	Cambio de chumaceras.	1	24	\$ 539.60	\$ 331.25	\$ 8,489.60
		Sobrecarga (B).	Afilado de cuchillas.	91	0.5	\$ 220.00	\$ 331.25	\$ 35,188.28
		Lubricación inadecuada (C).	Programa de lubricación.	365	0.08	\$ 1.10	\$ 331.25	\$ 10,475.52
	Fallo de rosca de chumacera de rodillo de alimentación inferior.	Mal Apriete (A).	Apriete periódico de pernos y roscas.	12	0.17	\$ 100.00	\$ 331.25	\$ 762.50
	Fallo en resortes de yugo.	Fatiga (B).	Cambio de resortes.	1	1	\$ 132.00	\$ 331.25	\$ 463.25
	Fractura de pin cónico de acople de motor hidráulico.	Fatiga (B).	Cambio de pines.	1	4	\$ 860.00	\$ 331.25	\$ 2,185.00
	Fractura de pernos de sujeción de yunque.	Fatiga (B).	Cambio de pernos.	2	1	\$ 10.00	\$ 331.25	\$ 682.50
	Fallo de cuña de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador superior.	Fatiga (B).	Cambio de cuña.	1	2	\$ 700.00	\$ 331.25	\$ 1,362.50
Cucharón STEMM 2CH	Desgaste en bomba hidráulica.	Filtros en mal estado (A).	Cambio de filtros.	6	2	\$ 260.00	\$ 33.04	\$ 1,956.48
		Aceite inadecuado (A).	Cambio de aceite.	6	2	\$ 187.50	\$ 33.04	\$ 1,521.48
	Fractura de eje de articulación superior y estructura.	Reparaciones de fisuras	Reparación estructural	0.5	48	\$ 1,000.00	\$ 33.04	\$ 1,292.96

³ MDT es el tiempo que tomara realizar el mtto. preventivo a los equipos, los cuales fueron definidos en conjunto con el equipo de trabajo de la planta de biomasa.

⁴ Ver tablas 8.5, 8.6 y 8.7.

⁵ El valor de RTAO se calculó sustituyendo los valores respectivos en la ecuación 8.2.

Equipo	Modo de falla	Hipótesis	Solución a implementar	FM/año (Frecuencia de mtto./año)*	MDT (horas) ³	CMO+CMat (Costos directos mtto.) (\$)*	IP (Costos de penalización) (\$)⁴	RTAO (Riesgo total anualizado optimista) (\$)⁵
		incorrectas (F).	profunda.					
Grúa GHD 4t	Rotura de cable de acero.	Fatiga (A).	Programa de lubricación.	52	0.25	\$ 17.50	\$ 33.04	\$ 1,339.52
		Cable fuera de especificaciones (A).	Cambio de cable.	1	8	\$ 250.00	\$ 33.04	\$ 514.32
	Fractura de freno de motor principal de elevación.	Fatiga (A).	Cambio de freno.	0.5	0.5	\$ 260.08	\$ 33.04	\$ 138.30

*Los valores de FM y CMO+CMat, se obtienen a partir de lo definido en las tablas 8.11, 8.12 y 8.13

Tabla 8.14. Cálculo de riesgo total anualizado implementando los mantenimientos programados para evitar los modos de falla analizados para cada hipótesis.

8.3.5.1. Análisis probabilístico de tiempos entre fallas de modos de falla críticos.

Utilizando la herramienta probabilística conocida como distribución de Weibull, se procedió a determinar los tiempos promedios operativos de los modos de fallo críticos en función del historial de falla de cada uno, la distribución de Weibull permite establecer estimaciones de tiempos entre las fallas de los equipos, de esta manera es posible inferir los fallos antes de su ocurrencia.

Las expresiones matemáticas utilizadas para el cálculo de tiempo operativo promedio entre fallas utilizando la distribución de Weibull son las sugeridas por Parra y Crespo (2016)⁶:

La media matemática en procesos de análisis de fiabilidad de fallo según la distribución de Weibull se calculó a partir de la expresión 8.2:

$$E(X) = MTTF = \alpha * \Gamma(1 + \frac{1}{\beta}) \quad (\text{Ec. 8.3})$$

Donde:

MTTF: Tiempo promedio esperado después del cual se espera que ocurra un modo de fallo específico.

α : Parámetro de escala.

β : Parámetro de forma.

Γ : Función matemática Gamma.

El parámetro de escala α se obtiene a partir de la expresión 8.3.

$$\alpha = \exp \left[\frac{N * \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\text{Ln}(x_i)} - (\sum_{i=1}^N A_i * \sum_{i=1}^N \frac{1}{\text{Ln}(x_i)})}{(\sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\text{Ln}(x_i)} * \sum_{i=1}^N \frac{1}{\text{Ln}(x_i)}) - (\sum_{i=1}^N A_i * \sum_{i=1}^N (\frac{1}{\text{Ln}(x_i)})^2)} \right] \quad (\text{Ec. 8.4})$$

Donde:

N: Cantidad total de datos a tomar en cuenta para la distribución de Weibull.

X_i : Valor i de tiempo de servicio antes de la ocurrencia de un modo de falla.

A_i : Viene dada por la expresión 8.4.

$$A_i = \frac{\text{Ln}(\text{Ln}(\frac{1}{1 - \frac{i}{N+1}}))}{\text{Ln}(x_i)} \quad (\text{Ec. 8.5})$$

El parámetro de forma β se obtiene a partir de la expresión 8.5.

$$\beta = \left[\frac{\sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\text{Ln}(x_i)}}{(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\text{Ln}(x_i)}) - (\text{Ln}(\alpha) * \sum_{i=1}^N (\frac{1}{\text{Ln}(x_i)})^2)} \right] \quad (\text{Ec. 8.6})$$

⁶ Nota técnica 9: Métodos Básicos de Análisis de Fiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad. Crespo y Parra, 2016.

