

**MODELAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y
MANTENIBILIDAD (RAM) A PARTIR DE LOS MODOS DE FALLA
DETECTADOS EN EL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD
(RCM), PARA EL ÁREA DE PLANTA DE LAVADO DE CARBONES DE
CERREJÓN LIMITED.**

OLIVER ALEXANDER RUIZ CALA

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

2019

**MODELAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y
MANTENIBILIDAD (RAM) A PARTIR DE LOS MODOS DE FALLA
DETECTADOS EN EL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD
(RCM), PARA EL ÁREA DE PLANTA DE LAVADO DE CARBONES DE
CERREJÓN LIMITED.**

OLIVER ALEXANDER RUIZ CALA

**Trabajo de grado para optar al título de Magister en Gerencia de
Mantenimiento**

Director:

**ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS
Ph. D., M. Sc., Ingeniero Mecánico.**

Codirector:

**LEONARDO PINILLA RODRIGUEZ
M. Sc., Ingeniero Electromecánico.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

A Dios por darme la fortaleza.

AGRADECIMIENTOS

A Dios; a mis padres; a mis hermanas; a mi futura esposa, a mis seres queridos y, por supuesto, a la Escuela de Ingeniería Mecánica y su cuerpo docente y administrativo, especialmente a Rosita; a mi director y codirector de proyecto; a Stivenson Estrada y todo los que me ayudaron a hacer este sueño posible.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	25
1.1 CONTEXTO DE LA EMPRESA	25
1.1.1 Ubicación del área objetivo en la estructura de la empresa.....	25
1.1.2 Propósito e importancia de la Planta de Lavado.....	26
1.1.3 Descripción del proceso de la Planta de Lavado.	28
1.1.4 Indicadores de Mantenimiento de la PL.....	30
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	31
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	32
1.4 OBJETIVOS.....	33
1.4.1 Objetivo General.....	33
1.4.2 Objetivo Específico	33
1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO	33
2. ANÁLISIS DE LA LITERATURA RECOPIADA	36
2.1 MARCO TEÓRICO	36
2.1.1 Análisis RAM (Confiabilidad, Mantenibilidad y disponibilidad).	36
2.1.1.1 Confiabilidad.....	37
2.1.1.2 Mantenibilidad.....	37
2.1.1.3 Disponibilidad.....	38
2.1.2 Diagrama de Bloques de Confiabilidad.....	39
2.1.3 Diagrama de Bloques en Serie.	40
2.1.4 Diagrama de Bloques en Paralelo.	41
2.1.5 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM).....	41
2.1.5.1 Cómo se planea el RCM.....	42
2.2 MARCO CONCEPTUAL	44

2.2.1 Funciones y Parámetros de Funcionamiento.....	44
2.2.2 Fallas Funcionales.	45
2.2.2.1 Tipos de fallas.....	45
2.2.3 Modos de fallas.....	46
2.2.4 Consecuencia de las Fallas.	47
2.2.4.1 Tareas, Frecuencias y Recursos.	47
2.2.4.2 Determinación de frecuencia para preventivos.	48
2.2.5 Análisis de Weibull.	49
2.2.5.1 Función de confiabilidad Weibull.....	51
2.2.5.2 Función de tasa de falla Weibull.	53
2.2.6 Software a implementar.	54
2.2.6.1 RCMCost:	55
2.2.6.2 AvSim.....	56
2.2.6.3 Costo del Ciclo de Vida Útil.....	57
2.3 MARCO LEGAL	58
2.3.1 Norma ISO 14224.	58
2.3.2 Norma SAE JA1011.....	59
2.3.3 Norma SAE JA1012.....	59
3. ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE LA PLANTA	60
3.1 ANÁLISIS GENERAL DE LOS PROCESOS DE LA PLANTA	61
3.1.1 Fronteras de los Sistemas.	61
3.1.2 Taxonomía y Nomenclatura de los Sistemas y Equipos.	63
3.2 ANÁLISIS FMEA.....	66
3.2.1 Asignación de Funciones por Componentes.....	67
3.2.2 Descripción de Fallas Funcionales y los Modos de Falla.....	70
3.2.3 Bases de datos del modelo: Efectos, Repuestos, Talento, Equipo.	73
3.3 ANÁLISIS Y DEPURACIÓN DE DATOS DE FALLA PARA LOS EQUIPOS ...	79
4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO	83
4.1 MODELO RCM	83

4.2 INCORPORACIÓN DEL ANALISIS RAM AL RCM.....	86
4.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO RBD.....	89
5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO	92
5.1 ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN INICIAL DE LA ESTRATEGIA.....	93
5.2 ANALISIS DE RESULTADOS.....	95
5.2.1 Análisis General de la PL y sus Circuitos.....	96
5.2.2 Análisis de los Dos Principales Circuitos Críticos.	99
5.2.3 Identificación de los MF a Mitigar o Contrarrestar.....	104
6. CONCLUSIONES	106
7. RECOMENDACIONES	108
BIBLIOGRAFÍA.....	109
ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso de Planta de Lavado	29
Figura 2. Curva P-F	48
Figura 3. Evaluación de falla mediante Weibull. Cambios en parámetro beta	51
Figura 4. Función de confiabilidad Weibull variando parámetros.....	52
Figura 5. Curva de tasa de falla. Variación de parámetro β y con γ en eje horizontal.	53
Figura 6. Versión del software AWB implementado.....	54
Figura 7. Árbol jerárquico para el área de PL.	67
Figura 8. Asignación de funciones en AWB, módulo RCMcost.	68
Figura 9. Relacionamiento de MF con funciones en RCMCost de AWB.	71
Figura 10. Árbol de Efectos y Consecuencias.	75
Figura 11. Árbol de Repuestos para cada Equipo.	76
Figura 12. Talento Humano en Servicio.....	77
Figura 13. Equipos disponibles para mantenimientos.....	78
Figura 14. Proporción de Análisis Weibayes – Segmento de matriz de MF	80
Figura 15. Ejemplo de la estructura interna de las tareas, modelo RCM.	84
Figura 16. Sets de Weibull para análisis de probabilidad de falla.....	86
Figura 17. Curva de probabilidad acumulada de tasa de confiabilidad.....	87
Figura 18. Probabilidad acumulada para tiempo de mantenimiento correctivo	88
Figura 19. Probabilidad acumulada para tiempo en mantenimiento preventivo	89
Figura 20. Modelo RBD de la PL, Cerrejón, en AvSim, AWB.	90
Figura 21. RBD por sistema (Arriba). Cadena de MF para FB-01 (Abajo).....	91

Figura 22. Perfil del Sistema por Circuitos del Sistema	94
Figura 23. Perfil de Labor – Planta Lavado.....	95
Figura 24. Confiabilidad por componente y de la PL	96
Figura 25. Frecuencia media de falla para la planta y cada circuito.	97
Figura 26. Frecuencia media de falla para la planta y cada circuito.	98
Figura 27. Horas hombre por labor, optimizada.....	99
Figura 28. Tasas de falla por componente del CA.....	100
Figura 29. Disponibilidad por componente del CA	100
Figura 30. Contribución por modo de falla-componente a la indisponibilidad de CA.....	101
Figura 31. Tasas de falla por componente del CMG.....	102
Figura 32. Disponibilidad por componente del CMG.....	102
Figura 33. Contribución por MF-componente a la indisponibilidad de CMG	103

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Indicadores de Mantenimiento calculados para 2011/2017.	30
Tabla 2. Componentes por Circuito para PL	64
Tabla 3. Segmento Matriz de MF y FF en RCM ESTANDAR.xlsx.	72
Tabla 4. Matriz de Efecto-Consecuencia.	74
Tabla 5. Ejemplo de set para variable $R(t)$ asociada a un modo de falla en un equipo	81
Tabla 6. Tabla de Contribución General a la Indisponibilidad de la PL	104
Tabla 7. Tabla de Contribución General a la Frecuencia de Falla de la PL	105

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Diagrama de Flujo Planta de Lavado	112
Anexo B. Identificación de Fronteras Planta de Lavado	113

GLOSARIO

El presente glosario se basa en las principales definiciones contempladas en las normas SAE-JA1011, SAE JA1012, ISO 14224-2016, como en otros documentos.

CONSECUENCIAS AMBIENTALES: un modo de falla o falla múltiple tiene consecuencias ambientales si puede violar cualquier norma ambiental corporativa, municipal, regional, nacional o internacional, o la regulación que aplica para el activo físico o sistema en consideración. ¹

CONSECUENCIAS DE FALLA: los efectos que puede provocar un modo de falla o una falla múltiple (evidencia de falla, impacto en la seguridad, en el ambiente, en la capacidad operacional, en los costos de reparación directos o indirectos). ²

CONSECUENCIAS EN LA SEGURIDAD: un modo de falla o falla múltiple tiene consecuencias en la seguridad si puede dañar o matar a un ser humano. ³

CONSECUENCIAS NO OPERACIONALES: una categoría de consecuencias de falla que no afecta adversamente la seguridad, el ambiente, o las operaciones, y que sólo requiere reparación o reemplazo de cualquier componente (s) que podría ser afectado por la falla.⁴

CONSECUENCIAS OPERACIONALES: una categoría de consecuencias de falla que afecta adversamente la capacidad operacional de un activo físico o sistema

¹ NORMA SAE: JA1011. Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. 1999, p. 4.

² Ibíd.

³ Ibíd.

⁴ Ibíd.

(producción, calidad del producto, servicio al consumidor, capacidad militar, o costos operacionales en adición al costo de reparación). ⁵

EFFECTO DE FALLA: lo que pasa cuando ocurre un modo de falla.⁶

FALLA FUNCIONAL: un estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible para ejercer una función específica a un nivel de desempeño deseado. ⁷

FALLA PARCIAL: es aquel deterioro que supera el deterioro admisible o tolerable por el usuario activo debido al tiempo de uso, sin llegar a comprometer totalmente el funcionamiento del equipo.

Puede ser tolerado con tal que no alcance el punto inaceptable para el usuario del activo. Por ejemplo, una bomba que debe tener una tasa de bombeo mínima de 800 litros por minuto y que por algún modo de falla está alcanzando una tasa de 600 litros por minuto, no cumple el requerimiento del usuario, pero no ha cesado completamente su funcionamiento, en este caso se está ante una falla funcional parcial.⁸

FALLA TOTAL: un estado en el que un activo físico o sistema no se encuentra disponible en ningún nivel, ces su funcionamiento completamente o deja de ejercer una función específica. Por ejemplo, cuando una bomba que debe mantener un caudal de 800 litros por minuto no bombea ninguna cantidad de agua, lo cual se traduce en una falla funcional total.⁹

⁵ Ibíd.

⁶ Ibíd.

⁷ Ibíd.

⁸ NORMA SAE: JA1012. Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). 2002, p. 14.

⁹ Ibíd.

FUNCIÓN: lo que el dueño o usuario desea que realice un activo físico o sistema.¹⁰

MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (MCC): en inglés *Reliability Centred Maintenance* o **RCM**, es cualquier proceso MCC debe asegurarse de responder satisfactoriamente las siguientes siete preguntas y, además, ser respondidas en la secuencia que se muestra:

1. ¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente (funciones)?
2. ¿De qué maneras puede fallar al cumplir sus funciones (fallas funcionales)?
3. ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?
4. ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla funcional (efectos de falla)?
5. ¿De qué manera afecta cada falla (consecuencias de falla)?
6. ¿Qué se debe hacer para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas e intervalos de tareas)?
7. ¿Qué se debe hacer si una tarea proactiva que conviene no está disponible (acciones predeterminadas)?¹¹

MODO DE FALLA: un evento único, que causa los estados de falla, como por ejemplo una falla funcional. Responde a la pregunta “¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?”.¹²

MTBF: es Tiempo Medio Entre Fallas (*Mean Time Between Failures*), por lo tanto, es el tiempo medio o promedio que la máquina trabaja sin presentar alguna falla. Matemáticamente se puede calcular como el promedio de las horas que trabaja una máquina antes de una falla. También se podría determinar como las horas trabajadas en un periodo divididas en el número de fallas en dicho periodo¹³.

¹⁰ NORMA SAE: JA1011. *Op. Cit*, p. 5.

¹¹ *Ibíd.*

¹² NORMA SAE: JA1012. *Op. Cit*, p. 15.

¹³ ZEGARRA, Manuel. Indicadores para la Gestión del Mantenimiento de Equipos Pesados. En: Ciencia y Desarrollo. Universidad Alas Peruanas. Volumen 19 (1): 25- 37. Enero-Junio 2016, p.32.

MTTR: Este indicador muestra el tiempo promedio que demoran las reparaciones o intervenciones a la máquina por motivos mecánicos. Es el tiempo que la máquina se encuentra bajo el estado de reparación (inoperativa para el trabajo). Se calcula como la división de las horas invertidas en reparaciones en un periodo de tiempo entre el número de paradas en ese periodo¹⁴.

¹⁴ Ibídem, p.31.

SIGLAS

BN: *Bin Gate*, Tolvas que pueden pertenecer al sistema de recibo o de rechazo, por ejemplo.

CV: *Raw Coal Conveyor*, Banda de Recibo del Carbón.

CR: *Raw Coal Crushers*, Trituradora de Carbón Crudo.

CF: Centrifuga. Puede ser usada en el sistema de finos, de gruesos, entre otros.

CY: *Cyclones*, en general ciclones. Según el sistema pueden corresponder a *Dense Medium Cyclones*, Ciclones de Medio Denso o Ciclones de Densidad Media.

FB: *Feeder-Breaker*, sistema Alimentador-Rompedor o Alimentador-Picador.

FL: *Flocculant*, Unidad de Dosificación y Preparación de Floculante.

FMECA: Failure Model, Effects and Criticality Analysis, se refiere en español al análisis de criticidad y efectos en el modelo de fallas.

KPI: *Key Performance Indicators*,

LM: *Lime Mixing*, unidad de mezclado de limos.

ME: *Magnet*, magneto.

MCC: Mantenimiento Centrado En Confiabilidad (RCM en inglés)

MD: *Metal Detector.*

MS: *Magnetic Separator, separadores magnéticos.*

MTBS: *Mean Time Between Shutdowns*, en español **TMEP**, Tiempo Medio Entre Paradas.

MTTR: *Mean Time To Repair*, en español **TMPR**, Tiempo Medio Para Reparar

MTBF: *Mean Time Between Failures*, o en español **TMEF**, Tiempo Medio Entre Fallas.

MTBFS: *Mean Time Between Failures Shutdowns*, o en español **TMEPF**, Tiempo Medio Entre Paradas por Fallas.

M o M(i): *Maintainability* o Mantenibilidad, puede ser correctiva **CO**, o planeada (preventiva) **PM**.

PL: Planta de Lavado.

PP: Bomba de Alimentación.

R o R(i): *Reliability*, o en español **C**, Confiabilidad.

RAM: *Reliability, Availability, Maintainability*, corresponde en español al análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad, CDM.

RBD: *Reliability Block Diagram*, en español: diagrama de bloques de confiabilidad.

RCM: *Reliability Centred Maintenance.*

SC: *Screen*, tamiz. *Desliming Screen* en el caso del tamiz de desenlode, también hay tamiz de producto (*Product Screen*), entre otros según el sistema.

SP: *Spiral*, espirales.

SM: *Sump*, sumidero.

TH: *Tailings Thickener*, espesador de relave.

RESUMEN

TITULO: MODELAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD (RAM) A PARTIR DE LOS MODOS DE FALLA DETECTADOS EN EL MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM), PARA EL ÁREA DE PLANTA DE LAVADO DE CARBONES DE CERREJÓN LIMITED*

AUTOR: OLIVER ALEXANDER RUIZ CALA**

PALABRAS CLAVE: RCM, RAM, RBD, Análisis Weibull, modos de falla, tasa media de falla, confiabilidad.

DESCRIPCIÓN:

El modelo RCM es un modelo de gestión de la confiabilidad, aunque desarrollado por la industria de la aviación, propone una estrategia completa y aplicable a cualquier industria donde se evalúan las tareas más pertinentes para mantener en óptimas condiciones los equipos de un proceso optimizando el costo operativo. Normalmente, el R C M es de tipo cualitativo, sin embargo, si se combina con otras estrategias como el análisis RAM para la disponibilidad de los equipos, aporta un contexto cuantitativo que, además, permite optimizar la frecuencia de mantenimiento a partir de la tasa de falla. En este proyecto se propone una estrategia que además incorpora el análisis del flujo del proceso de la planta entre sus sistemas y componentes mediante las conexiones de un RBD que se interconecta con las estrategias mencionadas. Ello permite lograr una gestión del mantenimiento eficiente para el área de Planta de Lavado, una vez se ha optimizado, logrando disponibilidades superiores al 80%, y tiempos medios para reparación en general menores a 5 horas con confiabilidad medida en MTBO para la planta de 26,49 hrs, variando por sistema entre 46,02 hrs para el Circuito de Material Grueso, y 138,3 hrs para el sistema de Suministro de Agua.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Mecánica Maestría en Gerencia de Mantenimiento Director: Alberto David Pertuz Comas Ph. D., M. Sc., Ingeniero Mecánico. Codirector: Leonardo Pinilla Rodriguez M. Sc., Ingeniero Electromecánico.

ABSTRACT

TITLE: RELIABILITY, AVAILABILITY AND MAINTAINABILITY (RAM) MODELING BASED ON THE FAILURE MODES DETECTED IN RELIABILITY CENTRED MAINTENANCE (RCM), FOR THE COAL WASHING PLANT AREA OF CERREJÓN LIMITED*.

AUTHOR: OLIVER ALEXANDER RUIZ CALA**

KEYWORDS: RCM, RAM, RBD, Weibull analysis, failure modes, average failure rate, reliability.

DESCRIPTION:

The RCM model is a reliability management model developed by the aviation industry, as it proposes a complete strategy applicable to any industry where the most pertinent tasks are evaluated in order to maintain optimal work equipment in terms of optimizing operating costs. Normally, the RCM is qualitative; however, if it is combined with another strategy such as RAM analysis for the availability of equipment, it provides a quantitative context that also allows optimizing the maintenance frequency based on the failure rate.

This project proposes a strategy that also incorporates the analysis of the process flow of the plant, between its systems and components, this is a RBD model that is interconnected with the mentioned strategies. This allows to achieve an efficient maintenance management for the Washing Plant area, once it has been optimized, achieving availabilities above 80%, and average times for repairs in general less than 5 hours with reliability measured in MTBO for the plant of 26.49 hrs, varying by system between 46.02 hrs for the Coarse Material Circuit, and 138.3 hrs for the Supply System of Water.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Mecánica Maestría en Gerencia de Mantenimiento Director: Alberto David Pertuz Comas Ph. D., M. Sc., Ingeniero Mecánico. Codirector: Leonardo Pinilla Rodríguez M. Sc., Ingeniero Electromecánico.

INTRODUCCIÓN

La planta de lavado es un área fundamental en el cerrejón, y por años ha estado cobrando importancia en la empresa al punto de ser un referente estratégico para mantener la calidad de la materia prima y conservar la reputación de la empresa ante mercados exigentes y reservas de materia prima con menor pureza. Por ello, se hace relevante la incorporación de ideas y estrategias que apunten a la mejora de los indicadores operativos que han estado mayormente por debajo de las metas planeadas para el área de Planta de Lavado de Carbones del Cerrejón Limited.