Se realizó una comparación entre los periodos de tiempo asignados a la frecuencia de realización de cada tarea versus el tiempo operativo promedio, obtenido a través de la distribución probabilística de Weibull para cada modo de fallo, obteniendo los siguientes resultados:

Equipo	Modo de fallo	Solución a implementar	Frecuencia propuesta (horas)*	Tiempo operativo promedio según distribución de Weibull (horas) ⁷
Bandit	Fractura de chumacera derecha de tambor.	Afilado de cuchillas.	32	34
Bandit	Fallo de rosca de chumacera de rodillo de alimentación inferior.	Apriete periódico de pernos y roscas.	240	253
Bandit	Fallo en resortes de yugo.	Cambio de resortes.	2880	2910
Bandit	Fractura de pin cónico de acople de motor hidráulico.	Cambio de pines.	2880	2899
Bandit	Fractura de pernos de sujeción de yunque.	Cambio de pernos.	1440	1447
Bandit	Fallo de cuña de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador superior.	Cambio de cuña.	2880	2895
Grúa GHD 4t	Rotura de cable de acero.	Cambio de filtro y aceite	480	489
Grúa GHD 4t	Fractura de freno de motor principal de elevación.	Reparación estructural profunda.	1440	1454
Cucharón STEMM 2CH	Desgaste en bomba hidráulica.	Cambio de cable.	1440	1461
Cucharón STEMM 2CH	Fractura de eje de articulación superior y estructura.	Cambio de freno.	2880	2911

*Frecuencia propuesta de ocurrencia de fallas se determinó a partir del conocimiento y experiencia de los técnicos y operadores con mayor antigüedad en la planta de biomasa, ya que anteriormente no se cuenta con un registro detallado de tiempos de fallas.

Tabla 8.15. Comparación entre tiempo de frecuencia asignado a realización de tareas de mejora en el mantenimiento y tiempo promedio operativo obtenido según el modelo probabilístico de Weibull.

⁷ Ver anexo 2.

Equipo	Modo de falla	RTA actual ⁸	RTAO optimista ⁹	Ahorro
Bandit	Fractura de chumacera derecha de tambor.	\$ 82,386.86	\$ 54,153.40	\$ 28,233.46
Bandit	Fallo de rosca de chumacera de rodillo de alimentación inferior.	\$ 46,118.60	\$ 762.50	\$ 45,356.10
Bandit	Fallo en resortes de yugo.	\$ 31,093.16	\$ 463.25	\$ 30,629.91
Bandit	Fractura de pin cónico de acople de motor hidráulico.	\$ 26,013.85	\$ 2,185.00	\$ 23,828.85
Bandit	Fractura de pernos de sujeción de yunque.	\$ 19,518.07	\$ 682.50	\$ 18,835.57
Bandit	Fallo de cuña de acople de motor hidráulico de rodillo alimentador superior.	\$ 18,867.44	\$ 1,362.50	\$ 17,504.94
Grúa GHD 4t	Rotura de cable de acero.	\$ 3,262.28	\$ 1,853.84	\$ 1,408.44
Grúa GHD 4t	Fractura de freno de motor principal de elevación.	\$ 1,396.60	\$ 138.30	\$ 1,258.30
Cucharón STEMM 2CH	Desgaste en bomba hidráulica.	\$ 5,370.64	\$ 3,477.96	\$ 1,892.68
Cucharón STEMM 2CH	Fractura de eje de articulación superior y estructura.	\$ 13,619.22	\$ 1,292.96	\$ 12,326.26
Total:		\$ 247,646.73	\$ 66,372.21	\$ 181,274.52

Tabla 8.16. Ahorro resultante esperado luego de implementación de soluciones derivadas del método RCA.

Equipo	RTA actual	RTA optimista	Ahorro	%
Bandit	\$ 223,997.99	\$ 59,609.15	\$ 164,388.84	27%
Grúa GHD 4t	\$ 4,658.88	\$ 1,992.14	\$ 2,666.74	43%
Cucharón STEMM 2CH	\$ 18,989.86	\$ 4,770.92	\$ 14,218.94	25%
Total:	\$ 247,646.73	\$ 66,372.21	\$ 181,274.52	27%

Tabla 8.17. Ahorro esperado luego de implementación de soluciones RCA calculada por equipo.

Luego de calcular el riesgo total anualizado optimista, el cual corresponde a la implementación de las tareas de mantenimiento para atacar las causas raíces de los modos de fallo más significativos, se puede concluir que el ahorro esperado anual es de aproximadamente \$ 181,274.52.

En el siguiente gráfico se muestra de manera ilustrativa los ahorros comparados con los valores de RTA actual, así como el costo del RTA optimista resultante de implementar las diferentes tareas de

⁸ Ver tablas 8.5, 8.6 y 8.7.

⁹ Ver tabla 8.14.

mantenimiento originadas del análisis de causa raíz, cabe mencionar que el riesgo total anualizado actual se calculó en base a proyecciones al igual que el riesgo total acumulado optimista.