Durante la tesis, se genera una estrategia de gestión de mantenimiento argumentada en la simulación del RCM-RAM-RBD a través de Isograph Availability Workbench 3.0, un software de gran rendimiento; así mismo, se soporta en bases conceptuales ampliamente estudiadas en otras industrias. El modelamiento RAM emplea un estudio estadístico del historial de modos de fallas de la planta de lavado (sistema), potencializado en este caso con el modelo RBD que relaciona los modos de fallas de acuerdo al diagrama de flujo de procesos del área (filosofía operacional).

La propuesta genera un modelo cuantitativo que permite establecer tareas de mantenimiento y sus frecuencias de aplicación. Sin embargo, su limitación principal es ser la línea base de esta clase de estrategias en la empresa. Los datos presentan ruidos, información difusa o incompleta. Se requirió depuración y selección adecuada para la aplicación del modelo Weibull. Algunos MF no cuentan con datos fiables y por tanto, se acude a la combinación de la experiencia de operadores o profesionales del área mediante el método Weibayes. La proporción de datos con influencia subjetiva llega al 20%.

La estrategia inicialmente no arroja resultados esperados y esto se debe a la presencia de tiempos de intervención inadecuados para muchos de los MF que presentan características de falla temprana; en cuyo caso, se aplicó un estudio de sensibilidad para optimizar los tiempos del mantenimiento en cada componente y hallar la solución final que responde a las metas operativas del área y de la tesis.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 CONTEXTO DE LA EMPRESA

CARBONES DEL CERREJON LIMITED es actualmente la encargada de operar el yacimiento del Cerrejón, ubicado en la península de la Guajira al noreste de Colombia con una superficie de 69 mil hectáreas en la cuenca del valle del río Ranchería, 100 Km al sur de Riohacha. Cerrejón es la mina de carbón a cielo abierto más grande del mundo con más de 30 años de producción, siendo reconocida por el carbón de calidad de exportación ocupando lugares sobresalientes en Europa, el Mediterráneo y América del Norte¹⁵. En el Cerrejón han sido rehabilitadas más de 3000 hectáreas que han salido de producción, y se han llevado a condiciones similares o mejores a las que poseía previamente a la explotación. El carbón producido es implementado principalmente en la generación de energía eléctrica, su poder calorífico actualmente va desde los 10.600 BTU hasta un poco más de 12000 BTU, aunque inicialmente podía superar los 13.000 BTU; esta reducción se debe a que ha disminuido la calidad del material disponible conforme avanza la búsqueda de reservas y su explotación. La producción a 2017 rondó los 32 millones de toneladas (MT) de carbón¹⁶.

1.1.1 Ubicación del área objetivo en la estructura de la empresa. El proceso de explotación y producción del carbón está a cargo del Departamento de Manejo de Carbón (DMC), el cual a su vez se subdivide en 3 superintendencias: la primera, Plantas, Flujo y Control de Calidad del Carbón es la que recibe la materia prima y la

¹⁵ MEJÍA, Lina. Cifras históricas para Cerrejón. Agencia Nacional de Minería [en línea]. citado el 2 de diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.anm.gov.co/?q=Cifras-historicas-para-Cerrejon>

¹⁶ CERREJÓN, Minería Responsable [En línea]. Página Web. 2017. citado el 2 de diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.cerrejon.com/index.php/nuestra-operacion/nuestra-empresa/>

acondiciona para obtener los niveles de calidad que cumplan los requerimientos del cliente. La segunda, Ferrocarril, es la superintendencia encargada de todo el proceso de transporte desde los silos de almacenamiento del carbón de calidad hasta el puerto donde será embarcado. La tercera es la superintendencia de Puerto Bolívar, la cual asegura el adecuado proceso de cargue y exportación del producto en las mejores condiciones posibles.

Además, la superintendencia de Plantas, Flujo y Control de Calidad del Carbón está compuesta de 3 plantas: la planta de carbón número 1 y la planta de carbón número 2 encargadas de transformar la granulometría hasta obtener productos de 2 in y 6 in, en alrededor de 6 mil Tonelada por Hora (THP) para la planta 1, y 2000 THP en la planta 2; y la planta número 3, que es la Planta de Lavado (PL), la cual se ocupa de la limpieza y lavado del carbón producido de los yacimientos explotados que van aportando cada vez material de menor calidad. La PL se encarga de retirar impurezas como las cenizas y acondicionar el producto a los requerimientos de calidad y poder calorífico solicitados por el cliente.

La PL es el área sobre la que se desarrolla el presente proyecto, esta ha tomado una relevante importancia en los últimos años para mantener la calidad con la que se ha destacado la producción de la empresa ante los mercados internacionales.

1.1.2 Propósito e importancia de la Planta de Lavado. La Planta de Lavado (PL) comprende una serie de sistemas y componentes que interactúan desarrollando operaciones cuyo propósito es aislar el carbón de alimentación que llega a ella, de todos los materiales estériles que afecten la calidad y poder calorífico del mismo como lo son las arcillas y las cenizas. En otras palabras, la extracción de los agentes contaminantes permite elevar la calidad del producto para cumplir las exigencias de calidad exportación con las que Cerrejón se ha caracterizado.

La adecuada operación de la Planta de Lavado responde a las dificultades planteadas por tres características bien definidas: características geológicas (que definen la pureza de la materia prima), tiempo de producción de los yacimientos (que generan disminución de la calidad de la materia prima disponible) y la competitividad del producto en el mercado (que establecen las condiciones de aceptación del producto a nivel comercial).

En cuanto a la primera, el carbón se presenta en capas de inclinación variable unido a materiales estériles intrínsecos (procedentes de elementos inorgánicos que forman parte de la estructura íntima de los vegetales superiores), o materiales estériles que proceden de aportes de sedimentos inorgánicos, arcillosos y arenosos; así mismo, se encuentra mezclado con materiales de origen antrópico, los cuales, proceden de la imperfección de los procesos de extracción minera¹⁷. Esta primera característica destaca que a mayores impurezas es más necesario el proceso de lavado y limpieza.

En la segunda característica, se ubican los más de 30 años de producción de Cerrejón. Esto ha agotado los mejores recursos que han dado tan amplia reputación a la compañía y que ahora busca mantener con esmero. Actualmente es más común encontrar y explotar materias primas con menor pureza debido al agotamiento de las reservas de carbón de más alta calidad. El poder calorífico in situ se ve reducido por la falta de pureza del nuevo material, mayor material contaminado se traduce en un incremento de la tasa de alimentación de la planta de lavado sin observar mejora en la eficiencia de sus procesos operacionales.

Por último, el mercado y la competitividad han cambiado con los años, las empresas hoy en día son variadas y los avances en tecnología y técnicas de operación han aumentado la competencia entre las empresas, a esto se suma compradores más

¹⁷ CERREJÓN. Manual de Operación: Planta de Lavado. Código: MA-MDC-PC-0001. 2009, p.6-12.

exigentes y demandan rangos de calidad estrechos que se ajusten específicamente a sus necesidades. Todas estas características mencionadas son las que han llevado al incremento de la alimentación y operación de la PL en busca de obtener un material de mayor calidad que pueda mezclarse con la producción no contaminada y cumplir con las especificaciones comerciales.

1.1.3 Descripción del proceso de la Planta de Lavado. La PL se compone de 50 componentes principales o en uso, distribuidos en 8 sistemas o circuitos que incluyen el circuito de alimentación, de material grueso, de material fino, de salida de producto, de rechazos, entre otros; los cuales serán presentados en el análisis taxonómico del proceso de la planta realizado más adelante.

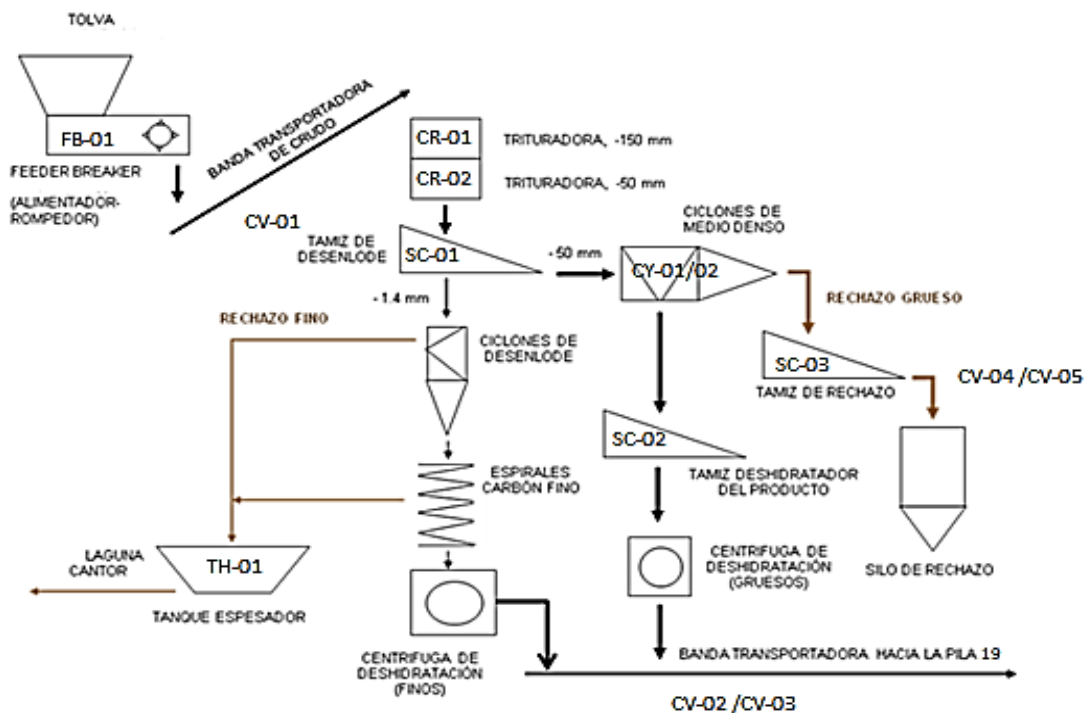
El proceso en esta área se puede observar en el Anexo A. Diagrama de Flujo Planta de Lavado. El equipo FB-01 es el equipo alimentador-rompedor, inmediatamente anterior a la a las tolvas presentadas y no alcanzan a quedar en el plano general de la empresa, pero se observa en el diagrama simplificado de la figura 1. En términos generales, el proceso se describe a continuación¹⁸:

El material de interface y/o contaminado obtenido de los yacimientos que van agotándose debido a la explotación es descargado en la tolva, luego el alimentador-rompedor FB-01 arrastra el material que es llevado al rompedor que lo tritura a un tamaño de 12 in; posteriormente, este es descargado a una banda CV-01 para su transporte a una trituradora primaria CR-01, la cual, lo transforma a un tamaño de 6 in; en seguida, el material pasa por una trituradora secundaria CR-02 que lo transforma a un tamaño de 2 in; después, el material es llevado a un tamiz SC-01 que separa todo material por encima de 1.4mm porque es considerado material grueso, y lo que pasa por debajo es considerado material fino.

¹⁸ CERREJÓN. Manual de Operación. *Op. Cit*, p.4.

En cuanto al material grueso, este es mezclado con uno de tipo medio denso (agua más magnetita), y llevado a los ciclones de medio denso CY-01/02; En seguida, es separado el producto (carbón) y el rechazo (cenizas). El producto grueso es trasportado por medio de unas bandas trasportadora CV-02/03 hasta la pila 19, y el rechazo grueso es llevado por medio de unas bandas trasportadora CV-04/05 hasta el silo de rechazo. Por otro lado, el material fino menor a 1.4 mm continúa a través de unos ciclones de desenlode y espirales; el rechazo fino es llevado al tanque espesador TH-01, en el que se recolecta y compacta por medio de floculantes y acción de la gravedad, para ser enviado a la laguna cantor (lodos); el carbón fino es deshidratado, para ser trasportado por las bandas CV-02/03 donde se une con el carbón grueso y es descargado a la Pila 19 (Figura 1).

Figura 1. Proceso de Planta de Lavado



Fuente: Modificado de: CERREJÓN. Manual de Operación: Planta de Lavado.
Código: MA-MDC-PC-0001. 2009, p.5

La planta de lavado está diseñada para manejar hasta 500 toneladas por hora de material de alimentación, que no es más que carbón contaminado extraído de la interfase de los mantos, su poder calorífico bajo no lo hace apto comercialmente y por ello pasa por el proceso de lavado, obteniéndose un material de alta calidad el cual se almacena para mezclarse con los carbones de las pilas de la mina de las plantas de trituración y luego ser enviado a Puerto Bolívar como carbón comercial¹⁹.

1.1.4 Indicadores de Mantenimiento de la PL. En la tabla 1, se puede observar indicadores de la operación de la planta y su variación de 2011 a 2017.

Tabla 1. Indicadores de Mantenimiento calculados para 2011/2017.

INDICADORES DE MANTENIMIENTO	2011	2017
Hr totales Operación Planeadas	6602	6875
Hr totales Operación Real	6134	5303
MTBF_Planeada (Hr)	34,4	35,81
MTBF_Real (Hr)	29,8	36,83
MTTR_Planeada (Hr)	6,5	6,6
MTTR_Real (Hr)	6,7	11,2
Disponibilidad Planeada	84%	85%
Disponibilidad Real	82%	77%
Confiabilidad_Planeada (en 12h)	71%	72%
Confiabilidad_Real (en 12h)	67%	72%

Fuente: Cálculos hechos por el autor con datos tomados de los históricos de operación de PL Cerrejón. Derechos sobre los datos reservados a Cerrejón.

De estos cálculos se observa que la disponibilidad se ha reducido, además de un incremento en el MTTR y MTBF real sin cumplir las metas y con una reducción considerable de las horas de operación debido a que los problemas o ineficiencias operacionales sin una adecuada política de mantenimiento, llevan a sacrificar tiempos de operación para lograr confiabilidad.

¹⁹ CERREJÓN. Refresco en Operación Planta de Lavado. Presentación. 2016, p.2.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agotamiento de materia prima de alta calidad y el aumento de material contaminado debido características geológicas, así como años de producción acumulada del yacimiento, han llevado a la compañía a poner la mirada sobre la Planta de Lavado con el fin de cumplir las crecientes exigencias del cliente. Por tal motivo, se están direccionando esfuerzos estratégicos en corregir debilidades e implementar de forma oportuna políticas y planes para la operación eficiente de esta planta.

Este incremento en la alimentación de la planta se puede ver en datos históricos de alimentación de la misma. En 2015, la planta recibía una alimentación de 1,1 MT por día, pero este requerimiento de procesamiento ha crecido con los años pasando a 2,3 MT en 2017, un crecimiento de alrededor de 110%, luego a 2.8 MT en 2018 y se espera un promedio de alimentación de 3,2 MT en 2019, lo que representa un crecimiento desde el 2015 de alrededor del 200%.

Sin embargo, la operación de la planta no se ha adaptado a las nuevas exigencias y no se han tomado medidas efectivas que soporten y promuevan el logro de las metas operacionales, especialmente en escenarios de mayor exigencia de operación. En la tabla 1, al comparar los indicadores de mantenimiento en operación planeadas versus las reales de Cerrejón para la Planta de Lavado (PL) entre 2011 y 2017, es claro constatar que la disponibilidad fue de 82%, 2% por debajo de la planeada; y la confiabilidad fue de 67%, 4% por debajo de la planeada. Esto significa que para un turno (12 Hr) de operación existe un 33% de probabilidad de falla. En 2017, la confiabilidad fue de 72% cumpliendo con lo planeado a costa de un tiempo medio de reparación casi un 60% mayor a lo planeado, dando como resultado una disponibilidad de 77% por debajo, un 8% del planeado.

Es debido a ello que se requiere de un mejor programa operacional para integrar estrategias de mantenimiento que reflejen, a través de los indicadores, una alta confiabilidad y disponibilidad para garantizar una operación óptima y de gran rendimiento de la planta de lavado. En consecuencia, se promueve la implementación de esfuerzos en estudiar la estructura del proceso de la PL, verificar su operación a nivel de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad con el fin de planear tareas que permitan cumplir las horas de operación planeadas al menor costo. De este modo, para el nuevo contexto de alta exigencia operativa de la planta de lavado, se busca generar una nueva estrategia que pueda responder a las necesidades de la compañía para asegurar la calidad de carbón a sus clientes, y así, su competitividad en el mercado.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El desarrollo del proyecto responde a la siguiente pregunta:

A partir del modelamiento mediante Diagrama de Bloques de Confiabilidad (*Reliability Block Diagram*, RBD) y el estudio detallado de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (*Reliability, Availability, and Maintainability*, RAM), basado en los modos de fallas detectados en la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (*Reliability Centred Maintenance*, RCM)

¿Qué estrategia de mantenimiento podría plantearse para asegurar el óptimo balance entre costo, riesgo y desempeño? Así mismo, ¿permite responder al exigente contexto operacional actual, mejorando la confiabilidad y disponibilidad de la planta de lavado?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General. Proponer una estrategia de mantenimiento de acuerdo a la simulación del modelamiento RBD, basada en los modos de fallas del RCM y el análisis RAM, que permita aumentar la confiabilidad y disponibilidad operativa del área de Planta de Lavado de Carbones de Cerrejón Limited.

1.4.2 Objetivo Específico

- Desarrollar la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) de la planta de lavado para evaluar los modos de falla.
- Realizar el modelo Diagrama de Bloques de Confiabilidad (RBD) de la planta de lavado para relacionar los modos de falla evaluados en la metodología RCM.
- Realizar el análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM) a los modos de fallas detectados por el RCM.
- Simular el modelamiento RBD, basados en los modos de fallas del RCM y el análisis RAM, para evaluar las condiciones necesarias para el desarrollo de la estrategia de acción.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PLAN PROPUESTO

En la actualidad, la planta de lavado ha adquirido gran importancia dentro de la compañía, más aún, por ser indispensable para mantener el producto con la calidad solicitada por los clientes y sostener el reconocimiento de proveedor confiable, el cual, se ha logrado ampliamente en el mercado durante los años.

Conforme el desarrollo del mercado, las exigencias operativas han aumentado sustancialmente. las toneladas alimentadas a la planta crecieron alrededor de un 200% y las condiciones de operación requieren de la disminución considerable de

las paradas no programadas por fallas inesperadas, generalmente más largas y más costosas, de modo que se hace necesario buscar la excelencia operativa donde la confiabilidad y disponibilidad son los indicadores fundamentales.

En base a ello, se hace relevante un análisis que descubra cuantitativamente la disponibilidad del sistema, la confiabilidad y la mantenibilidad del equipo, y que sea capaz de identificar los subsistemas críticos y el equipo que principalmente influye en el rendimiento del sistema. De hecho, el objetivo de los análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM) es aumentar la capacidad de un sistema para operar normalmente durante mucho tiempo y sin fallas.

En consecuencia, no basta tener un compilado amplio de datos poco analizados o coherentes, la importancia está en contar con datos comprobados de confiabilidad lo cual beneficiará la toma de decisiones respecto de los planes de mantenimiento de los equipos. Por ello, al conocer de antemano las fallas que se presentarán en los equipos, el plan de mantenimiento podrá anticiparse a las mismas. Esta ventaja competitiva consiste en tomar acciones antes que se generen las fallas, pero sin exceder las operaciones de mantenimiento que penalicen el tiempo productivo. La finalidad es corregir el sacrificio de tiempo operacional y disponibilidad en pro de confiabilidad.

Adicional al análisis RAM, la búsqueda de soluciones lleva a contemplar el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Esta es una metodología ampliamente aceptada que ha estado disponible en la industria por más de 30 años, y ha demostrado ofrecer una estrategia eficiente para la optimización de, Mantenimiento Programado (PM, por sus siglas en inglés). De hecho, el objetivo de RCM es identificar los tipos e intervalos de mantenimiento solo en relación con las características críticas reales de los diversos componentes, preservando las funciones más importantes del equipo con la confiabilidad requerida al menor costo de mantenimiento.

El desarrollo completo de una estrategia de mantenimiento efectiva requiere además de los análisis expuestos, el comprender la estructura del proceso y cada una de las relaciones de los sistemas, subsistemas y componentes entre ellos, para facilitar la comprensión del flujo de material, y las posibles afectaciones de un evento adverso o de un MF. Por ello, al proyecto se incorpora los Diagramas de Bloques de Confiabilidad (RBD), con el fin de desarrollar el modelamiento y simulación de la confiabilidad de sistemas y nos determinan como afectan los efectos de las fallas de los diferentes componentes al desempeño de los sistemas.

La integración del modelamiento RBD, el análisis de RAM y RCM se plantea en el siguiente proyecto como los mecanismos para alcanzar una alta eficiencia del sistema, solucionando las carencias de atención y organización en el área y podría contribuir a optimizar las políticas de mantenimiento, con el fin de reducir los problemas críticos y, en consecuencia, aumentar la confiabilidad y disponibilidad operativa del sistema.

2. ANÁLISIS DE LA LITERATURA RECOPIADA

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Análisis RAM (Confiabilidad, Mantenibilidad y disponibilidad). En trabajos de diversos autores como DU, MORA, NASERI, PHAM Y UPARELA, se menciona que el desarrollo de las técnicas de confiabilidad comienza en la Segunda Guerra Mundial, como una respuesta a los rápidos desarrollos tecnológicos y a las intensas exigencias sobre los equipos, donde se busca analizar sistemáticamente la causa de las fallas e incorporar los resultados en diseños mejorados²⁰.

Con esta metodología se busca evaluar la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de sistemas reparables, a través del tratamiento estadístico de su historial de fallas y reparaciones. La confiabilidad, la mantenibilidad y la disponibilidad “son prácticamente las únicas medidas técnicas y científicas, fundamentadas en cálculos matemáticos, estadísticos y probabilísticos, que tiene el mantenimiento para su análisis”²¹ y su evaluación integral y específica. De acuerdo a Mora, es a través del RAM que se puede planear, organizar, dirigir, ejecutar y controlar totalmente la gestión y operación del mantenimiento²².

²⁰ Basado en: DU, Junrong. *Evaluation Of Equipment Reliability, Availability And Maintainability In An Oil Sands Processing Plant*. University of British Columbia. Vancouver: April, 2008.

MORA GUTIERREZ, Luis A. *Mantenimiento Industrial Efectivo*. Medellín: Coldi Limitada, 2009.

NASERI, Masoud. *RAM Analysis of Oil and Gas Production Facilities Operating in the Arctic Offshore*. Universidad del Ártico de Noruega, 2016.

PHAM, Hoang. *Handbook of Reliability Engineering*. Springer. Springer Ed, 2003.

UPARELA SAAD, Juan M. *Medición Estratégica CMD en el Sistema de Vapor de una Planta Química en el Departamento del Atlántico*. Universidad EAFIT. Medellín, 2013.

²¹ MORA GUTIERREZ. Op, cit.

²² Ibíd.

2.1.1.1 Confiabilidad. La confiabilidad puede ser expresada como la probabilidad de que un ítem pueda desempeñar su función requerida durante un intervalo de tiempo establecido y bajo condiciones de uso definidas según autores como Lafraia, Kelly & Harris, Pupo Malabet y Nakajima²³.

La confiabilidad estudia la longevidad y el fallo de los equipos, usando principios científicos y matemáticos para una mayor comprensión de los fallos de los dispositivos, permitiendo identificar mejoras que se pueden introducir para eliminar, o por lo menos, minimizar las consecuencias de los fallos. La confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente su función prevista bajo unas condiciones específicas durante un tiempo determinado. Puede ser expresada a través de la expresión de la ecuación 1:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{Ec(1)}$$

Donde:

R(t)	Confiabilidad de un equipo en un tiempo t dado
e	Constante neperiana
λ	Tasa de fallas (# de fallas por periodo de operación)
t	Tiempo

2.1.1.2 Mantenibilidad. La mantenibilidad se define como la probabilidad de que un equipo sea restablecido a una condición especificada dentro de un periodo de tiempo dado, usando recursos determinados. También, se puede definir como “la

²³ Basado en: LAFRAIA, João Ricardo Barusso. *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2001.
 KELLY, A. & HARRIS, M.J. *Gestión del mantenimiento industrial*. Fundación Repsol, YPF, 1998.
 PUPO MALABET, Iván Enrique. *Estrategias de Mantenimiento y Operación en Línea de Trituración y Apilamiento Cerro Matoso S.A. Montelíbano – Colombia, desde el Análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad Alcanzada*. Universidad EAFIT. Medellín, 2014.
 NAKAJIMA, Seiichi N. S. *Introducción al TPM Programa para el Desarrollo*. Fundación REPSOL. España: Cambridge, Productivity Press, D.L. 1991.

probabilidad de restablecer las condiciones específicas de funcionamiento de un sistema, en límites de tiempo deseados, cuando el mantenimiento es realizado en las condiciones y medios predefinidos”²⁴.

Esta puede ser estimada así:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad \text{Ec(2)}.$$

Donde:

M(t)	Mantenibilidad
e	Constante neperiana
μ	Tasa de reparaciones
t	Tiempo previsto de reparación MTTR

2.1.1.3 Disponibilidad. La disponibilidad de un dispositivo es la probabilidad de que un equipo funcione satisfactoriamente en el momento en que sea requerido, después del comienzo de su operación, cuando se usa bajo condiciones estables funcionando en cualquier tiempo, de acuerdo a lo citado por Kelly & Harris²⁵.

Adicionalmente, Monchy establece que la disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionabilidad de un elemento²⁶. Se pueden calcular diferentes tipos de confiabilidad, esto depende de los datos que se tengan y los requerimientos de la organización, teniendo en cuenta lo que se quiera medir y controlar, Mora describe este procedimiento²⁷.

²⁴ MONCHY, François. *A Função Manutenção*. Editora Brasileira/Editora Duran, 1989.

²⁵ KELLY & HARRIS. Op, cit.

²⁶ MONCHY. Op, cit.

²⁷ MORA, 2009. Op, cit.

La confiabilidad se puede medir así:

$$Disponibilidad = \frac{Confiabilidad}{Confiabilidad + Mantenibilidad}$$

$$= \frac{Disponibilidad}{\frac{Tiempo en que el dispositivo opera correctamente y funciona bien}{Tiempo en el que el equipo puede operar}} \quad Ec(3).$$

De otra forma:

$$= \frac{Disponibilidad}{\frac{Media de los tiempos utiles}{Media de los tiempos utiles + Media de los tiempos de no funcionalidad}} \quad Ec(4).$$

La confiabilidad depende de las fallas; la mantenibilidad de las reparaciones o de la eliminación de fallas; o de los mantenimientos que se puedan hacer y la disponibilidad de ambos, de las fallas y reparaciones.

La metodología RAM consiste en poder predecir el comportamiento futuro de los equipos, en cuanto a saber sobre: las fallas o reparaciones (tiempos y fechas de ocurrencia), los tiempos útiles (duración y días en que ocurrirán), los mantenimientos planeados (para su programación en tiempos y frecuencias).²⁸

2.1.2 Diagrama de Bloques de Confiabilidad. Los diagramas de bloques de confiabilidad son una de las herramientas que facilitan el modelamiento y simulación de la confiabilidad de sistemas. Estos determinan como perturban en el desempeño de los sistemas los efectos de las fallas de los diferentes componentes. Este diagrama define la dependencia o independencia secuencial de todas las funciones

²⁸ Ibíd.

de un sistema para cada evento del ciclo de vida. Cabe citar algunos aspectos a tener en cuenta en un diagrama de bloque:

- Define la lógica de interacción de fallas dentro de un sistema.
- Cada bloque representa (componentes o subsistemas) que pueden fallar y al hacerlo pueden ocasionar o no la falla del sistema bajo análisis.
- El comportamiento de confiabilidad de cada bloque puede ser descrito en un diagrama de jerarquía inferior²⁹, por lo cual, se realiza el modelo del flujo a través de la red.
- El éxito de la función exige, por lo menos, un camino acertado entre los nodos de entrada y salida.
- Para cada bloque del diagrama general se debe calcular su confiabilidad $R(t)$ en función de la rata de falla y de la densidad de falla.

Si tenemos un modo de falla repentino en el sistema se dice que se tiene un sistema de bloques de confiabilidad compuesto por bloques en serie; si tenemos un modo de falla abierto en el sistema se dice que se tiene un sistema de bloques de confiabilidad compuesto por bloques en paralelo.

2.1.3 Diagrama de Bloques en Serie. En la configuración de un diagrama de bloques en serie, cuando falla cualquier componente fallara el sistema completo. Por consiguiente, para el éxito funcional de un sistema en serie todos los componentes deberán funcionar con éxito durante el tiempo de disponibilidad deseada.

Si se conoce la confiabilidad de los bloques individuales $R_1, R_2 \dots R_n$ la confiabilidad del sistema es:

$$R(s) = R_1 * R_2 * R_3 * \dots \dots \dots R_n \quad \text{Ec(5).}$$

²⁹ LAFRAIA; KELLY & HARRIS; PUPO MALABET; NAKAJIMA. Op, cit.

Esta clase de sistemas se ve limitado en los procesos y el impacto de los tiempos de reparación de los equipos es más crítico para la operación. Cuando uno de los componentes individuales falla, entonces falla todo el sistema.

2.1.4 Diagrama de Bloques en Paralelo. La configuración de un diagrama de bloques en paralelo se da cuando la falla de todo el componente del sistema resulta en falla del sistema. Por consiguiente, para un sistema en paralelo, el éxito de solamente un componente puede ser suficiente para garantizar el éxito del sistema para el tiempo de disponibilidad deseado del sistema. La confiabilidad del sistema en paralelo es:

$$R(s) = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \dots (1 - R_n). \text{ Ec(6)}$$

En los sistemas en paralelo, la confiabilidad es mayor que en los sistemas en series, además el impacto de los tiempos de reparación de uno de los equipos es reducido por el funcionamiento de los *backups* de dicho equipo. Sin embargo, poseer equipos en paralelo, muchas veces parados, produce un costo elevado que debe sopesarse con las características de rentabilidad del proyecto.

2.1.5 Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad es una metodología de alta aplicación en las empresas industriales, en ella prima la disponibilidad de los activos y requieren optimizar los costos operativos. Otros de los aspectos que impactan en la implementación de un RCM son mejorar los índices de seguridad y la preservación del medio ambiente.

El mantenimiento basado en la metodología RCM, se destaca del mantenimiento tradicional porque busca preservar las funciones del equipo, no busca prevenir las fallas sino evitarlas, reducirlas o eliminarlas. Otros de sus objetivos son: construir defensas costo-efectivas razonables contra fallas, y aceptar la ocurrencia de algunas fallas al momento de presentarse. Esta metodología prioriza técnicas

predictivas y de condición para extender el ciclo de vida del equipo, por ello, se debe disponer de personas e información que permitan identificar los modos de falla de los equipos.

2.1.5.1 Cómo se planea el RCM. Lo común es pensar en planear un RCM basándose directamente en las fallas que se han presentado a lo largo de un periodo de trabajo, pero la realidad es que primero se debe estudiar muy bien otras condiciones para asegurar un ejercicio productivo que converja en una buena gestión del mantenimiento a través de un RCM. De acuerdo a Moubray³⁰, el proceso de RCM formula siete preguntas acerca del activo o sistema que intenta revisar:

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de ejecución asociados con el activo, en su actual contexto operacional?
2. ¿En qué forma falla el equipo, con respecto a la función que cumple en el contexto operacional?
3. ¿Qué causa la falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando falla?
5. ¿Qué ocurre si falla?
6. ¿Qué puede hacerse para evitar la falla?
7. ¿Qué puede hacerse si no se conoce una tarea para evitar la falla?

Las mejores respuestas estarán basadas en el conocimiento, ya sea tácito o explícito, que se tenga del equipo o sistema analizado. Ortiz destaca que seguir las preguntas por si solas no es el método. Deben realizarse varios pasos, tanto previos como durante y después del proceso, denominados pasos del proyecto³¹, para el caso de esta tesis se han identificado los siguientes:

³⁰ MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM II. Reino Unido: Aladon Ltd, 2004

³¹ ORTIZ, Daniel. Curso: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Bogotá D.C.: Ortiz Ruiz Consultores S.A.S, 2014.

a) Estudio previo del área: puntos 1 a 4.

1. Se identifica plenamente el área y a groso modo los procesos implicados para delimitar la data de análisis y relevancia en el desarrollo del RCM.
2. Recolección y análisis de datos
3. Taxonomía de la planta, selección de objetos para estudio e identificación de los niveles de procesos y subprocesos en la planta.
4. Definición de fronteras e interfaces, aplicando la la representación de las relaciones entre los diversos equipos, subsistemas y sistemas, presentando el flujo de producción entre las fronteras.

b) Talleres para responder las preguntas: puntos 5 a 12.

5. Definición de funciones
6. Análisis de fallas funcionales
7. Análisis de modos de falla
8. Análisis de efectos
9. Análisis de criticidad (RIESGO)
10. Selección de tareas de mantenimiento
11. Determinación de la frecuencia
12. Definir un plan preliminar

c) Aplicación de los resultados: paso 13 a 14.

13. MCC arranque en vivo de los resultados (CMMS)
14. Aplicación general (El proyecto con cubrimiento completo)

En el caso del presente proceso, los anteriores pasos generan diversos productos que sumados a la incorporación del software AWB para el almacenamiento, análisis y representación de datos y procesos, permiten la generación de una estrategia completa incorporando RCM, RAM, RBD y aplicando el análisis Weibull para lograr una mayor confianza técnica en la planeación. Algunos de los productos generados son:

1. Definiciones preliminares, estudio de modelos y software.
2. Análisis de procesos, construcción de la taxonomía de la PL.
3. Inventario maestro de equipos y sistemas
4. Recopilación de datos depurados y representativos de eventos en PL.
5. Listado de funciones
6. Listado de fallas funcionales
7. Listado de modos de falla
8. Descripción de efectos con todos sus datos
9. Listado de funciones, fallas y modos de fallas clasificados por criticidad
10. Listado de tareas
11. Asignación de frecuencia por tarea
12. Plan de mantenimiento inicial (agrupación por procedimientos si es necesario)
13. Datos cargados en el sistema de información y primer compromiso de ejecución
14. Plan de cubrimiento ajustado

2.2 MARCO CONCEPTUAL

Realizar una gestión de mantenimiento adecuada es posible bajo la adecuada implementación de los modelos mencionados (RAM, RCM, RBD) dentro de las estrategias y políticas de la empresa para cumplir con los objetivos estratégicos. Cabe mencionar que el proceso de desarrollo de la estrategia inicia entonces por la preparación del análisis RCM, y para ello se requiere de un conciente y estricto análisis de efectos y criticidad del modelo de fallas denominado FMECA: *Failure Model, Effects and Criticality Analysis*. Por ello se estudian en el área, diferentes aspectos bajo los conceptos presentados a continuación:

2.2.1 Funciones y Parámetros de Funcionamiento. Antes de poder aplicar un proceso hay que realizar dos cosas:

1. Determinar qué es lo que el usuario requiere que el activo haga.

2. Asegurar que es capaz de realizar aquello que su usuario quiere que realice.

Por tal razón, el primer paso para iniciar con un RCM es definir las funciones de cada activo en su contexto operacional, junto con los parámetros de funcionamiento deseados. Las funciones se pueden dividir en 2 grupos:

- **Funciones primarias:** es la razón por la cual se compra el activo. Las funciones cubren características técnicas como: velocidad, producción, capacidad de almacenaje, capacidad del producto y servicio al cliente.
- **Funciones Secundarias:** son las expectativas que el cliente quiere que el activo realice en el área de seguridad, control, confort, protección etc... Funciones adicionales que debe realizar los activos diferentes a sus funciones primarias.

2.2.2 Fallas Funcionales. Después de definir cuáles son las funciones primarias y secundarias del activo se debe identificar las fallas funcionales, buscando los hechos posibles que pudo causar cada estado de las fallas y responder la pregunta cuál es la causa de cada falla funcional.

2.2.2.1 Tipos de fallas. De acuerdo a la pérdida de capacidad de trabajo, se pueden clasificar en:

- Pérdida total de la capacidad, esto es, definitivamente el equipo deja de funcionar y se detiene por completo: “no hace”.
- Pérdida parcial de la capacidad, esto es, aunque sigue funcionando el desempeño no alcanza a cumplir con lo esperado por el usuario: “Hace más o hace menos”.
- Funcionamiento erróneo, esto es, el equipo realiza otra actividad que no se tenía previsto realizar o no se deseaba que la hiciera en ese momento: “hace otra cosa”.

De acuerdo a los momentos en que se presentan esas fallas, su clasificación es:

- La falla se presenta durante la operación continua del equipo

- La falla se presenta cuando el equipo debe operar en algún momento determinado
- La falla se presenta al momento de requerirse la detención del equipo
- La falla se presenta por la operación del equipo cuando no lo debiera hacer

Las reglas creadas para la definición y redacción de las fallas funcionales son:

- Describir qué se pierde de la función y no el porqué
- Incluir las fallas que sean razonablemente probables AL NO DAR EL MANTENIMIENTO o las que se han estado evitando con el mantenimiento preventivo actual.
- La descripción no debe contener un componente o una pieza.
- La descripción es relativamente corta, por lo general menor a 10 palabras.
- La descripción debe basarse en lo definido en la función.

2.2.3 Modos de fallas. Es la descripción sintetizada del como falla un equipo y su causa. Las reglas para redactar el modo de falla son las siguientes:

- La descripción del modo de falla debe tener como mínimo un sustantivo y un verbo más una descripción del mecanismo de falla, ejemplo:
 - Motor quemado por sobre voltaje
 - Tubería obstruida con sedimentos
 - Recipiente roto por sobrepresión.
- Evite usar los verbos: Falla, Daño, Mal funcionamiento. Use uno que indique la causa precisa.
- La descripción del modo de falla debe tener un nivel de detalle que facilite la selección de tareas de mantenimiento adecuadas. Este depende de la importancia operacional.
- Si la descripción contiene el nombre del elemento o parte donde se presenta el evento redundará posteriormente a favor de la estructuración de la tarea.