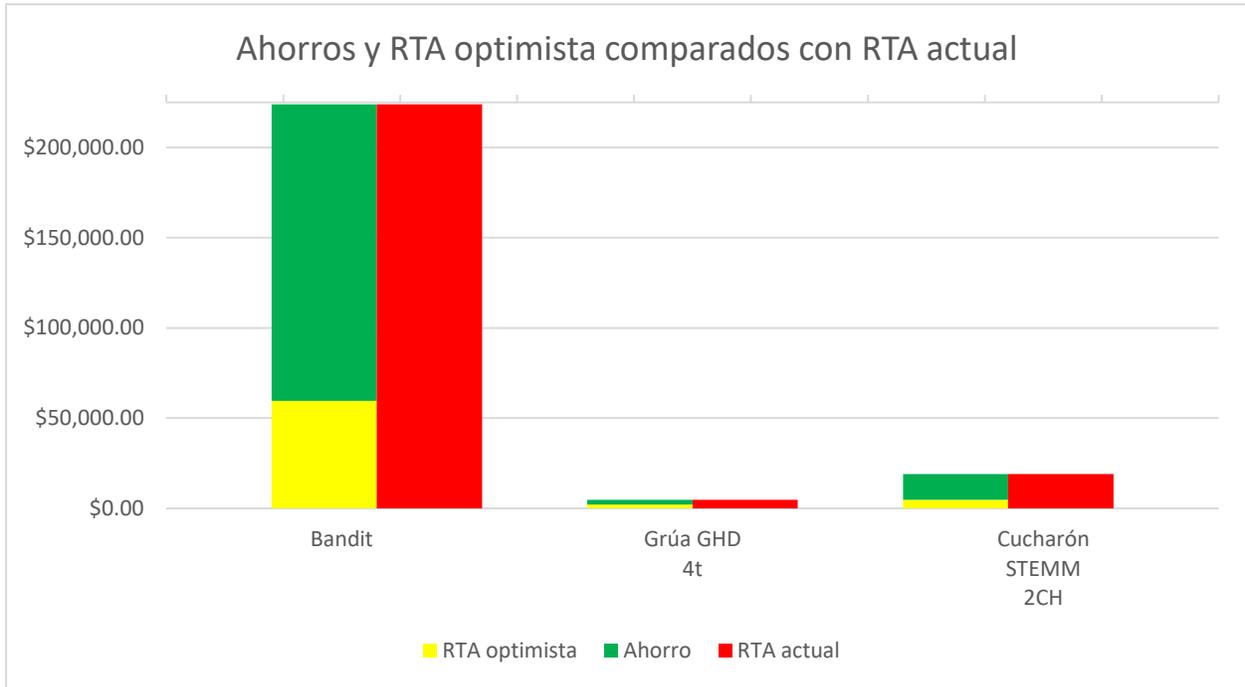


Gráfico 8.1. Ahorros comparados con RTA actual y optimista por cada equipo crítico analizado.

8.4 Seguimiento de Indicadores.

Además de la implementación de mejoras en la gestión de mantenimiento dentro de la planta de biomasa y la cuantificación de resultados, se continuó con la medición de los indicadores definidos como críticos, los cuales son mostrados a continuación como un respaldo del efecto positivo de la implementación de las soluciones definidas a partir de las hipótesis seleccionadas como causas raíces de los modos de fallo.

8.4.1 Frecuencia de fallas (FF).

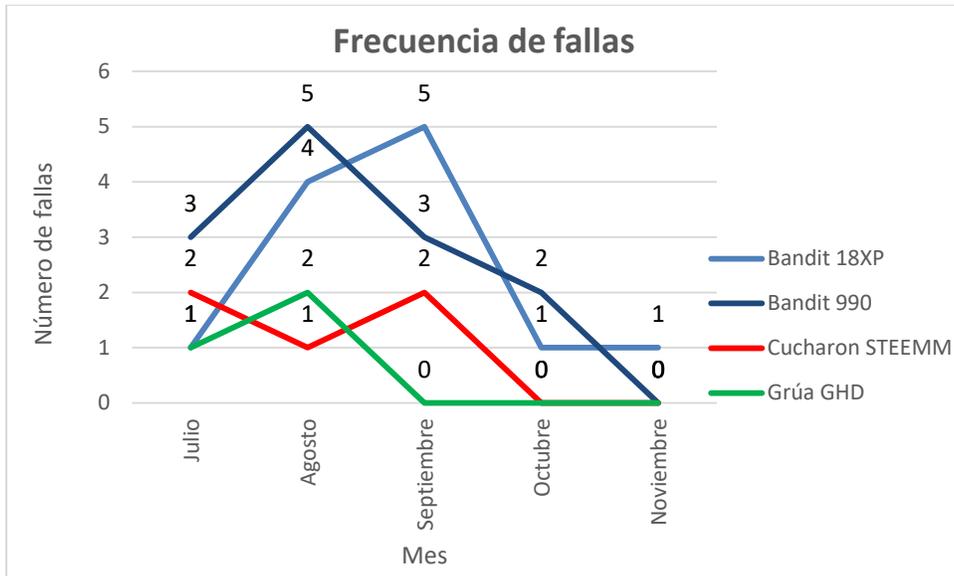


Gráfico 8.2. Indicador frecuencia de fallas por equipos críticos.

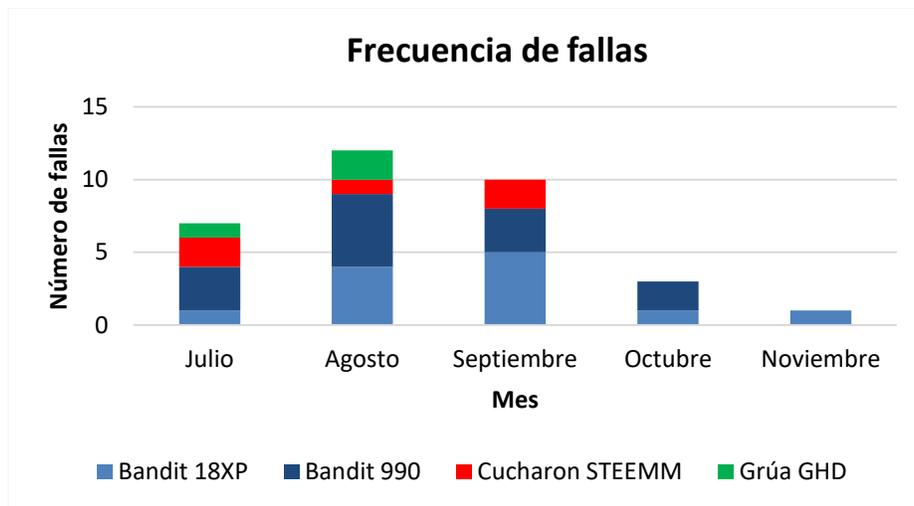


Gráfico 8.3. Indicador frecuencia de fallas de planta de biomasa.

Frecuencia de fallas (FF)					
Equipo	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Bandit 18XP	1	4	5	1	1
Bandit 990	3	5	3	2	0
Cucharon STEEMM	2	1	2	0	0
Grúa GHD	1	2	0	0	0
Total	7	12	10	3	1

Tabla 8.18. Datos registrados indicador frecuencia de fallas.

8.4.2 Tiempo promedio de fallas (MDT).

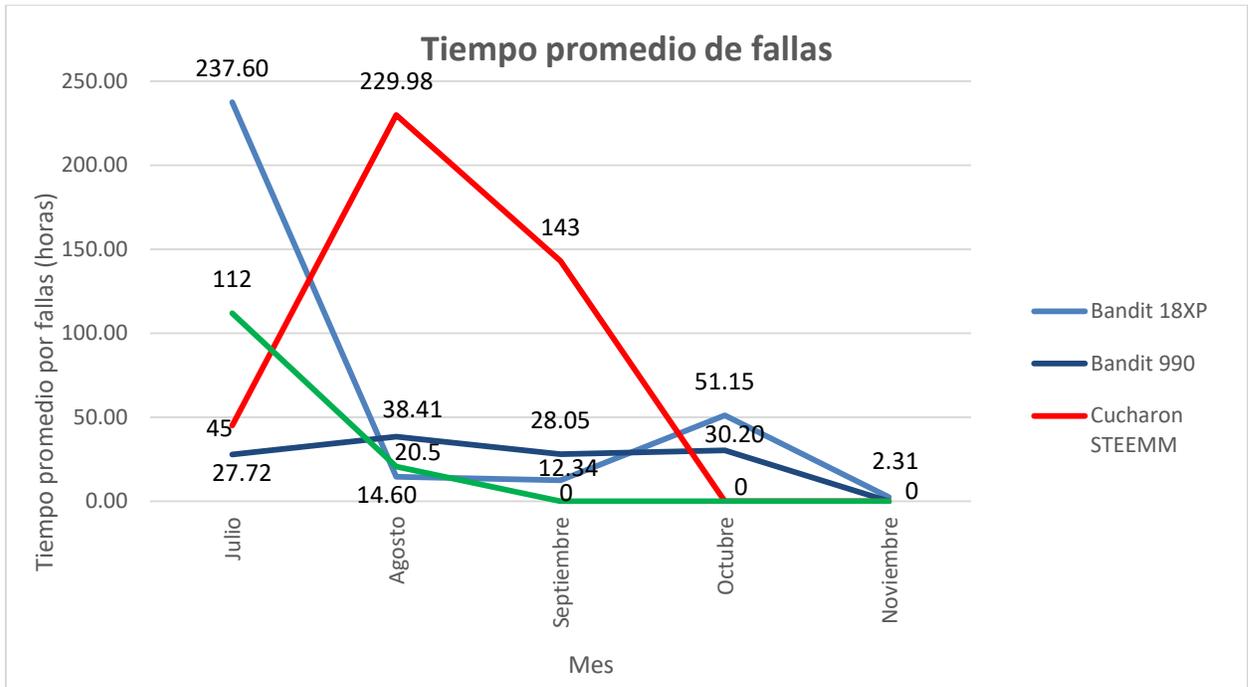


Gráfico 8.4. Indicador tiempo promedio de fallas equipos críticos.