Otras consideraciones a tener en cuenta en la redacción de los modos de falla son las siguientes:

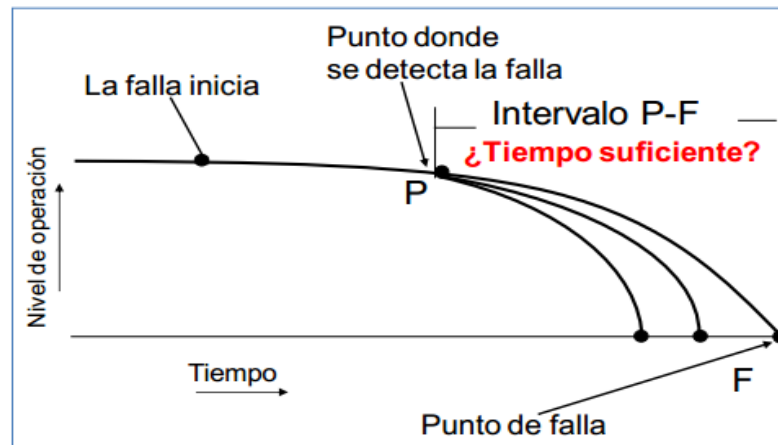
- Que se haya producido antes en el equipo o en otros equipos de iguales características en el mismo o similar contexto.
- Que ya sean objetivo de tareas de mantenimiento
- Que se consideren razonablemente probables. Generalmente describe por qué la falla ha ocurrido.
- Razonablemente probable para generarse al no realizar el mantenimiento.
- Un técnico de mantenimiento debe ser capaz de distinguirlo.

2.2.4 Consecuencia de las Fallas. La metodología RCM clasifica las consecuencias de las fallas en 4 categorías:

- **Consecuencias de fallas ocultas:** las fallas ocultas no tienen un impacto directo, pero exponen a la organización a fallas múltiples con consecuencias serias y catastróficas (La mayoría están asociadas a sistemas de protección de seguridad inherente).
- **Consecuencias ambientales y para la seguridad:** se considera que tiene impacto de seguridad si causa daño o la muerte a una persona y consecuencias ambientales si se deja de cumplir con una norma.
- **Consecuencias operacionales:** si afecta la producción se considera de esta categoría (calidad del producto transportado o producido, cantidad, atención al cliente y costos operacionales).
- **Consecuencias No operacionales:** son las fallas que impactan en el costo directo de la reparación.

2.2.4.1 Tareas, Frecuencias y Recursos. El conocimiento del modo de falla debe llevar a establecer la curva P-F (ver figura 2), con la cual se determinan los períodos cortos de tiempo menores al intervalo P-F.

Figura 2. Curva P-F



Fuente: ORTIZ, Daniel. Curso: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. 2014

Basándose en lo publicado por Ortiz³², su construcción se puede hacer con base en:

- a) La observación continua
- b) La definición de intervalos cortos para conocer el equipo extendiéndolos poco a poco
- c) La definición de intervalos arbitrarios (aunque no es el más recomendado).
- d) La investigación propia o con entidades especializadas
- e) La consulta a expertos en el tema.

2.2.4.2 Determinación de frecuencia para preventivos. Para definir los intervalos entre cada tarea preventiva se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- a) La experiencia propia que se tenga sobre los equipos bajo sus condiciones ambientales y operativas.
- b) Recomendaciones de los fabricantes.
- c) La investigación con pruebas de campo.

³² ORTIZ, Op, cit.

- d) La investigación con apoyo de entidades especializadas cuando se trata de la implementación de nuevas tecnologías, con las cuales, se pretende aumentar los intervalos ya establecidos.

Es necesario contar con un muy buen registro de cada intervención de los activos, donde se registre el tiempo en el que los equipos son traídos a mantenimiento o requieren intervención del personal mantenedor. Similar a la definición de las frecuencias para el monitoreo, para las tareas que deben desarrollar los operadores las frecuencias deberán estar basadas en:

- a) La observación continua y los registros de fallas que se tengan
- b) La definición de intervalos cortos para conocer el equipo, en caso de que sean nuevos o se desconozca su comportamiento
- c) La definición de intervalos arbitrarios
- d) La investigación con entidades especializadas
- e) La consulta a expertos en el tema.

2.2.5 Análisis de Weibull. Este análisis consiste en una técnica diseñada para estimar la probabilidad de fiabilidad de un proceso, siendo ampliamente usada en el análisis de fallas de los equipos de industrias que fabrican o procesan materiales. Destacan Salazar et al³³, que la versatilidad de dicha función se enmarca en su habilidad para adaptar diversas formas dependiendo de los valores que toman sus parámetros. Las implicaciones en múltiples ciencias, se halla en la diversidad de trabajos a los que puede aplicar, como es el caso del análisis de falla en rodamientos.

La función de Weibull posee 3 parámetros, lo cual la hace compleja de manejar por solución de ecuaciones diferenciales, pero gráficamente es más práctico y hoy día,

³³ SALAZAR M., Raquel; ROJANO A., Abraham; FIGUEROA H., Esther y PÉREZ S., Francisco. Aplicaciones de la Distribución Weibull en Ingeniería de Confiabilidad. Colmeme UAN, 2013.

el avance de la tecnología ha ayudado a la extensión de esta función a diversos procesos y sectores como el campo agrícola. Autores como Abenethy *et al*³⁴, destacan que el análisis de fallas con la metodología Weibull incluye:

- Representación gráfica de los datos
- Interpretación de la gráfica
- Predicción de futuras fallas
- Evaluación de varios planes para acciones correctivas
- Substanciar los cambios de ingeniería que corrijan los modos de fallas.

Existen además, ciertas deficiencias en la aplicación del modelo, por lo cual, hay aspectos a tener en cuenta como³⁵:

- Datos censurados
- Mezclas de modos de fallo
- Origen de tiempo distinto de cero (en el lanzamiento de la acción)
- Sin fallos
- Muestras extremadamente pequeñas
- Fortalezas y debilidades propias del método.

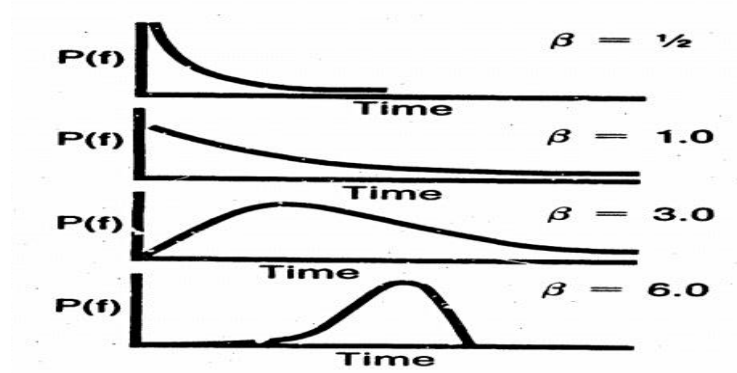
El objetivo del análisis Weibull para el presente proyecto, es poder hallar unas curvas de comportamiento típicas que permitan junto al análisis RCM predecir los tiempos y modos de fallas. La gráfica describiría los eventos presentados y se haría para cada equipo o modo de falla. Sin embargo, el método destaca por su forma de solución gráfica simple, en la escala horizontal se tendría el tiempo sea del ciclo, de funcionamiento o de vida de uso de un material o máquina. Cabe mencionar que la pendiente de la línea es significativa para la comprensión de la física de la falla evaluada³⁶.

³⁴ ABENETHY, R. B.; BRENNEMAN, J. E.; MEDLIN, C. H.; REINMAN, G. L. *Weibull Analysis Handbook*. Florida, EE.UU.: Pratt & Whitney Aircraft, 1983.

³⁵ *Ibíd*, p2.

³⁶ *Ibíd*, p4.

Figura 3. Evaluación de falla mediante Weibull. Cambios en parámetro beta.



Fuente: ABENETHY; BRENNEMAN; MEDLIN y REINMAN. *Weibull Analysis Handbook*

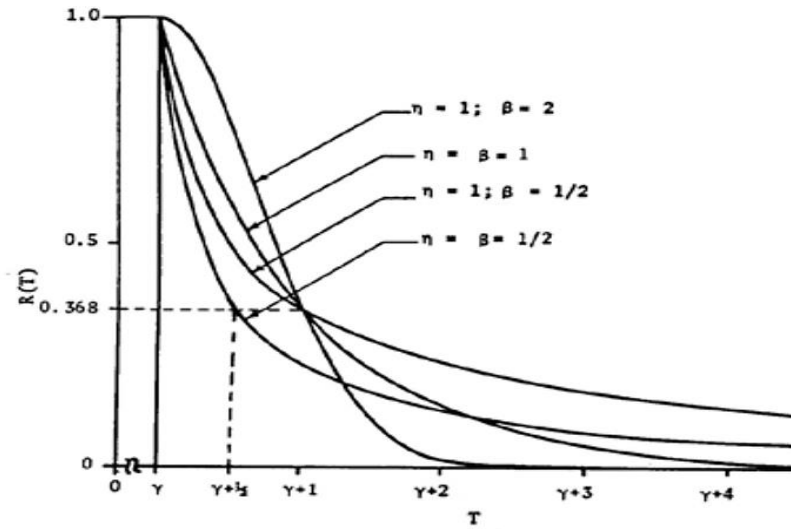
En la figura 3 se halla la comparativa en distintos valores de la pendiente beta. En la escala vertical se halla la probabilidad de ocurrencia de un evento.

2.2.5.1 Función de confiabilidad Weibull. La función de confiabilidad de Weibull se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T-\gamma}{\eta}\right)^\beta} Ec(\gamma)$$

Variando parámetros de pendiente forma (pendiente β) y parámetro de escala (η), manteniendo el valor del parámetro de umbral o localización (γ) en el eje horizontal, se tiene la figura 4.

Figura 4. Función de confiabilidad Weibull variando parámetros.



Fuente: SALAZAR *et al.* Aplicaciones de la Distribución Weibull en Ingeniería de Confiabilidad. 2013

De acuerdo a Salazar *et al*, la función inicia en 1 porque se supone que, al iniciar el funcionamiento de todos los equipos, estos se hallan en perfectas condiciones, pero pasado el tiempo, la confiabilidad disminuye asintóticamente. Este autor destaca que:

- Para $\beta=1$ la curva decrece monótonamente más rápido que entre 0 y 1.

Para una misión que inicia en γ más η en cero, su función es 0,368. O sea que, toda misión con duración $\eta + \gamma$ solo el 36,8% de los equipos sobrevivirán.

- La función de confiabilidad condicional para una nueva misión de duración t , después de la anterior de duración T horas de operación, es³⁷:

$$R(T, t) = e^{\left[\left(\frac{T+t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta} - \left(\frac{T-\gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right]} \quad Ec(8)$$

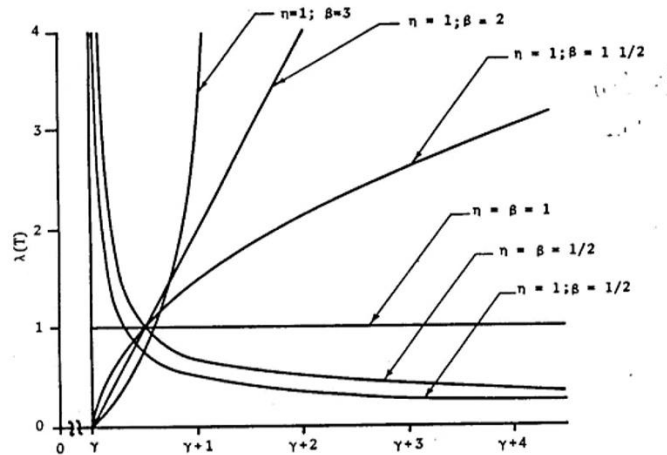
³⁷ KECECIOGLU, 1991. Citado en: SALAZAR *et al.* Op, cit.

2.2.5.2 Función de tasa de falla Weibull. La función de la tasa de falla se expresa con la siguiente ecuación:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T + t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} = \frac{f(T)}{R(T)} \quad Ec(9)$$

Esta función se representa en la curva para diferentes valores de parámetros mostrada por Salazar *et al*, figura 5:

Figura 5. Curva de tasa de falla. Variación de parámetro β y con γ en eje horizontal.

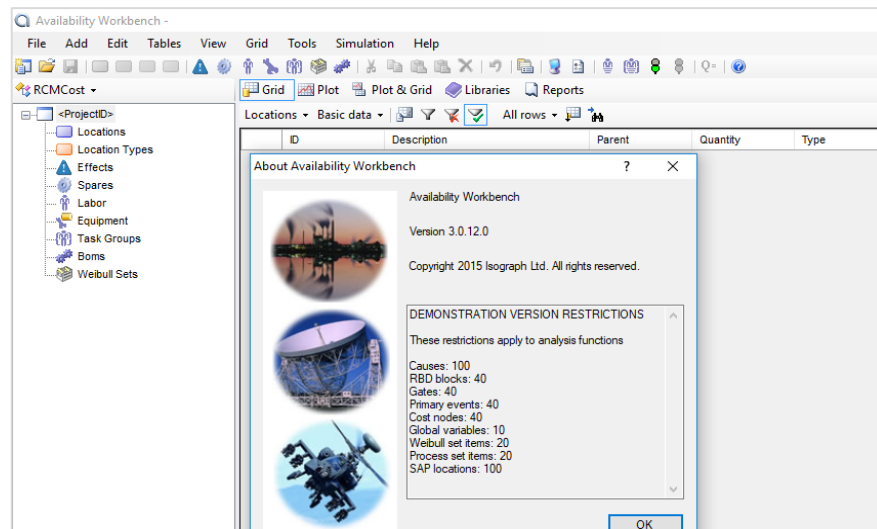


Fuente: SALAZAR *et al*. Aplicaciones de la Distribución Weibull en Ingeniería de Confiabilidad. 2013

Para $\beta=1$ la función representa la tasa constante de la vida útil, para valores mayores, el valor gamma crecerá con el valor T. para un valor de β entre 1 y 2, la tasa de falla crece en una tasa decreciente por ello su forma es más cóncava. En el caso $\beta=2$ se obtiene la distribución de Raleigh y en el caso entre 2,6 y 5,3 se aproxima a la tasa de falla normal si $\eta=1$ y $\gamma=0$, que se usa para modelar las fallas debido a la obsolescencia.

2.2.6 Software a implementar. ISOGRAPH AVAILABILITY WORKBENCH (AWB). También conocido como Availability Workbench o AWB, constituye para este proyecto la herramienta de integración de todos los análisis hechos a los sistemas, componentes y datos del proyecto. AWB posee un ambiente de trabajo robusto que apoya el desarrollo y la continuidad de un programa de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), facilitando predicciones de disponibilidad del sistema y sus componentes incluso a niveles complejos de repuestos y costos, así como las posibles tareas de mantenimiento en cada nivel que permitan optimizar la operación del sistema.

Figura 6. Versión del software AWB implementado.



Fuente: Isograph Availability Workbench.

Por este motivo se ha seleccionado para ser la herramienta idónea para la presente tesis, además de la facilidad para interconectarse con bases de datos externos, incorporar, exportar o mantener un enlace dinámico. Para este proyecto se trabaja la versión de prueba de la versión 3.0.12 como se puede ver en la figura 6.

El software AWB cuenta con un motor de simulación que utiliza métodos de simulación Monte Carlo para la estimación de los parámetros de los sistemas y

subsistemas como la confiabilidad, disponibilidad, fallas críticas, costos, entre otros. La ejecución de este motor reproduce el rendimiento del sistema en la vida real de acuerdo a la información cargada por el usuario, donde gracias a diagramas lógicos como el diagrama de árbol o el de bloques emulan las conexiones entre diferentes subsistemas o sistemas y evalúan las expresiones de no disponibilidad sin asumir independencias de componentes o tasas constantes que podrían llevar a errores, por que hay factores que de una u otra forma afectan las tasas de falla o reparación como lo es la edad del equipo³⁸.

Cabe mencionar que AWB está conformada por 4 módulos que se explican brevemente a continuación:

2.2.6.1 RCMCost: Este es el encargado de la administración de los datos e información de análisis para desarrollar y conservar un Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). Como ya se ha explicado, el RCM busca establecer una estrategia de mantenimiento implementando métodos como el Análisis de Modos de Fallas, Efectos y Criticidad (FMECA) que permite lograr los objetivos del proyecto alineados con los de la compañía: minimizar costos cumpliendo con las metas operacionales al conocer la confiabilidad del sistema y aplicar tareas de mantenimiento adecuadas³⁹.

El propósito del módulo es dar la estructura base del modelo RCM que se desee construir para el sistema de la empresa. Brinda entonces un espacio para almacenar datos, analizar alternativas de mantenimiento, permite la simulación de eventos y predecir incluso costos asociados a estos que pueden ir desde repuestos,

³⁸ ISOGRAPH LIMITED. Guía del Usuario: Availability Workbench 2007, Simulación del Sistema Integrado de Mantenimiento Enfocado en la Confiabilidad según el Análisis Weibull del Costo del Ciclo de Vida. 2007, p.9. Versión en español, traducido por: GSAPGROUP- [Revisado el 25 de noviembre de 2018].

³⁹ AREMAS. Presentación sobre el RCMCost, AvSim y Weibull e integración con SAP. 2011, p. 5. [Revisado el 25 de noviembre de 2018].

dotaciones hasta desempeño operacional. Otra ventaja del módulo, es su capacidad de identificar los modos de fallas críticos usando el FMECA, y compara los beneficios de los mantenimientos que se le hayan ingresado y relacionado con cada modo de falla. En otras palabras, es un soporte que aporta incluso herramientas gráficas para que el usuario defina y soporte las políticas y estrategias de mantenimiento para la toma de decisiones sobre los posibles eventos que se presenten durante el funcionamiento de los sistemas. Se cumple con estándares SAE JA1011, MSG-3 y MIL-STD-2173(AS) tanto en procesos internos como en reportes generados en RCM. El sistema tiene soporte y es actualizable y además se puede ajustar el modelo y los datos RCM al estado de la planta en cualquier momento⁴⁰.

2.2.6.2 AvSim. Facilita el análisis de disponibilidad y confiabilidad de sistemas simples y complejos, lo cual, ayuda al control eficiente de existencias de repuestos, así como desarrollo de políticas de mantenimiento.

Este modulo permite al usuario realizar simulaciones de desempeño de los sistemas en su totalidad. Básicamente analiza la jerarquía que se ha introducido en cada sistema con respecto a sus componentes y entre ellos. Esto facilita el analisis visual y analítico del funcionamiento de la planta, previendo ante posibles cambios de diseño u operaciones como cambiaría la respuesta del sistema. Este ambiente aporta un soporte fundamental para preveer posibles cambios y ver respuestas en repuestos, operaciones o disponibilidad de los equipos.

Para lograrlo, relaciona las fallas de cada componente con las de los demás para evaluar riesgos de interrupciones y eventos que afecten la capacidad operacional de la planta. Este modulo requiere de diversa información que debe suministrar el usuario como: diagrama de árbol de fallas o RBD que aporte las combinaciones de

⁴⁰ ISOGRAPH LIMITED. *Op. Cit.*, p. 11.

los sucesos, información de componentes o equipos, evaluación de riesgos, repuestos, históricos de falla, incluso se pueden incorporar tareas de mantenimiento, eventos de talento humano y hasta ecuaciones de pérdidas⁴¹. En conjunto con el modulo de Weibull, este modelo incluye el analisis de la data histórica, los modelos de falla y las curvas de probabilidad de falla, en la generación de una simulación total de la disponibilidad del sistema durante la vida útil del mismo.