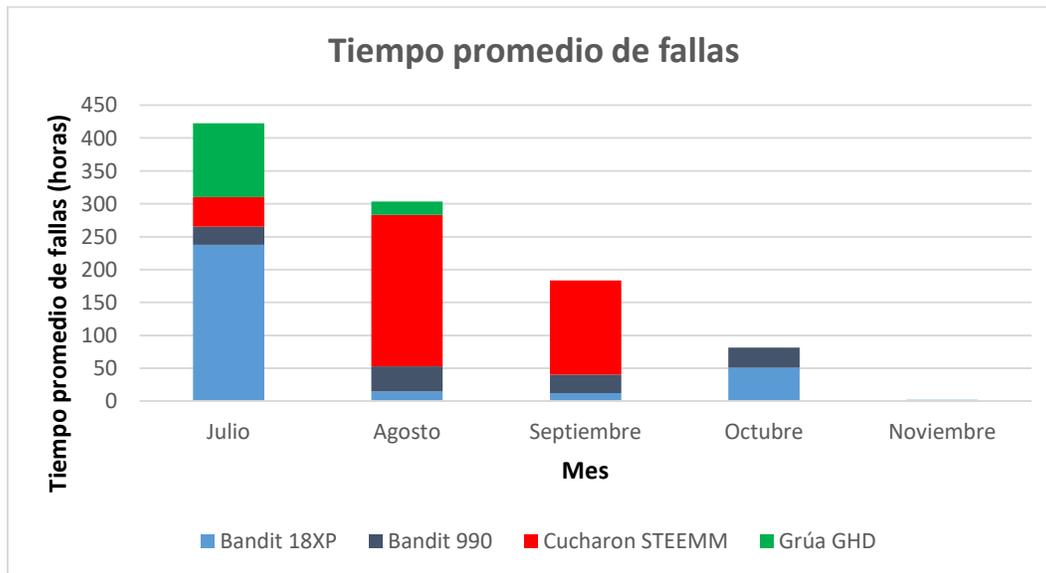


Gráfico 8.5. Indicador tiempo promedio de fallas de planta de biomasa.

Tiempo promedio de fallas (horas)					
Equipo	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Bandit 18XP	237.60	14.60	12.34	51.15	2.31
Bandit 990	27.72	38.41	28.05	30.20	0
Cucharon STEEMM	45	229.98	143	0	0
Grúa GHD	112	20.5	0	0	0
Total	422.32	303.49	183.39	81.35	2.31

Tabla 8.19. Datos registrados indicador tiempo promedio de fallas.

8.4.3 Costes por indisponibilidad de fallas (CIF).

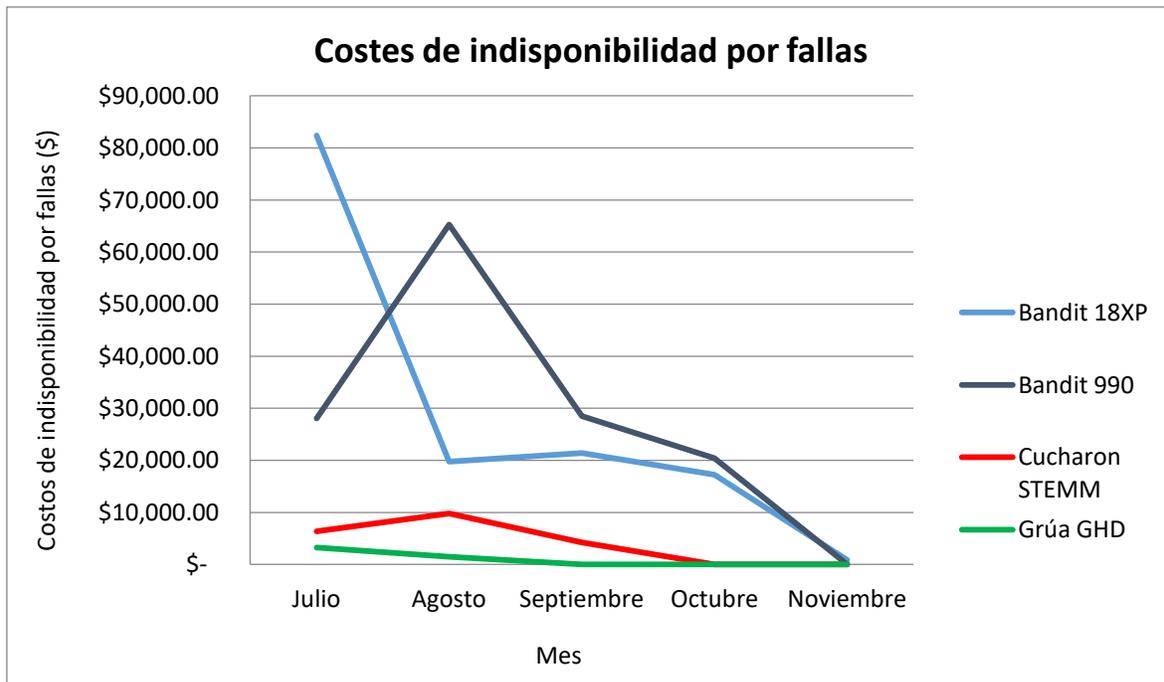


Gráfico 8.6. Indicador costes por indisponibilidad de fallas.

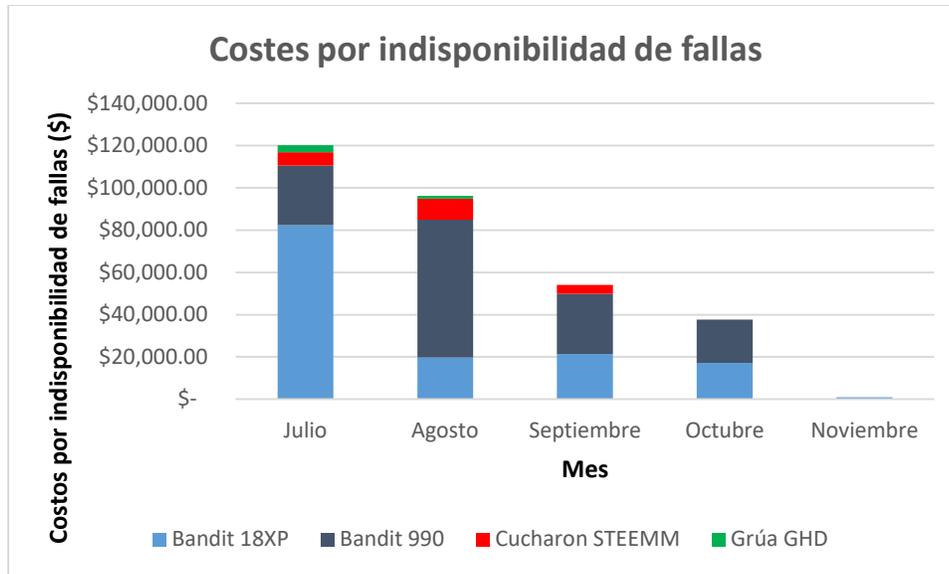


Gráfico 8.7. Indicador tiempo promedio de fallas de planta de biomasa.