2.2.6.3 Costo del Ciclo de Vida Útil. Este modulo no se contempla dentro de los alcances del presente trabajo, pero consiste en crear una estructura de nodos de costos, dando origen a una red de costos que abarquen las distintas operaciones de mantenimiento. Por ello, le permite al usuario crear una estructura jerarquica de costos que pueden vincularse a otros modulos como RCMCost o AvSim, incluso con ecuaciones dependientes del tiempo, de fases o de niveles de costos internos (nodos hijos) para un costo de alto nivel. Es un modulo complejo con soporte para la creación de relaciones de costo de diferente nivel para diferentes variables⁴².

Weibull: En este modulo se hace el analisis de la data histórica que permite la estimación de las frecuencias esperadas de cada uno de los modos o causas de fallas identificadas en los analisis preliminares, cabe destacar que la data es previamente seleccionada y filtrada para tomar solo los datos relevantes y que aporten a la determinación exitosa de las frecuencias esperadas⁴³.

Implementa Sets Weibull que son un conjunto de tiempos de falla con una asignada distribución de probabilidad sea por el usuario o calculada de la data histórica. Estos pueden ser relacionados con diagrama de jerarquías del RCMCost o con modelos de falla en el AvSim. El principal aporte del modulo es emular con mayor precisión

⁴¹ *Ibídem*, p. 13.

⁴² *Ibídem*, p. 15.

⁴³ Aremas. *Op. Cit.*, p. 17.

en predicción los efectos de las fallas en los sistemas. Los set de falla representan la edad del equipo al momento de la falla y los set de reparaciones presentan los tiempos que se tarda en reparar un equipo. Estos set permiten entonces asignar los datos históricos para construir una distribución que se ajuste a los mismos de entre diversas posibilidades que soporta el modulo (distribución exponencial, Weibull de 1 parámetro, de 2 parámetros, Bi-Weibull, Tri-Weibull, Weibayes, etc.), estas distribuciones pueden ser usadas por los demás modulos para lograr simulaciones reales de las operaciones de la planta⁴⁴.

2.3 MARCO LEGAL

2.3.1 Norma ISO 14224⁴⁵. Es la norma internacional que brinda los lineamientos para la especificación, recolección y aseguramiento de calidad de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. Los principales objetivos de esta norma son:

a) Especificar los datos que serán recolectados para el análisis de:

- Diseño y configuración del Sistema.
- Seguridad, Confiabilidad y Disponibilidad de los Sistemas y Plantas.
- Costo del Ciclo de Vida.
- Planeamiento, optimización y ejecución del Mantenimiento.

b) Especificar datos en un formato normalizado, a fin de:

- Permitir el intercambio de datos entre Plantas.
- Asegurar que los datos sean de calidad suficiente, para el análisis que se pretende realizar.

⁴⁴ Isograph Limited. *Op. Cit.*, p. 16.

⁴⁵ BS EN ISO 14224:2016. Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural – recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos. Estándar Europeo. BSI *Standards Limited*, octubre de 2016. ISBN 978 0 580 90387 8.

2.3.2 Norma SAE JA1011. Expone los Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. RCM es que un proceso específico que identifica las políticas que deben llevarse a cabo para manejar los modos de fallo que podrían causar el fallo funcional de cualquier recurso físico, en un contexto dado en el que opera. Se piensa que este documento es usado para evaluar cualquier proceso que pretende ser un proceso de RCM; ayuda a determinar si es un verdadero proceso de RCM. Este documento apoya a la Norma ISO 14224 de 2006, como una evaluación que especifica el criterio mínimo que un proceso debe tener para ser un proceso de RCM⁴⁶.

Según la norma SAE JA 1011⁴⁷ las 7 preguntas básicas del proceso RCM son:

1. ¿Las funciones y las normas deseadas asociadas de actuación del recurso en su contexto que opera presente (las funciones)?
2. ¿De qué maneras puede fallar para cumplir sus funciones (las fallas funcionales)?
3. ¿Lo que causa cada falla funcional (los modos de falla)?
4. ¿Lo que pasa cuándo cada falla ocurre (los efectos de falla)?
5. ¿De qué manera cada falla está (las consecuencias de falla)?
6. ¿Lo que debe hacerse predecir o prevenir cada fallo (las tareas del proactivo e intervalos de la tarea)?
7. ¿Lo que debe hacerse si una tarea del proactivo conveniente no puede encontrarse (las acciones predefinidas

2.3.3 Norma SAE JA1012⁴⁸. Expone con mayor profundidad las definiciones de la SAE JA1011, siendo una guía básica para aquellos que no poseen un alto grado de familiaridad con los conceptos y terminologías, así como para denotar diferencias conceptuales necesarias en la aplicación de los RCM.

⁴⁶ MORA GUTIERREZ, Luis A. Norma SAE JA1011. Medellín: Coldi imitada, 2003.

⁴⁷ NORMA SAE: JA1011. *Op. Cit*, p. 6.

⁴⁸ NORMA SAE: JA1012. *Op. Cit*, p. 1-62.

3. ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO DE LA PLANTA

Toda la información anterior nos permite comprender las bases de un análisis estratégico en la gestión de mantenimiento. Para El Cerrejón, específicamente para el área de la Planta de Lavado, se han identificado para la gestión del mantenimiento, oportunidades de mejora que puedan representar un incremento de la eficiencia y productividad de los procesos. Estas se pueden resumir como:

- Necesidad de una depuración de la base de datos de eventos presentados en los equipos para mejorar la toma de decisiones de mantenibilidad.
- Descripción o información incompleta en la data, poco clara o que requiere el cruce de varias bases de datos para poder determinar los modos de falla, en este caso bases de datos de OTS y de DOWNS en el área.
- No hay una correcta discriminación de fallas que permitan identificar modos de falla
- Se realiza tareas de mantenimiento definidas de acuerdo a proveedor de equipo o a experiencia, sin contemplar las condiciones propias de la operación y con desconocimiento del modo de falla que se pueda mitigar.
- Se necesita una revisión de la jerarquización actual que relacione el conocimiento adquirido y permita organizar para cada componente o sistema
- No se tienen establecidas matrices de criticidad por evento o modo de falla para cada tipo de tarea en los equipos del área.

Todas estas oportunidades se pueden afrontar al incorporar los modelos propuestos en el proyecto, así como las recomendaciones a nivel de manejo de la información, y estandarización. A continuación, se presenta el desarrollo metodológico de los análisis requeridos previamente a la construcción del modelo RCM-RAM-RBD óptimo para el caso de estudio, en ellos se mencionan las recomendaciones que se

escapan al alcance del libro pero que son muy importantes para dar continuidad y retroalimentación efectiva al modelo de gestión de mantenibilidad propuesto.

3.1 ANÁLISIS GENERAL DE LOS PROCESOS DE LA PLANTA

El modelo que se propone para el mantenimiento implica la ampliación del conocimiento actual sobre la planta, y de los controles actuales en la misma, incorporando a las estrategias que se usan en el momento un estándar para clasificar eventos y comportamientos de los componentes y de los MF que se presenten usando como guía los estándares correspondientes.

La idea es aplicar un modelo que se base en el contexto propio del área de proceso, sus características particulares y las exigencias operativas propias, lo cual direccionará el mantenimiento a realizar tareas con conocimiento de qué falla se quiere mitigar, aplicando así no solo recomendaciones generalizadas de un fabricante o experiencias subjetivas. El modelo propuesto es la integración de tres modelos interrelacionados y retroalimentados entre sí, el RCM, el RAM y el RBD.

Para iniciar los modelos se realiza un acercamiento a las características del área mediante el estudio taxonómico y de fronteras de los sistemas, como se presenta a continuación.

3.1.1 Fronteras de los Sistemas. En el Anexo A, se observa el plano general de los equipos en la empresa, cabe anotar que en este plano no queda registrado el equipo de entrada, como ya se mencionó pero que pertenece al primer sistema de alimentación. El análisis de fronteras permite identificar los circuitos mostrados diagramáticamente en el Anexo B. Identificación de Fronteras Planta de Lavado, los cuales se describen a continuación:

- Circuito De Alimentación CAL- Ruta Amarilla: Comprende al equipo Feeder-Breaker FB01 no mostrado en el plano del Anexo A, pero sí en la figura 1. Este circuito comprende los equipos requeridos para la entrada de material al sistema.
- Circuito De Material Grueso CMG - Ruta Roja: Uno de los dos circuitos más amplios del área, procesa el material que se separa con un tamaño de partícula mayor a 1.4 mm; genera dos salidas: salida de producto de calidad hacia el circuito SPR, o salida de material rechazado hacia el circuito SRG.
- Circuito De Material Fino CMF - Ruta Azul Oscuro: Es el circuito más amplio con 13 componentes en el área, procesa el material que se separa con un tamaño de partícula menor a 1.4 mm; genera dos salidas: salida de producto de calidad hacia el circuito SPR, o salida de material rechazado hacia el circuito SRF.
- Salida de Producto SPR - Ruta Morada: Recoge a través de bandas transportadoras el material de alta calidad obtenido del proceso para llevarlo a un adecuado almacenamiento.
- Salida de Rechazo Grueso SRG -Ruta Azul Celeste: Este circuito recoge el material desechado durante el lavado del material grueso, por lo general el material de rechazo corresponde a piedras y material estéril que se transporta y almacena en un silo de rechazo (BN029), donde luego es recolectado en un camión de 320T para llevarlo a disposición final en terrenos destinados para este propósito.
- Circuito de Tratamiento de Rechazo Fino CTRF - Ruta Café: Este circuito toma el material fino que no puede continuar en el proceso y lo trata con floculantes y dosificaciones que permitan que alcance el material unas condiciones adecuadas para su disposición en el embalse Cantorillo.
- Circuito de Recuperación & Adición de Magnetita CR&A- Ruta Verde: En este circuito se crea y recupera el medio denso empleado para la separación del material de calidad. Se añade la magnetita para lograr, mediante las diferencias de densidades, la separación de diferentes materiales y del carbón, y luego usando separadores magnéticos se recupera la magnetita del medio.

- Suministro de Agua SA - Ruta Rosada: Se encarga de captar y tratar agua cruda de un reservorio determinado para suministrarla al sistema de CMF y CMG, para que desarrollen un adecuado lavado.

Posteriormente, se empieza el estudio detallado de cada circuito con sus componentes para estandarizar los datos y modos de falla, así como la asignación de codificación creando un archivo matriz denominado “RCM_PLAVADO_ESTANDAR”, el cual contendrá la información para la construcción del modelo RCM y que se desarrolla en el presente capítulo.

3.1.2 Taxonomía y Nomenclatura de los Sistemas y Equipos. Una vez creado identificadas las fronteras y creado el archivo base se procede a la codificación. Cabe anotar que dentro de la compañía los niveles completos contendrían el siguiente esquema:

Nivel 1: Industria – Carbón.

Nivel 2: Categoría de negocio – Explotación y Exportación.

Nivel 3: Categoría de instalación – Manejo de Carbón, Código: MDC.

Nivel 4: Planta – Planta de Lavado, Código: PL.

Nivel 5: Sistemas – 8 circuitos en total.

Nivel 6: Equipos o componentes- 50 Equipos implementados actualmente.

Dado que el proyecto se centra en el nivel 4, PL, la taxonomía y el árbol jerárquico se construyen a partir de este. Cada uno de estos sistemas o circuitos analizados es ingresado de forma organizada, para observar los componentes que le competen a cada uno y realizar los análisis y asignaciones que se requieran como funciones, modos de fallas, códigos estandarizados, etc. La cantidad y nombre de los diferentes componentes se pueden observar en la tabla 2, que se consigna al archivo “RCM_PLAVADO_ESTANDAR”.

Tabla 2. Componentes por Circuito para PL

Circuito		ID	EQUIPO O COMPONENTE
CAL	1	BN01	TOLVA DE RECIBO BN-01
CAL	2	FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01
CAL	3	CV01	BANDA DE RECIBO CV-01
CAL	4	CR01	TRITURADORA ABON PRIMARIA
CAL	5	CR02	TRITURADORA ABON SECUNDARIA
CAL	6	SC01	TAMIZ DE DESENLODE SC-01
CMG	1	SM01	WING TANK SM-01
CMG	2	PP01	BOMBA ALIMENTACION CICLONES DEL MEDIO DENSO PP-01
CMG	3	CY01	CICLON DE DENSIDAD MEDIA #1 CY-01
CMG	4	CY02	CICLON DE DENSIDAD MEDIA #2 CY-02
CMG	5	SM02	SUMIDERO #2
CMG	6	PP02	BOMBA DEL MEDIO CORRECTO PP-02
CMG	7	SC02	TAMIZ DE PRODUCTO SCREEN-02
CMG	8	SC03	TAMIZ DE RECHAZO SCREEN-03
CMG	9	CF01	CENTRIFUGA DE GRUESO CF-01
CMG	10	BX04	CAJA DISTRIBUIDORA BX-04
CMG	11	SM06	SUMIDERO #6
CMG	12	PP06	BOMBA AFLUENTE DE LA CENTRIFUGA PP-06
CMF	1	SM04	SUMIDERO #4 PLANTA DE LAVADO
CMF	2	PP04	BOMBA ALIMENTACION CICLONES DE DESENLODE PP-04
CMF	3	CY03	CICLON DE DESENLODE #1 CY-03
CMF	4	CY04	CICLON DE DESENLODE #2 CY-04
CMF	5	CY05	CICLON DE DESENLODE #3 CY-05
CMF	6	CY06	CICLON DE DESENLODE #4 CY-06
CMF	7	SP01/02	CONJUNTO DE ESPIRALES
CMF	8	SM05	SUMIDERO #5 PLANTA DE LAVADO
CMF	9	PP05	BOMBA PRODUCTO DE LA ESPIRAL PP-05
CMF	10	CY07	CICLON DE ESPESAMIENTO #1 CY-07
CMF	11	CY08	CICLON DE ESPESAMIENTO #2 CY-08
CMF	12	CF02	CENTRIFUGA DE FINOS
CMF	13	SC04	TAMIZ DE DESHIDRATAMIENTO SC-04
SPR	1	CV02	BANDA CV-02
SPR	2	CV03	BANDA CV-03

Circuito		ID	EQUIPO O COMPONENTE
SRG	1	CV04	BANDA CV-04
SRG	2	CV05	BANDA CV-05
SRG	3	BN02	TOLVA DE RECHAZO BN-02
CTRF	1	TH01	TANQUE ESPESADOR TH-01
CTRF	2	FL01/02	TANQUE FLOCCULANTE ANIONICO FL-01/CATIONICO FL-02
CTRF	3	PP07A	BOMBA DE TANQUE ESPESADOR PP-07A
CTRF	4	PP07B	BOMBA DE TANQUE ESPESADOR PP-07B
CTRF	5	LM01	UNIDAD DOSIFICADORA DE CAL LM-01
CR&A	1	PP11	BOMBA DE ADICION DE MAGNETITA PP-11
CR&A	2	PP10	BOMBA SUMIDERO DE DENSIDAD MEDIA AREA DEL PISO PP-10
CR&A	3	SM03	SUMIDERO #3
CR&A	4	PP03	BOMBA DEL MEDIO DILUIDO PP-03
CR&A	5	MS01	SEPARADOR MAGNETICO PRIMARIO MS-01
CR&A	6	MS02	SEPARADOR MAGNETICO PRIMARIO MS-02
CR&A	7	MS03	SEPARADOR MAGNETICO SECUNDARIO MS-03
SA	1	PP08	BOMBA DEL TANQUE DEL AGUA CLARA PP-08
SA	2	SM07	SUMIDERO #7

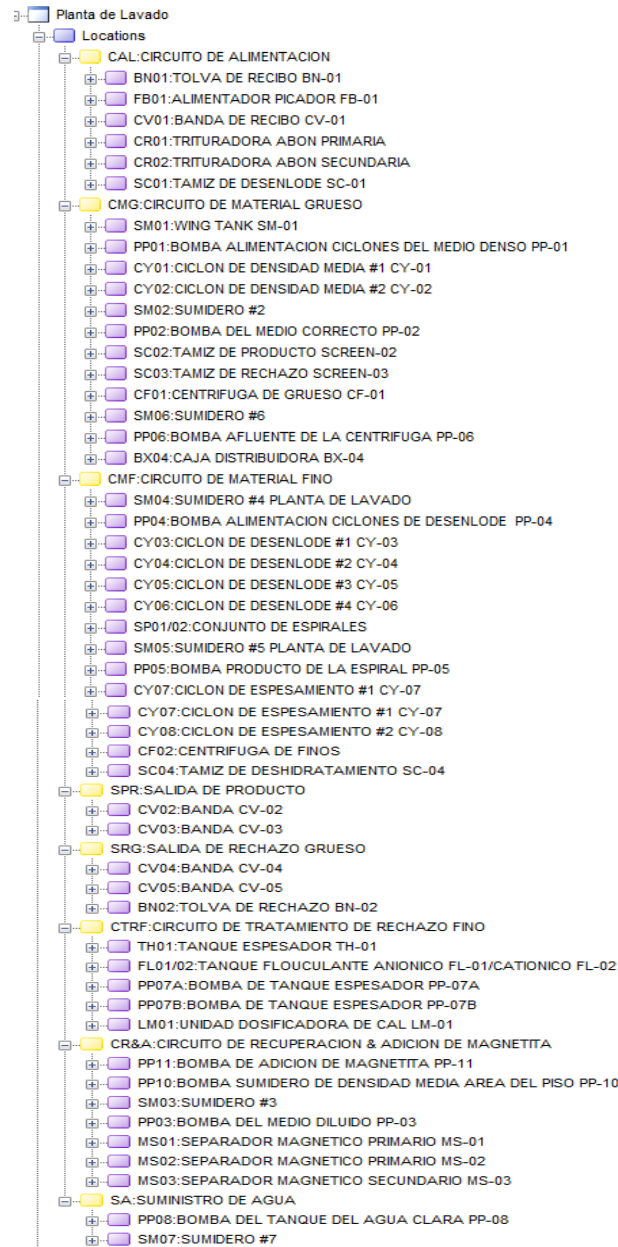
Fuente: Datos tomados del análisis de fronteras del Anexo B.

Pese a la diferencia en el número de componentes, cada circuito cumple una tarea esencial para la producción de carbón de calidad, y dentro del análisis de sus componentes se han incorporado los equipos principales que están siendo usados actualmente y para futuro. Esta información es base para el análisis FMEA que se desarrolla como principio de construcción del módulo RCMcost en el software AWB; el árbol jerárquico generado es igualmente ingresado para cada módulo (Véase Figura 7. Árbol Jerárquico del área PL). El análisis jerárquico muestra los 8 circuitos o sistemas y los 50 componentes analizados distribuidos en cada uno de ellos.