En la siguiente tabla se muestra el valor del indicador coste de fallos para los 4 equipos críticos en cuestión durante el tiempo que se realizó la investigación.

Costes de indisponibilidad por fallas (CIF)					
Equipo	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Bandit 18XP	\$ 82,386.86	\$ 19,753.07	\$ 21,386.34	\$ 17,228.44	\$ 882.28
Bandit 990	\$ 28,070.76	\$ 65,243.08	\$ 28,477.27	\$ 20,401.19	\$ -
Cucharón STEEMM	\$ 6,398.10	\$ 9,815.93	\$ 4,255.88	\$ -	\$ -
Grúa GHD	\$ 3,262.28	\$ 1,465.64	\$ -	\$ -	\$ -
Total	\$ 120,118.00	\$ 96,277.72	\$ 54,119.49	\$ 37,629.63	\$ 882.28

Tabla 8.20. Valores de indicador costes de indisponibilidad por fallas.

8.4.4 Disponibilidad (D).

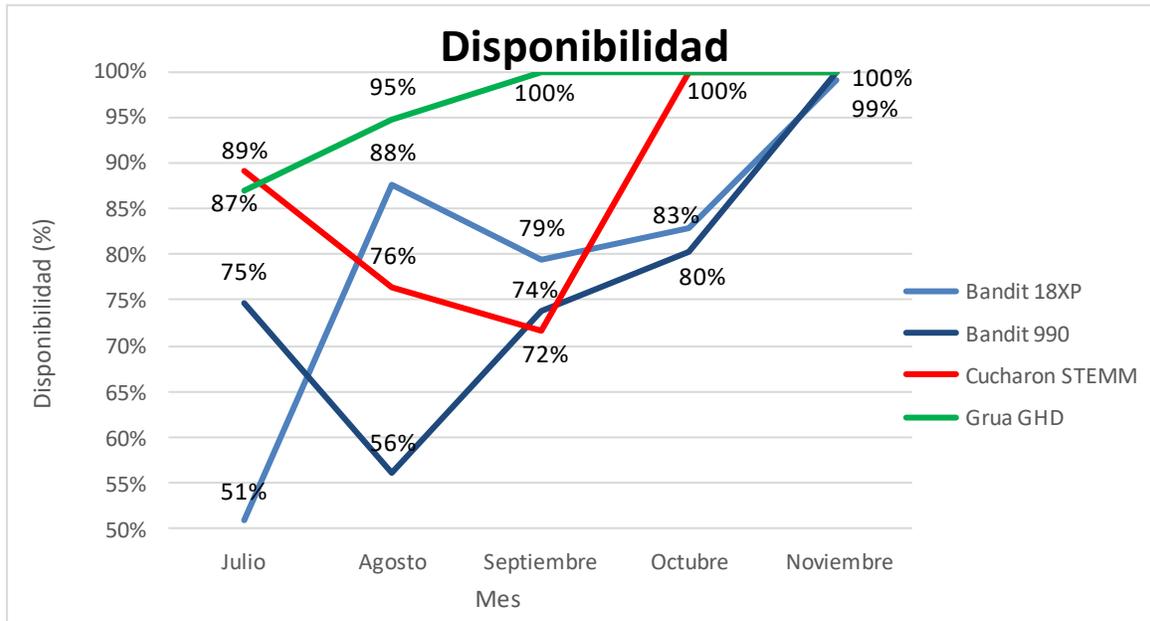


Gráfico 8.8. Indicador disponibilidad equipos críticos.

En el caso de indisponibilidad de la planta de biomasa, debe tomarse en cuenta que a pesar que algún equipo crítico no estuvo disponible, la planta como tal no ha parado de producir vapor, sin embargo lo que se ha visto afectado es la cantidad de vapor producida.

IX. Conclusiones.

- Es indispensable contar con una estrategia de mantenimiento, como ocurrió con la planta de biomasa inicialmente se desconocían las consecuencias económicas y operativas generadas por las fallas, sin embargo, con el simple hecho de establecer indicadores claves que nos permitan conocer el estado y desempeño de la planta se puede atraer el interés de la alta dirección lo cual favorece al departamento de mantenimiento mostrando la importancia de éste.
- Deben establecerse sistemas y equipos de medición que permitan monitorear las variables más importantes, en el caso de la planta de biomasa inicialmente no se contaba con un parámetro de producción de vapor ya que no se contaba con equipo de medición, sin embargo durante el tiempo de implementación de la estrategia de mantenimiento se evidenció que medir es sumamente importante para mejorar el desempeño de la planta. Actualmente se cuenta con medidores de vapor en todas las tuberías que suministran vapor a la planta de tintorería, conociendo ahora el consumo promedio de la planta en general.
- Debe realizarse un análisis de criticidad de equipos, de esta manera las soluciones implementadas tendrán una mayor eficacia, ya que se atacarán los equipos que generan interrupción del proceso de producción o los que más costes generan, optimizando así la rentabilidad de la planta.

- Al momento de tomar decisiones es indispensable involucrar a todo el equipo de trabajo, incluyendo al personal operativo que son quienes conviven la mayor parte del tiempo con los equipos, además de valorarse su opinión y tomarla en cuenta para las soluciones y planes de acción futuros.
- Traducir las fallas y tiempos muertos a costos evidencia en la mayoría de los casos que un correcto plan de mantenimiento, es una estrategia de ahorro y continuidad en la producción.
- Las acciones, tareas y rutinas de mantenimiento son el resultado de diversos análisis grupales multidisciplinarios, donde deben participar tanto la parte operativa como de gestión de las organizaciones, los planes de mantenimiento deben estar apegados a las necesidades particulares de cada industria y proceso.

X. Recomendaciones

- Contar con equipos y sistemas de medición confiables que permitan monitorear las variables más importantes.
- Se sugiere utilizar métodos de jerarquización de equipos críticos cuantitativos, los cuales dejen de lado la percepción del personal de trabajo y sustenten numérica o estadísticamente los resultados, como se realizó con el método AHP.
- Dependiendo del tamaño de la planta industrial y la cantidad de equipos es aconsejable para mayor eficacia y orden contar con un software de mantenimiento que permita tener un mejor control de rutinas de mantenimiento
- La creación de un tablero de control para seguimiento de indicadores permite a los ingenieros evaluar tendencias, además de evidenciar las fortalezas y debilidades de los procesos, orientando sobre qué equipos es más valioso concentrar las mejoras o análisis.

XI. Bibliografía

- Benbow, D. W. y Broome, H. W. (2009) "The Certified Reliability Engineer Handbook". ASQ. USA.
- Berroteran, A., García, A, Montero, N. y Rodríguez, A. "Aplicación de la herramienta de "Análisis Causa Raíz" al equipo de mayor Riesgo Total Anualizado de una línea de envasado". Trabajo final "Diplomado en Ingeniería de Confiabilidad y Gestión del Mantenimiento".
- Carvajal Brenes, J. (2014) "TPM Orientaciones para su Implementación"-
- Castillo, M., Guillén, F. y Vergara, M. (2003) "YN Refinery 800 kVA Transformers Failures".
- Failure Mode & Effects Analysis. Handbook Supplement for Machinery. Ford Production System. 1996.
- Keith Mobley, R. (1999) "Root Cause Failure Analysis". Butterworth-Heinemann. USA.
- Medina, M. "Análisis de Fallas en Rectificadores de Sistema de Protección Catódica, una Aplicación del Análisis de Causa Raíz". Universidad Simón Bolívar, Venezuela.
- Mora Gutiérrez, A. (2009) "Mantenimiento Industrial Efectivo". Editorial Coldi. Medellín, Colombia.
- Moubray, J. (2004) Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

- National Aeronautics and Space Administration NASA. (2008) "RCM Guide. Reliability-Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment."
- Parra, C. y Crespo Márquez, A. (2016) "Integración de un Modelo de Gestión de Mantenimiento y Confiabilidad (MGMC) con el Proceso de Gestión de Activos (Enfoque de la norma de Gestión de Activos ISO 55000). Dept. Gestión industrial. Universidad de Sevilla.
- Parra, C. y Crespo Márquez, A. (2016) "Cuadro de Mando Integral e Indicadores Básicos de la Gestión del Mantenimiento". Dept. Gestión industrial. Universidad de Sevilla.
- Parra, C. y Crespo Márquez, A. (2016) "Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos". Dept. Gestión industrial. Universidad de Sevilla.
- Parra, C. y Crespo Márquez, A. (2017) "Técnicas de Análisis Causa Raíz (ACR)". Dept. Gestión industrial. Universidad de Sevilla.
- Parra, C. (2008) Aplicación Piloto de la Metodología Análisis Causa Raíz (ACR), Sistemas Evaluados: American C-456 y Lufkin M-320. Talara, Perú.
- Smith, D. J. (2005) "Reliability, Maintainability and Risk". Butterworth-Heinemann. USA.
- Suzuki, T. (1995) "TPM en Industrias de Proceso".
- Tweeddale, M. (2003) "Managing Risk and Reliability of Process Plants". Butterworth-Heinemann. USA.

XII. ANEXOS.

12.1 Anexo 1.

A continuación se detalla el cálculo del término IP (Impacto en producción), el cual se refiere a las pérdidas generadas por la indisponibilidad de un equipo por hora, es decir, el valor monetario que dejó de percibirse durante el tiempo sin producir.

- IP Bandit.

Según las mediciones y datos registrados, durante un turno de 8 horas de trabajo se generan 50 toneladas de leña picada, es decir 6.25 ton/hora. La tonelada de leña durante el periodo que se realizó la investigación tenía un precio de 53 \$/ton, por lo cual cada hora que una Bandit se encuentre no disponible se pierden por hora \$ 331.25.

$$IP_{Bandit} = \text{Ton leña/hora} * \$/\text{Ton leña}$$
$$IP_{Bandit} = 6.25 \text{ Ton leña/hora} * 53.00 \$/\text{Ton leña} = 331.25 \$/\text{hora}$$

- IP Cucharón y Grúa.

En el caso del cálculo de Impacto en Producción (IP) del cucharón y la grúa, debe realizarse de manera distinta, ya que los costos generados por una falla en alguno de estos equipos impactan en la cantidad de vapor generado por la planta de biomasa. La cantidad de vapor demandado se mantiene, por lo cual el déficit de vapor generado a partir de biomasa debe suplirse utilizando calderas de fuel oil.

En este caso, se definió una generación de vapor promedio por hora de 0.75 toneladas de fuel oil cuando la planta de biomasa opera al 100% de su capacidad. Debido a que durante la fase de investigación no se contaba con un medidor de vapor en la caldera de biomasa, pero sí en la caldera de fuel oil, el cálculo de vapor que no generado ya sea por una falla en la grúa o el cucharón se calculó a partir de la diferencia o incremento de vapor generado por las calderas de fuel oil.