3.2 ANÁLISIS FMEA

Posterior al conocimiento del área y sus niveles, se requiere para el modelo análisis que comprenden desde la identificación de funciones hasta la evaluación de efectos y consecuencias. En este proyecto se desarrolla un RCM con soporte cuantitativo en el análisis Weibull que analizará los datos depurados que se ingresen de acuerdo al modelo estadístico Weibull o Weibayes según el caso, por tanto, se espera generar dentro del modelado y la simulación una evaluación FMECA (Análisis de Efectos y Criticidad para los Modos de Falla); no obstante, como el análisis de criticidad se da durante la simulación de acuerdo a las probabilidades de falla halladas solo se desarrolla de forma manual el análisis FMEA, el registro de los datos depurados en el módulo Weibull, y finalmente, la conexión de los sets de Weibull contruidos para cada MF con las tareas de mantenimiento registradas en el modelo RCM.

Figura 7. Árbol jerárquico para el área de PL.

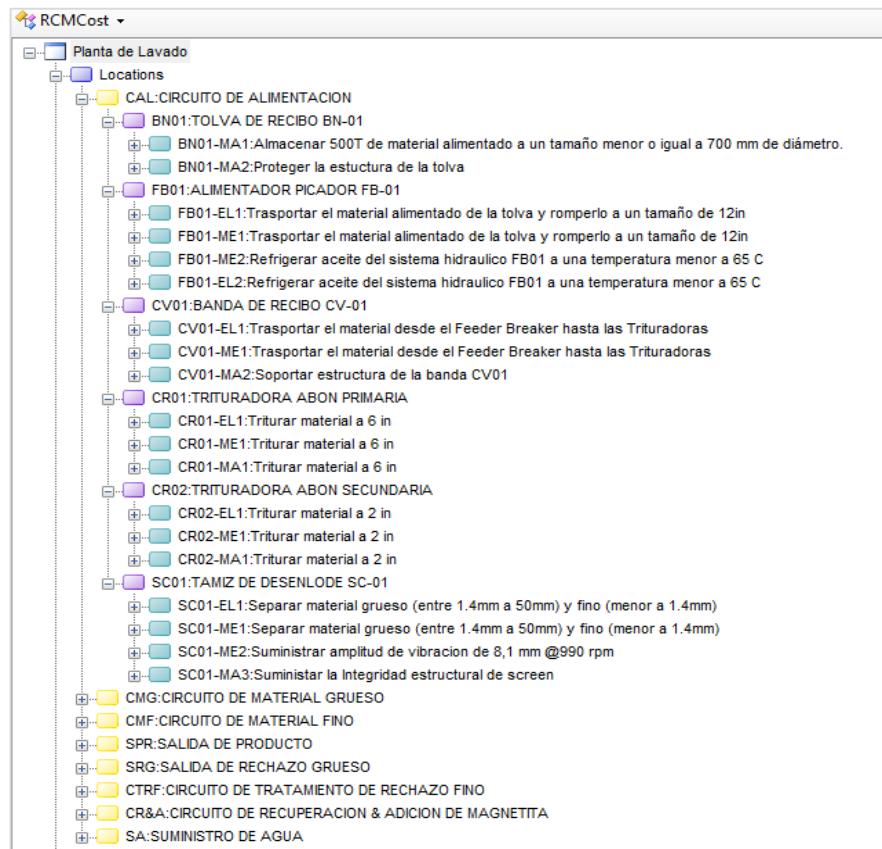


A continuación, se presenta el desarrollo del análisis FMEA base para el modelo RCM.

3.2.1 Asignación de Funciones por Componentes. Posterior a la construcción taxonómica, se desarrolla el estudio funcional y se asigna a la base de datos en

Excel, para luego cargar al software la función operacional de cada equipo. Esta función se conoce en base a la actividad desarrollada por el equipo y el manual de operación del mismo. Un ejemplo de la asignación de funciones se presenta en la Figura 8. Asignación de funciones en AWB, módulo RCMcost; donde se presentan las determinadas para cada componente del primer circuito. Cabe aclarar, que este árbol se ingresa fidedignamente en el módulo Weibull, pero es automáticamente captado por el módulo AvSim.

Figura 8. Asignación de funciones en AWB, módulo RCMcost.



Como se puede ver en la Figura 8, cada componente o equipo del sistema CAL posee su propia función, la cual es asignada en el cuadro de tono azul claro y es anidada como el nivel siguiente del análisis jerárquico. Este proceso de asignación de funciones se repitió para cada sistema y equipo. En la codificación estándar

adoptada en el proyecto, norma ISO 14224 – 2016, existen cuatro (4) naturalezas de fallas, esto conlleva a que la actividad desarrollada por un equipo pueda ser afectada por una falla localizada en alguna, o más de una de estas cuatro (4); por ello, es necesario distinguir la función de acuerdo a la o las naturalezas desde donde se puede dar una posible falla que la afecte, ya que con ello se pueden generar acciones de mantenimiento específicas para el equipo, con el personal y los dispositivos adecuados. Las naturalezas que se codifican son:

- EL: Falla de función desde el circuito eléctrico.
- ME: Falla de la función desde la operación mecánica de las piezas.
- MA: Falla de la función desde la utilización de material y/o su procesamiento.
- IN: falla de la función por operación inadecuada o nula de los instrumentos de medición.

Podría interpretarse a groso modo, que el no cumplimiento de la función de un equipo puede originarse en cualquiera de los cuatro sistemas posibles de operación que puede llegar a tener un equipo, entonces la función de cada componente debe ser discriminada de acuerdo a esta naturaleza. Citando un ejemplo, se puede ver que el equipo CR02: Trituradora ABON Secundaria posee una única función que puede fallar desde tres naturalezas distintas:

- CR02-EL1: Triturar material a 6 in.
- CR02-ME1: Triturar material a 6 in.
- CR02-MA1: Triturar material a 6 in.

Por otro lado, existen equipos con más de una función, y cada función puede ligarse a uno o más orígenes posibles de falla, por tanto, el número de funciones y de naturalezas de cada función depende únicamente del tipo de componente. Un ejemplo de este caso es el equipo FB01, se observan dos funciones cada una con dos clases, dado que las letras son la misma, la codificación varía solo en el consecutivo 1 y 2 de la clase, sea EL o ME; por tanto, se registran un total de 4

funciones. Cabe mencionar que las funciones son asignadas de acuerdo a la operación que desarrolla cada equipo y que están consignadas en los manuales correspondientes a cada máquina.

3.2.2 Descripción de Fallas Funcionales y los Modos de Falla. Ahora bien, una vez construido el árbol jerárquico con el conocimiento de las generalidades del proceso, los sistemas, operación de los equipos y sus funciones; se debe evaluar cuales son las posibles fallas funcionales y los modos en que pueden presentarse y afectar la operación. Son estas fallas las que han llevado a que no se cumpla con los objetivos corporativos, generando incluso que para mantener indicadores como la confiabilidad (por reducción o control de MTBF) se hagan sacrificios de disponibilidad (incrementándose el MTTR).

La identificación de las fallas y sus modos requiere del conocimiento y la experiencia de un equipo multidisciplinario que ha trabajado en el área, desde los técnicos hasta los supervisores. En el presente estudio se identificaron 150 fallas funcionales (FF) que comprenden un total de 352 modos de falla (MF). Todos estos datos se consignan en la matriz general donde se discriminan por sistema, equipo, función y tipo de falla funcional.

Por otro lado, la incorporación de las FF y los MF al árbol jerárquico del RCMCost se hace con el nivel café para FF y el nivel rojo para MF, como se presenta en la Figura 9, para ejemplo discriminado de los dos primeros equipos (BN01, FB01) del circuito CAL.

Figura 9. Relacionamiento de MF con funciones en RCMCost de AWB.



Tabla 3. Segmento Matriz de MF y FF en RCM ESTANDAR.xlsx.

		MODOS DE FALLA									
ID	Función	Función	ID FF	Falla Funcional	Falla Funcional	Modo de Falla (ISO)	Consecutivo MF (ISO)	Descripción ISO Fallas	ID MF	Modo de falla (SAE)	Técnica de detección
BN01-MA1	1	Almacenar 500T de material alimentado a un tamaño menor o igual a 700 mm de diámetro.	BN01-MA1-FF	1	Almacena material a un tamaño mayor a 70mm de diámetro	STD	1	Deficiencia estructural	STD1-BN01	Desprendimiento de las vigas del Grizzly debido a grietas	Inspeccion
BN01-MA2	2	Proteger la estructura de la tolva	BN01-MA2-FF	2	No protégé la estructura de la tolva	STD	2	Deficiencia estructural	STD2-BN01	Desprendimiento de laminas antidesgaste debido a vida util	Inspeccion
FB01-EL1	1	Transportar el material alimentado de la tolva y romperlo a un tamaño de 12in	FB01-EL1-FF	1	No transporta y no rompe el material alimentado de la tolva	FTS	1	Falla de arranque ante demanda	FTS1-FB01	Motor electrico FB01 quemado por perdida de aislamiento	Bajo demanda
FB01-EL1	1	Transportar el material alimentado de la tolva y romperlo a un tamaño de 12in	FB01-EL1-FF	1	No transporta y no rompe el material alimentado de la tolva	FTS	2	Falla de arranque ante demanda	FTS2-FB01	Rodamientos del motor electrico FB01 frenados debido a falta de lubricacion	Bajo demanda
FB01-ME1	1	Transportar el material alimentado de la tolva y romperlo a un tamaño de 12in	FB01-ME2-FF	2	No rompe material alimentado	FTF	1	Falla de la función ante demanda	FTF1-FB01	Rodamientos del reductor del FB01 frenado debido a falta de lubricacion	Bajo demanda
FB01-ME1	1	Transportar el material alimentado de la tolva y romperlo a un tamaño de 12in	FB01-ME2-FF	2	No rompe material alimentado	FTF	2	Falla de la función ante demanda	FTF2-FB01	Componentes internos del reductor FB01 destruidos debido a contaminación excesiva del aceite	Bajo demanda
FB01-ME1	1	Transportar el material alimentado de la tolva y romperlo a un tamaño de 12in	FB01-ME2-FF	2	No rompe material alimentado	FTI	1	Falla al operar como se requiere	FTI1-FB01	Fusible roto por alto impacto del rompedor	Interferencia de producción
FB01-ME1	1	Transportar el material alimentado de la tolva y romperlo a un tamaño de 12in	FB01-ME3-FF	3	No rompe material alimentado a un tamaño de 12in	PDE	1	Desviación de parámetros	PDE1-FB01	Porta picas del rompedor caídas debido a grietas	Interferencia de producción
FB01-ME1	1	Transportar el material alimentado de la tolva y romperlo a un tamaño de 12in	FB01-ME2-FF	2	No rompe material alimentado	FTS	4	Falla de arranque ante demanda	FTS4-FB01	Rodamiento del rompedor frenado debido a falta de lubricacion	Bajo demanda
FB01-ME1	1	Transportar el material alimentado de la tolva y romperlo a un tamaño de 12in	FB01-ME2-FF	2	No rompe material alimentado	BRD	1	Ruptura	BRD1-FB01	Cadena del rompedor fracturada debido a vida util	Bajo demanda
FB01-ME1	1	Transportar el material alimentado de la tolva y romperlo a un tamaño de 12in	FB01-ME2-FF	2	No rompe material alimentado	FTF	3	Falla de la función ante demanda	FTF3-FB01	Dientes de sprocket conductor del rompedor fracturado	Bajo demanda
FB01-ME1	1	Transportar el material alimentado de la tolva y romperlo a un tamaño de 12in	FB01-ME2-FF	2	No rompe material alimentado	FTF	4	Falla de la función ante demanda	FTF4-FB01	Dientes de sprocket conducido del rompedor fracturado	Bajo demanda

Por practicidad, en la Tabla 3. Segmento Matriz de MF y FF en RCM ESTANDAR.xlsx, se presenta un segmento de la matriz para que se pueda comprender la construcción y el relacionamiento de los MF con las FF y las funciones. Se parte de los datos generales de los equipos (no mostrados en el segmento) y una vez identificados con un código (Id del equipo) se asigna la función el número de veces necesarias para cubrir todos los modos de falla, es decir, los modos de fallas son únicos pero dos modos de falla diferentes pueden llevar a la misma falla funcional. El segmento mostrado comprende el Id con cada una de sus funciones y cada función con sus fallas funcionales discriminando los diferentes modos de falla de esta, adicionalmente se presenta el código ISO para la descripción de falla de forma estandarizada con el correspondiente MF de acuerdo a la norma SAE y finalmente, la tecnica de detección del mismo.

Con este conocimiento de los modos de falla y su incorporación en el árbol, se culmina la estructura a analizar, y solo resta alimentarla con las bases de datos que contrastandose con el MF y el tipo de tarea permitiran durante la simulación evaluar la criticidad de las mismas.

3.2.3 Bases de datos del modelo: Efectos, Repuestos, Talento, Equipo. Para que el analisis FMEA sea efectivo se debe contar con al menos el analisis de la matriz de efectos (que internamente en la simulación conformará la matriz de efectos y criticidad, según las probabilidades de falla). Sin embargo, este puede optimizarse al adicionarse otros datos del proceso o de los recursos y del personal con el que se puede contar en caso de una tarea correctiva para un evento de falla o de la aplicación de una tarea preventiva o predictiva.

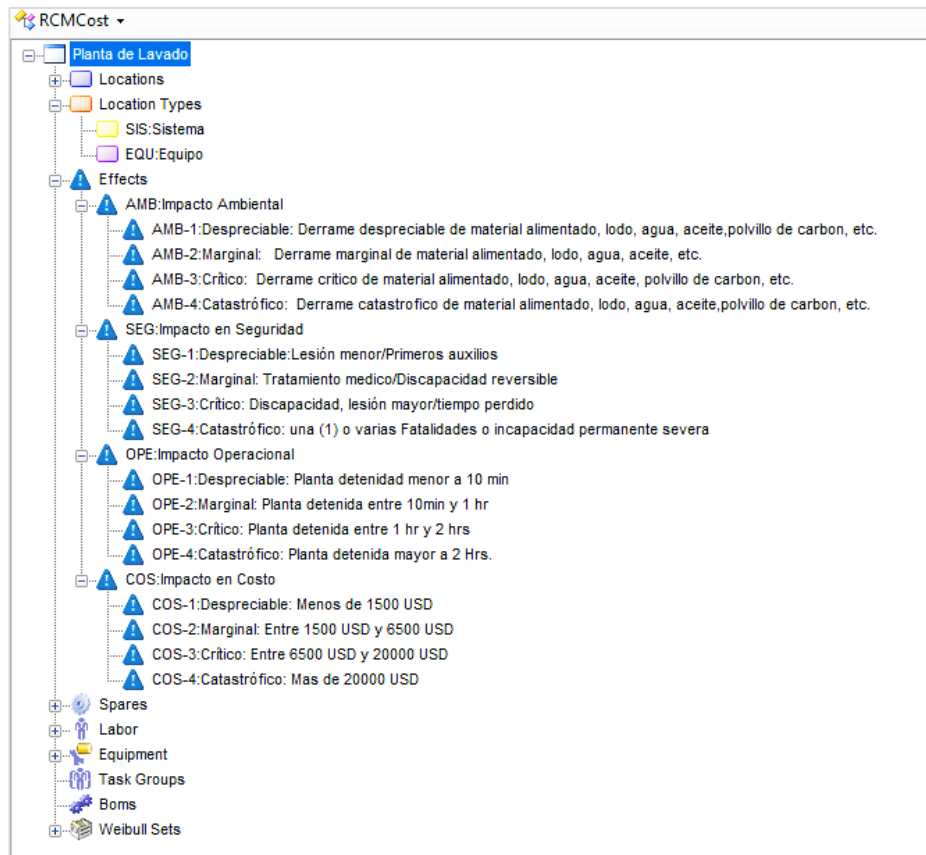
Para iniciar, se desarrolla dentro del área una revisión de los posibles 4 impactos, de acuerdo a la norma ISO, y la severidad de los mismos llegando a la construcción de la matriz de Efectos presentada en la tabla 4. Matriz de Efecto-Consecuencia.

Tabla 4. Matriz de Efecto-Consecuencia.

Criterio	Área de impacto	Hazard Severity (HS)
Ambiental		
Despreciable	Despreciable: Derrame despreciable de material alimentado, lodo, agua, aceite, polvillo de carbón, etc.	1
Marginal	Marginal: Derrame marginal de material alimentado, lodo, agua, aceite, etc.	2
Crítico	Crítico: Derrame critico de material alimentado, lodo, agua, aceite, polvillo de carbón, etc.	3
Catastrófico	Catastrófico: Derrame catastrófico de material alimentado, lodo, agua, aceite, polvillo de carbón, etc.	4
Seguridad		
Despreciable	Despreciable: Lesión menor/Primeros auxilios	1
Marginal	Marginal: Tratamiento médico/Discapacidad reversible	2
Crítico	Crítico: Discapacidad, lesión mayor/tiempo perdido	3
Catastrófico	Catastrófico: una (1) o varias Fatalidades o incapacidad permanente severa	4
Operacional		
Despreciable	Despreciable: Planta detenida menor a 10 min	1
Marginal	Marginal: Planta detenida entre 10 min y 1 hr	2
Crítico	Crítico: Planta detenida entre 1 hr y 2 hrs	3
Catastrófico	Catastrófico: Planta detenida mayor a 2 hrs.	4
Costo		
Despreciable	Despreciable: Menos de 1500 USD	1
Marginal	Marginal: Entre 1500 USD y 6500 USD	2
Crítico	Crítico: Entre 6500 USD y 20000 USD	3
Catastrófico	Catastrófico: Mas de 20000 USD	4

Una vez estructurada e interpretada la tabla de Efectos y Consecuencias para confirmar si representa lo que se busca al evaluar el efecto de una falla, se procede a ingresarla en la sección “effects” de la estructura de datos del módulo, quedando la ramificación presentada en la Figura 10. Árbol de Efectos y Consecuencias.

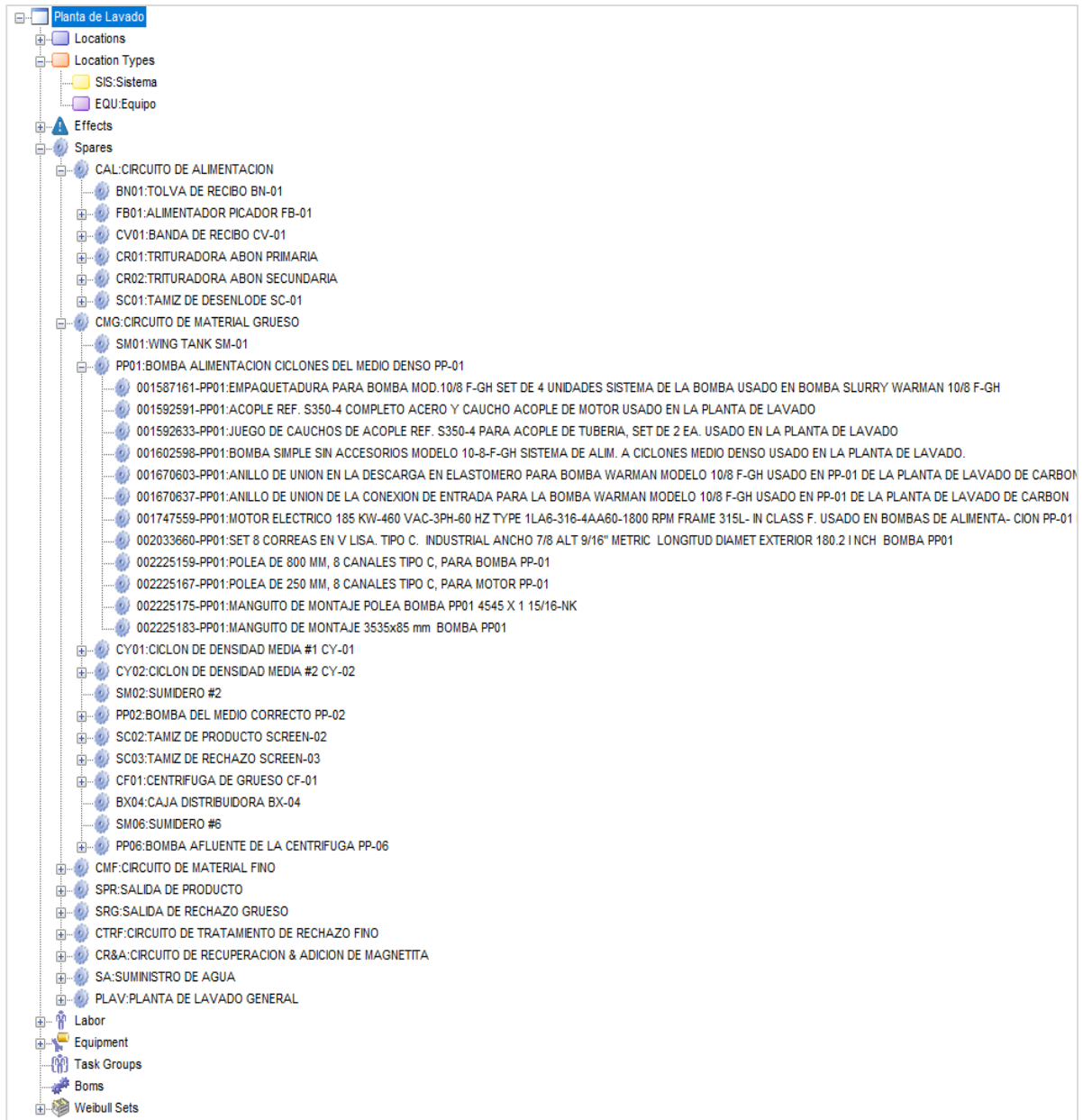
Figura 10. Árbol de Efectos y Consecuencias.



Posterior al cargue de esta base de datos se hace una revisión de todos los repuestos que pueden requerirse para afrontar cada uno de los 352 MF, y son ingresados de acuerdo al circuito y equipo, como es de esperarse el número de repuestos es variable. En la figura 11. Árbol de Repuestos para cada Equipo, se puede observar toda la información ingresada en AWB para ser la base de datos de repuestos (*Spares* en inglés).

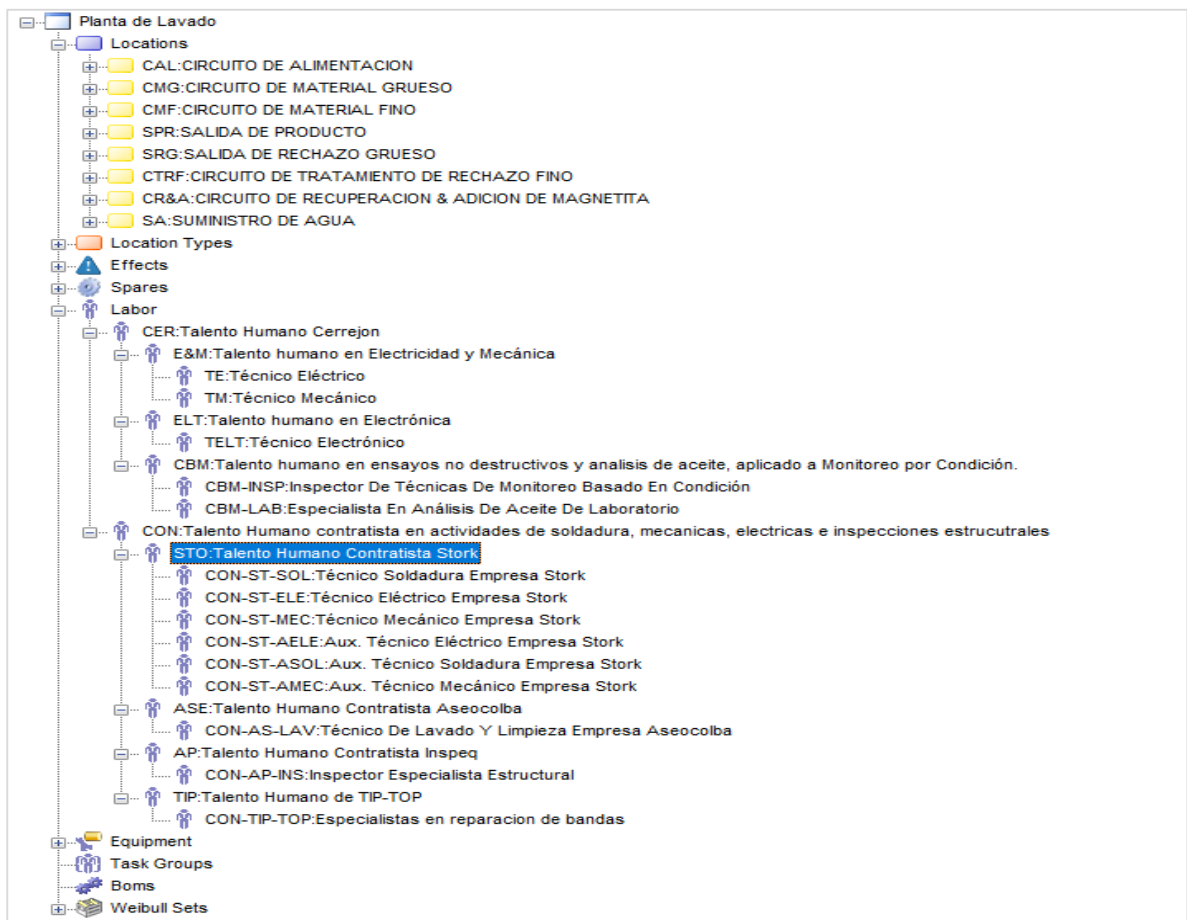
Una vez ingresados los repuestos, se puede terminar de cargar otros recursos como los equipos (*Equipment* en inglés, citado en la estructura de datos de AWB) o el Talento Humano disponible para afrontar todas las tareas de mantenimiento (*Labor* en inglés dentro de la estructura de datos de AWB).

Figura 11. Árbol de Repuestos para cada Equipo.



En el grupo de Talento Humano – *Labor* – se encuentran dos grupos principales, como se ve en la Figura 12. Talento Humano en Servicio; uno es el Talento Humano Cerrejón, denominado CER y el otro es Talento Humano Contratista denominado CON. En el grupo CER se discriminan las áreas E&M para Electricidad y Mecánica, ELT para Electrónica y CBM para el Talento Humano preparado para ensayos no destructivos y análisis de aceite, aplicado a Monitoreo por Condición. En el grupo CON se listan las diferentes empresas con su personal disponible para dar apoyo a las tareas del área.

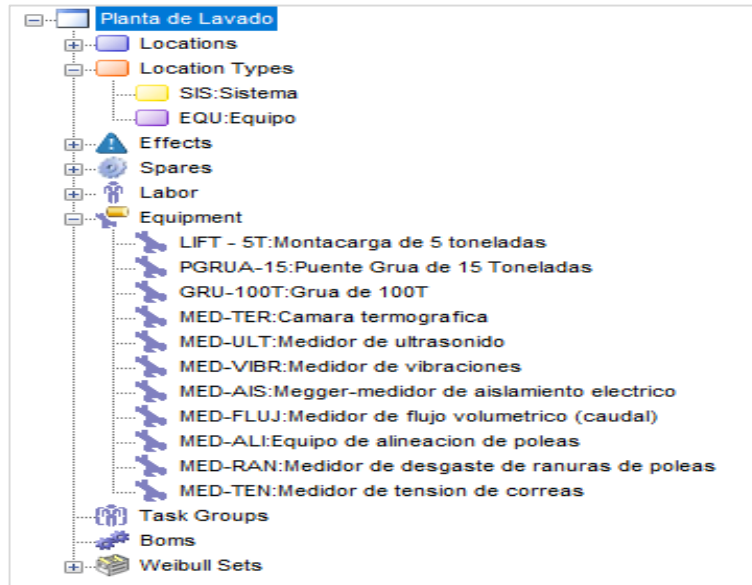
Figura 12. Talento Humano en Servicio.



Con la mano de obra ya definida, se procedió a incorporar los equipos del área que están disponibles para realizar las tareas de mantenimientos preventivos,

predictivos y correctivos. Estos son presentados en la Figura 13, y van desde el montacargas y puente grúa hasta los medidores de tensión de las correas.

Figura 13. Equipos disponibles para mantenimientos



Una vez completada la tarea de definir e ingresar al software la matriz de consecuencias, los recursos y el talento humano disponible, se ha completado el análisis de los posibles efectos de los modos de falla al determinar que se puede requerir para las diferentes tareas y las cantidades u horas hombre disponibles para culminarlas. Por lo cual, el siguiente paso antes de culminar el modelo RCM, es definir cuáles son los modos de falla que van a ser abordados con las diferentes clases de tareas de mantenimiento; además, como se busca incorporar un análisis numérico de disponibilidad y confiabilidad, estos modos de falla deben ser determinados junto a sus probabilidades de ocurrencia en la vida útil de la planta.

3.3 ANÁLISIS Y DEPURACIÓN DE DATOS DE FALLA PARA LOS EQUIPOS

Para comprender los datos de falla de los equipos y cuales MF se pueden apoyar en datos reales del proceso (existen algunos cuya probabilidad se asumirá con modelos empíricos como el Weibayes), se estudia la función y la naturaleza desde la que pueden fallar apoyándose en los documentos de registros de DOWNS y el los OTS que se tengan en el área de PL preferiblemente. Es cierto que se pueden llegar a usar bases de datos de equipos iguales o similares usados en otros procesos para determinar la probabilidad de falla en caso de no contar con datos registrados o experiencia con el equipo, pero no es aconsejable pues dichos datos no presentan la realidad operativa del equipo en cuestión con su lugar respectivo en la cadena productiva que se quiere analizar.

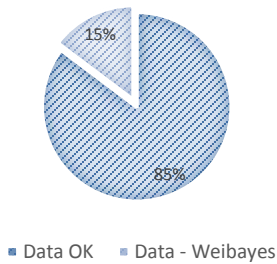
El análisis de la data permitió construir una matriz donde se identificaban tres tipos de variables, primero las frecuencias o curvas de probabilidad de la confiabilidad llamada $R(t)$ para cada modo de falla que contara con suficientes registros completos entre la información cruzada de los OTS y los eventos DOWNS; así también se determinó de acuerdo a las tareas de mantenimiento, los tiempo medios de mantenimientos correctivos variable $M(t)$ -CO que genera la curva del mismo nombre, y los tiempos medios de mantenimientos preventivos identificados $M(t)$ -PM con la curva del mismo nombre. El análisis de la data consistía en relacionar el MF a la descripción de la tarea que se asemejaba en la fuente de las ordenes de trabajo (OTS) y su respectivo Down, luego hallar las frecuencias de falla usando todos los eventos que coincidieran con la descripción del MF; finalmente, estas frecuencias de falla para el respectivo MF y las fechas en las cuales se repetía, permite calcular la tasa media de falla y con ello, la confiabilidad – $R(t)$. Adicionalmente, los datos de los registros aportan el tiempo que demoraba en aplicarse la reparación correctiva, con ello y se calcula el tiempo medio de reparación Correctivo denominado en Weibull $M(t)$ CO (MTTR). Finalmente, en los datos se relacionan los eventos PM

(mantenimientos preventivos) y su respectiva duración para cada fecha, con lo cual se calcula el tiempo medio de mantenimiento preventivo $M(t)$ PM.

El procedimiento de depuración de datos consistía en evaluar aquellos que tuvieran la información completa y estuviesen claramente identificados con alguna descripción de falla. Los modos de falla que contaron con información insuficiente para estimar un comportamiento de las curvas por Weibull debieron ser estimadas sus curvas por experiencia de los técnicos y profesionales interdisciplinarios, implementando el análisis Weibayes. La proporción de MF tratados por cada análisis estadístico se presenta en la Figura 14.

Figura 14. Proporción de Análisis Weibayes – Segmento de matriz de MF

PORCENTAJE POR
WEIBAYES



EQUIPO	Descripción Equipo	ID MF	Modo de falla (SAE)	Terminado	Nota
CF02	CENTRIFUGA DE FINOS	FTS1-CF02	Motor eléctrico CF02 quemado por pérdida de aislamiento	NO	Usar método Weibayes
CF02	CENTRIFUGA DE FINOS	BRD1-CF02	Correas rotas debido a desgaste natural	NO	Usar método Weibayes
BN01	TOLVA DE RECIBO BN-01	STD1-BN01	Desprendimiento de las vigas del Grizzly debido a grietas	SI	
BN01	TOLVA DE RECIBO BN-01	STD2-BN01	Desprendimiento de laminas antideshaste debido a vida útil	SI	
FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	FTS1-FB01	Motor eléctrico FB01 quemado por pérdida de aislamiento	SI	
FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	FTS2-FB01	Rodamientos del motor eléctrico FB01 frenados debido a falta de lubricación	NO	Usar método Weibayes
FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	FTF1-FB01	Rodamientos del reductor del FB01 frenado debido a falta de lubricación	SI	
FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	FTF2-FB01	Componentes internos del reductor FB01 destruidos debido a contaminación excesiva del aceite	SI	
FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	FTI1-FB01	Fusible roto por alto impacto del rompedor	SI	
FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	PDE1-FB01	Porta picas del rompedor caídas debido a grietas	SI	
FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	FTS4-FB01	Rodamiento del rompedor frenado debido a falta de lubricación	NO	Usar método Weibayes
FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	BRD1-FB01	Cadena del rompedor fracturada debido a vida útil	SI	
FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	FTF3-FB01	Dientes de sprocket conductor del rompedor fracturado	SI	
FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	FTF4-FB01	Dientes de sprocket conducido del rompedor fracturado	SI	

Las curvas generadas del cruce de data, se registraron en el módulo Weibull a través de sets de datos donde se asociaba cada una de las tres variables identificadas con cada modo de falla para cada equipo. Debido a la longevidad de dicha matriz, a continuación, se presenta solo un fragmento, un ejemplo de un set asociado al módulo Weibull en la tabla 5.

Tabla 5. Ejemplo de set para variable $R(t)$ asociada a un modo de falla en un equipo

SubIndex	TimeValue	Suspended	WeibullSet
0	11256	FALSO	STD1-BN02- R(t)
1	360	FALSO	STD1-BN02- R(t)
2	2016	FALSO	STD1-BN02- R(t)
3	1656	FALSO	STD1-BN02- R(t)
4	192	FALSO	STD1-BN02- R(t)
5	2328	FALSO	STD1-BN02- R(t)
6	24	FALSO	STD1-BN02- R(t)
7	4344	FALSO	STD1-BN02- R(t)
8	1488	FALSO	STD1-BN02- R(t)
9	2856	FALSO	STD1-BN02- R(t)
10	1680	FALSO	STD1-BN02- R(t)
11	5280	FALSO	STD1-BN02- R(t)
12	4704	FALSO	STD1-BN02- R(t)
13	1488	FALSO	STD1-BN02- R(t)
14	4056	FALSO	STD1-BN02- R(t)
15	5976	FALSO	STD1-BN02- R(t)
16	12744	FALSO	STD1-BN02- R(t)
17	5208	FALSO	STD1-BN02- R(t)
18	2688	FALSO	STD1-BN02- R(t)
19	288	FALSO	STD1-BN02- R(t)
20	576	FALSO	STD1-BN02- R(t)
21	3024	FALSO	STD1-BN02- R(t)
22	1680	FALSO	STD1-BN02- R(t)
23	2688	FALSO	STD1-BN02- R(t)
24	4584	FALSO	STD1-BN02- R(t)

De la tabla 5, es importante destacar que el subíndice es solo la organización del dato para el modelo, pero el estado “Suspendido” es de gran relevancia para el cálculo de la confiabilidad. Un dato suspendido (aquel con booleano verdadero) es aquel dato que corresponde a un mantenimiento diferente al correctivo, como un PM, y por tanto al ser planeado y no estar relacionado con una falla del sistema o la operación, es irrelevante para estimar la confiabilidad; incluso, la adición de

demasiados datos suspendidos al módulo genera una interpretación errada de la curva de confiabilidad por paradas excesivas del sistema, situación que se presentó en el desarrollo del proyecto por la gran cantidad de registros de mantenimientos preventivos (como se explicaba al comienzo del libro, se llegó a optar por incrementar confiabilidad aumentando las horas de mantenimiento y disminuyendo la disponibilidad en el área). Por tanto, Los datos para el análisis del $R(t)$ se filtraron para seleccionar datos no suspendidos. Finalmente, estas matrices generadas fueron cargadas a los respectivos sets del módulo.

4. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO PARA LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

El presente proyecto busca proponer un modelo de Gestión de Mantenimiento para la empresa que sea una primera referencia en el uso de la estadística de datos claros, organizados y estandarizados sobre los eventos de falla presentados y sus características, modelo que además aplicará a los resultados del análisis estadístico una simulación de la operatividad de la planta y permitirá a partir de predicciones dadas la toma más clara y oportuna de decisiones sobre las tareas de mantenimiento e intervenciones de un equipo.