Mes	Generación de vapor calderas (Ton/hora) ¹⁰	Diferencia (Ton)	Costo de vapor generado por calderas (\$/Ton) ¹¹	\$/hora
Julio	1.61	0.86	31	\$ 26.69
Agosto	1.97	1.22	27	\$ 33.04
Septiembre	0.94	0.19	25	\$ 4.68
Octubre	1.32	0.57	24	\$ 13.61
Noviembre	1.28	0.53	22	\$ 11.73

Tabla 12.1. Costo de toneladas de vapor generado por calderas de fuel oil al momento de algún modo de falla en el cucharón o grúa de la planta de biomasa.

¹⁰ Toneladas de vapor generadas por calderas de fuel oil, dato obtenido de flujometro de vapor tipo Vortex.

¹¹ Costo de tonelada de vapor definida por contabilidad.

12.2 Anexo 2.

Para el cálculo del tiempo promedio operativo para cada modo de fallo, se recopiló información que permitiera a través de la distribución Weibull realizar estimaciones de tiempo operativo antes de la ocurrencia de la siguiente falla.

A continuación se detalla el procedimiento realizado para el cálculo del tiempo promedio.

Se recolectaron 10 datos para cada modo de fallo posible a ocurrir, se tomará como ejemplo el modo de fallo: Fractura de chumacera derecha de tambor, de la máquina Bandit.

i	Tiempo operativo entre fallas X_i (horas)
1	40
2	30
3	42
4	34
5	30
6	33
7	30
8	39
9	31
10	34

Tabla 12.2. Tiempo operativo transcurrido antes de la ocurrencia del modo de fallo Fractura de chumacera derecha de tambor.

El primer paso a realizar es ordenar los tiempos operativos entre falla de menor a mayor, luego se procede al cálculo del término A (ecuación 8.4). En este ejemplo debido a que el total de datos recolectados fue 10 el valor de $N=10$.

$$A_i = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-\frac{i}{N+1}}\right)\right)}{\ln(x_i)} \quad (\text{Ec. 8.4})$$

i	Tiempo operativo entre fallas X_i (horas)	A_i
1	30	-0.69111504
2	30	-0.47221313
3	30	-0.3364339
4	31	-0.23124897
5	33	-0.14318608
6	34	-0.06740007
7	34	0.003270833
8	39	0.071463943
9	40	0.14460146
10	42	0.233993764

Tabla 12.3 Cálculo del término A_i para los valores de tiempo operativo entre fallas.

El siguiente paso es calcular los valores de alpha (α) y beta (β), las expresiones matemáticas para calcularlas son las ecuaciones 8.3 y 8.5.

$$\alpha = \exp \left[\frac{N \cdot \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\ln(x_i)} - \left(\sum_{i=1}^N A_i \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{\ln(x_i)} \right)}{\left(\sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\ln(x_i)} \right) \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{\ln(x_i)} - \left(\sum_{i=1}^N A_i \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\ln(x_i)} \right)^2 \right)} \right] \quad (\text{Ec. 8.6})$$

$$\beta = \left[\frac{\sum_{i=1}^N \frac{A_i}{\ln(x_i)}}{\left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\ln(x_i)} \right) - \left(\ln(\alpha) \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\ln(x_i)} \right)^2 \right)} \right] \quad (\text{Ec. 8.4})$$

i	X _i	Ln(x _i)	1/Ln(x _i)	(1/Ln(x _i)) ²	A _i	A _i * (1/Ln(x _i))
1	30	3.401197382	0.294014104	0.086444293	-0.69111504	-0.20319757
2	30	3.401197382	0.294014104	0.086444293	-0.47221313	-0.13883732
3	30	3.401197382	0.294014104	0.086444293	-0.3364339	-0.09891631
4	31	3.433987204	0.291206676	0.084801328	-0.23124897	-0.06734124
5	33	3.496507561	0.285999668	0.08179581	-0.14318608	-0.04095117
6	34	3.526360525	0.283578492	0.080416761	-0.06740007	-0.01911321
7	34	3.526360525	0.283578492	0.080416761	0.003270833	0.000927538
8	39	3.663561646	0.27295842	0.074506299	0.071463943	0.019506685
9	40	3.688879454	0.271085031	0.073487094	0.14460146	0.039199291
10	42	3.737669618	0.267546386	0.071581069	0.233993764	0.062604186
	Σ	35.27691868	2.837995477	0.806338002	-1.48826718	-0.44611912

Tabla 12.4. Valores utilizados para el cálculo final de los parámetros Alpha (α) y Beta (β).

Los valores resultantes para Alpha (α) y Beta (β) son los siguientes:

Parámetro	Valor
Alpha (α)	36.45
Beta (β)	7.21

Tabla 12.5. Valores finales obtenidos para los parámetros Alpha (α) y Beta (β).

Finalmente, haciendo uso de la ecuación 8.2 se obtiene el tiempo promedio de horas de operación antes de la ocurrencia del modo de falla.

$$E(X) = MTTF = \alpha * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (\text{Ec. 8.3})$$

Parámetro	Valor
E(X) = MTTF	34 horas

Tabla 12.6. Tiempo promedio estimado antes de la próxima falla.

El valor obtenido de MTTF para el modo de falla “Fractura de chumacera derecha de tambor”, de la máquina Bandit, es de 34 horas, es decir que según los datos históricos el afilado de cuchillas debe realizarse cada 34 horas.