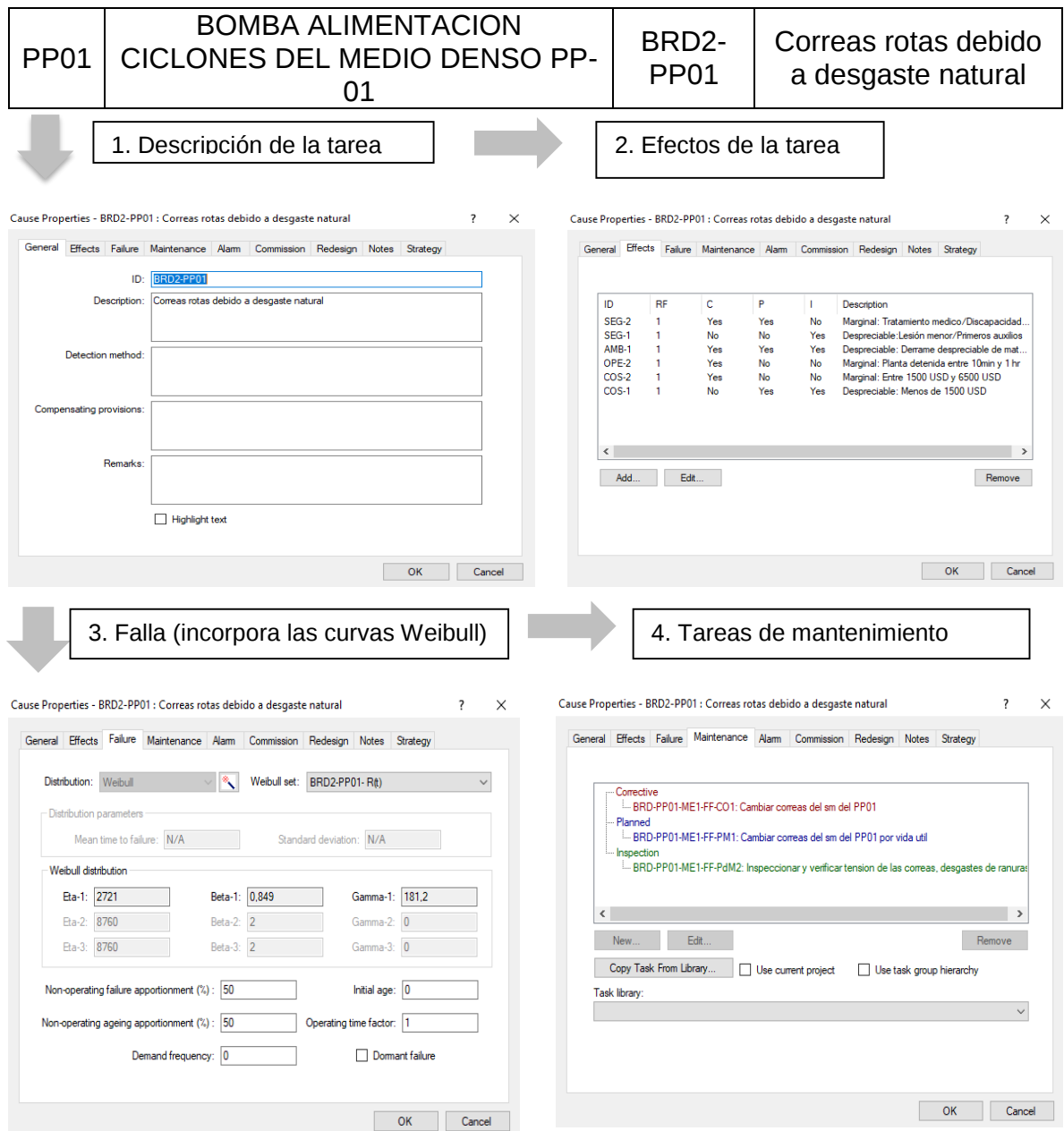
Cabe mencionar que, al ser un primer acercamiento, muchos de los datos que había sobre eventos de falla han sido descartados por falta de claridad o falta de información, lo cual aportaba ruido y hacía complicado el análisis estadístico. Los datos seleccionados son entonces una primera aproximación del modelo, por tanto, la efectividad del mismo aumentará conforme se aplique el proceso estandarizado para el registro de eventos y sus MF que se propone en el presente documento, generando con ello una base de datos de mayor calidad que aporte información mejor soportada y definida al análisis estadístico base en el modelo.

4.1 MODELO RCM

El RCM comúnmente trabajado, emplea un diagrama de decisión en el cual se asignan tareas preventivas, predictivas y correctivas usando la valoración técnica subjetiva. En este caso se incorpora la valoración estadística por medio de un análisis Weibull desarrollado en software (AWB) y que es base para el análisis RAM que aporta la interpretación cuantitativa a la definición de tareas que se desarrolla con el modelo RCM posterior al análisis FMEA.

En el capítulo 2 se desarrollaron las bases del modelo cualitativo RCM y en el capítulo 3 se inició el modelamiento para la gestión del mantenimiento en la PL. Finalmente, en este capítulo se incorporan al software las diferentes tareas relacionándolas con cada elemento de la base de datos generada. En la Figura 15, se puede observar un ejemplo de la estructura interna del modelo RCM.

Figura 15. Ejemplo de la estructura interna de las tareas, modelo RCM.



PP01	BOMBA ALIMENTACION CICLONES DEL MEDIO DENSO PP- 01	BRD2- PP01	Correas rotas debido a desgaste natural
------	--	---------------	--

5. Agregar tarea correctiva

6. Agregar tarea preventiva

Task Properties - BRD-PP01-ME1-FF-CO1 : Cambiar correas del sm del P...

General Advanced Notes

Description: Cambiar correas del sm del PP01

Task ID: BRD-PP01-ME1-FF-CO1

Task duration: 11.58 Operational cost: 0

Ramp time: 0

Resources:

- TM x 2 Técnico Mecánico
- CON-ST-MEC x 1 Técnico Mecánico Empresa Stork
- 002033660-PP01 x 1 SET 8 CORREAS EN V LISA, TIPO C. INDUSTRIAL A...

Add... Add... Add... Edit... Remove

OK Cancel

Task Properties - BRD-PP01-ME1-FF-PM1 : Cambiar correas del sm del ...

General Advanced Notes Optimization

☒ Task enabled

Interval: 1850 Offset: 0 ☒ Fixed interval

Description: Cambiar correas del sm del PP01 por vida útil

Task ID: BRD-PP01-ME1-FF-PM1

Task duration: 1.44 Operational cost: 0

Ramp time: 0 Minimum age: 0

Task group: Not set

New Group... Edit Group...

Resources:

- TM x 1 Técnico Mecánico
- CON-ST-MEC x 1 Técnico Mecánico Empresa Stork
- 002033660-PP01 x 1 SET 8 CORREAS EN V LISA, TIPO C. INDUSTRIAL A...

Add... Add... Add... Edit... Remove

Copy Corrective Properties OK Cancel

7. Agregar tarea de inspección

8. Tareas de mantenimiento

Task Properties - BRD-PP01-ME1-FF-PdM2 : Inspeccionar y verificar ten...

General Advanced Predictive Data Notes Optimization

☒ Task enabled

Interval: 1850 Offset: 0 ☒ Fixed interval

Description: Inspeccionar y verificar tension de las correas, desgastes de ranuras

Task ID: BRD-PP01-ME1-FF-PdM2

Task duration: 1.44 Operational cost: 0

Ramp time: 0 Minimum age: 0

Task group: Not set

New Group... Edit Group...

Resources:

- TM x 1 Técnico Mecánico
- CON-ST-MEC x 1 Técnico Mecánico Empresa Stork
- MED-RAN x 1 Medidor de desgaste de ranuras de poleas
- MED-TEN x 1 Medidor de tension de correas

Add... Add... Edit... Remove

OK Cancel

Cause Properties - BRD2-PP01 : Correas rotas debido a desgaste natural

General Effects Failure Maintenance Alarm Commission Redesign Notes Strategy

Maintenance and design strategy:

Strategy	Enabled	Interval	Group	Description
Planned Maintenance	☒	1850	Not set	Cambiar correas del sm del PP01 por vida útil
Inspection	☒	1850	Not set	Inspeccionar y verificar tension de las correas
Alarm	☐			
Commission	☐			
Redesign	☐			

Interval optimization... Edit task...

Predictions:

Cost:	Cost benefit ratio:
Safety criticality:	Safety benefit ratio:
Operational criticality:	Operational benefit ratio:
Environmental criticality:	Environmental benefit ratio:
Failure down time:	Number lifetime failures:
PM down time:	Number lifetime PMs:
Inspection down time:	Number lifetime inspections:
Statistical mean in TDT:	Statistical mean in cost:

OK Cancel

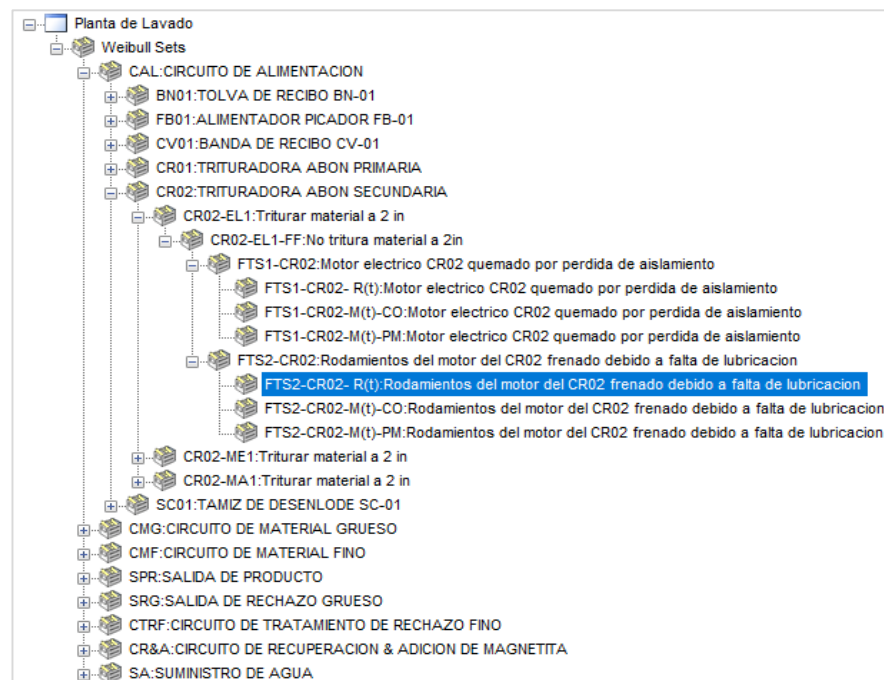
La Figura 15 muestra el proceso de registro de las tareas de mantenimiento en RCM para el módulo, dentro del cuarto paso a medida que se ingresa cada tarea (ítems 4, 5, 6 y 7) se relacionan la curva de confiabilidad para la falla, $R(t)$, la curva del tiempo medio para mantenimiento correctivo, tiempo medio para mantenimiento

preventivo y las bases de datos para las inspecciones y la estrategia de mantenimiento respectivamente. Para cuantificar y medir la frecuencia y probabilidad de presentarse cada MF y asignar las diferentes tareas, se incorporó a la estrategia RCM la metodología de análisis de disponibilidad y confiabilidad, RAM, basada en el método estadístico de Weibull, que se explica a continuación.

4.2 INCORPORACIÓN DEL ANALISIS RAM AL RCM

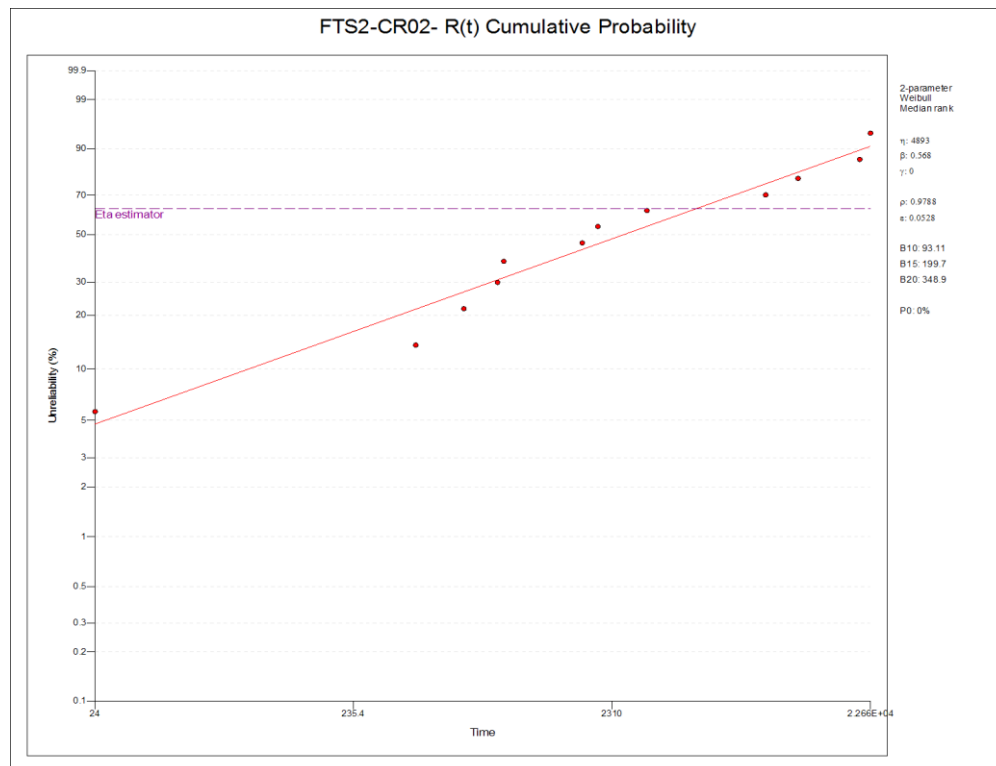
Como se ha dicho, es la base cuantitativa para dar la extensión del RCM a valores medibles que pueden representar de una forma más real y eficiente el modelo de comportamiento del sistema en funcionamiento. Incorpora la valoración estadística con la tasa media de falla para obtener la confiabilidad, y la tasa media de duración de la reparación para la evaluación de la mantenibilidad. Este análisis lo aplica la simulación del modelo con los sets Weibull relacionados a los MF y las tareas.

Figura 16. Sets de Weibull para análisis de probabilidad de falla



Como se ve en la Figura 16, cada MF para cada componente posee las respectivas curvas descritas en el análisis Weibull. En el momento de la simulación, los modos de falla se organizarán en la operación de acuerdo a su curva de probabilidad e intervalo de intervención para el mantenimiento, llamando las respectivas tareas en el orden del tiempo de simulación recreando una operación real de la PL y permitiendo analizar la disponibilidad, confiabilidad, el tiempo de mantenibilidad, entre otros indicadores para el periodo de simulación.

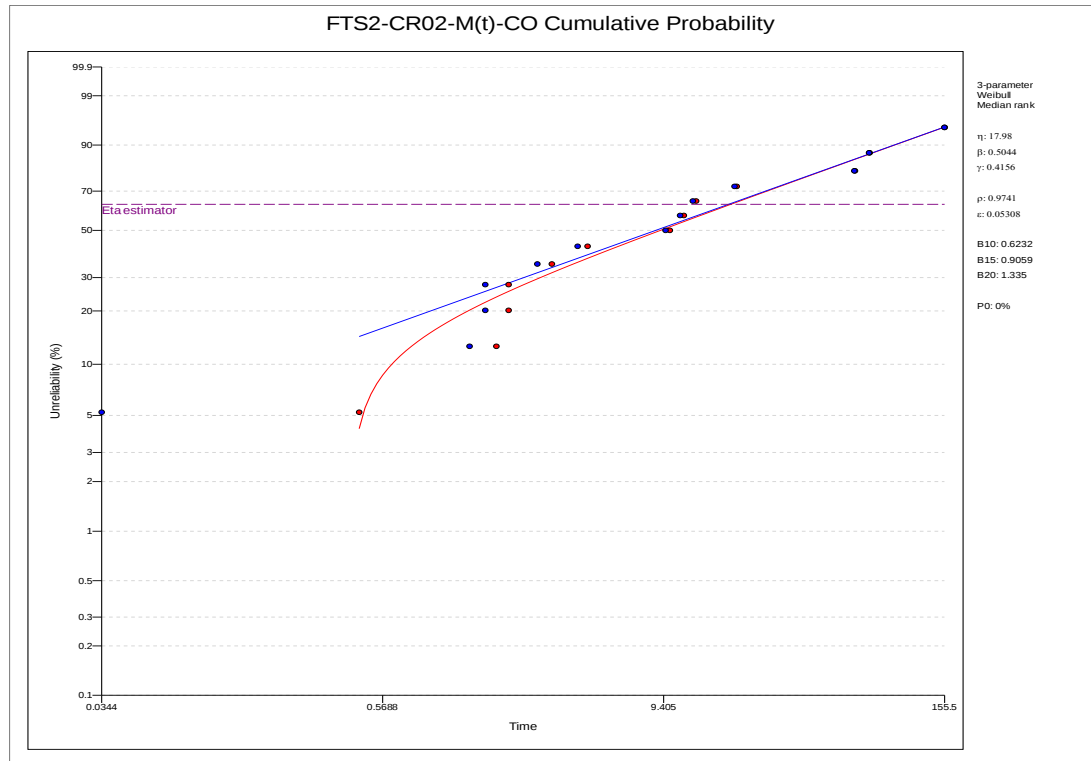
Figura 17. Curva de probabilidad acumulada de tasa de confiabilidad



Un ejemplo de las curvas de probabilidad se presenta en la Figuras 17 para el $R(t)$, Figura 18 para el $M(t)$ CO, y Figura 19 para el $M(t)$ PM. El modo de falla ejemplo es rodamientos del motor de trituradora secundaria frenados debido a falta de lubricación (FT2-CR02). En la curva de confiabilidad se observa una correlación del 98% aproximadamente para un modelo Weibull bi-paramétrico con solo Eta y Beta. El Beta es menor a 1, lo que indica falla prematura, de tipo mortalidad infantil –

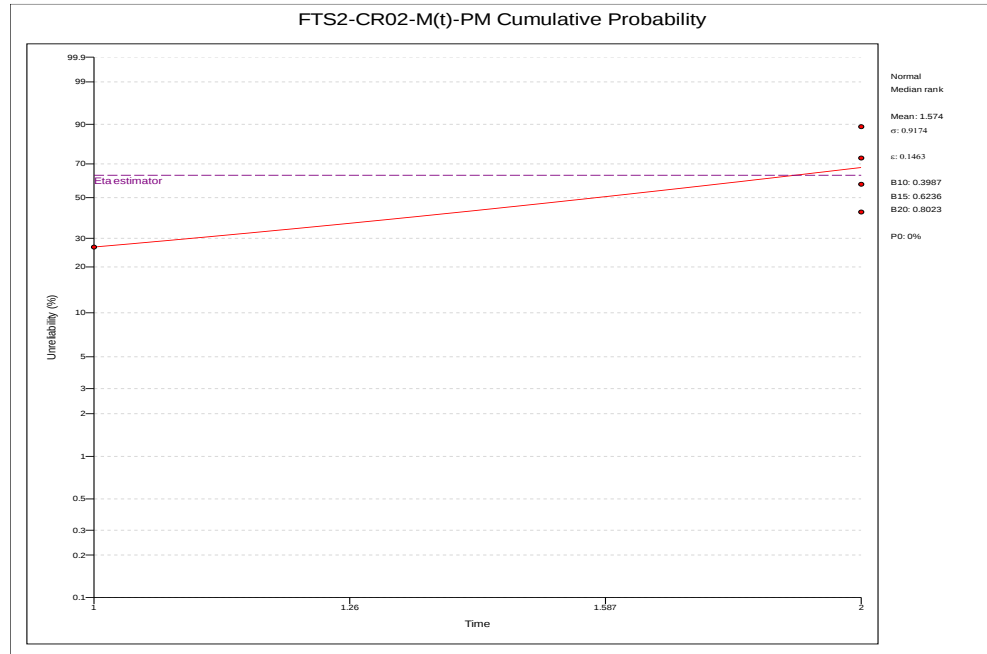
probabilidad de falla alta al inicio de operación. Efectivamente a solo 93.11 horas existe un riesgo del 10 por ciento de indisponibilidad, a las 348.9 horas ha crecido al 20% y a las 4893 horas el riesgo a alcanzado el valor Eta, alrededor del 65% de indisponibilidad.

Figura 18. Probabilidad acumulada para tiempo de mantenimiento correctivo



La tasa de media de mantenimiento correctivo por otro lado genera una curva tri-paramétrica con correlación del 97% aproximadamente, con una probabilidad Eta de que el tiempo medio sea de 17,98 horas. Por otro lado, el tiempo medio para el mantenimiento preventivo describe una distribución normal, prácticamente establecido a 2 horas, y genera un valor de tiempo principal de 1,57 horas.

Figura 19. Probabilidad acumulada para tiempo en mantenimiento preventivo

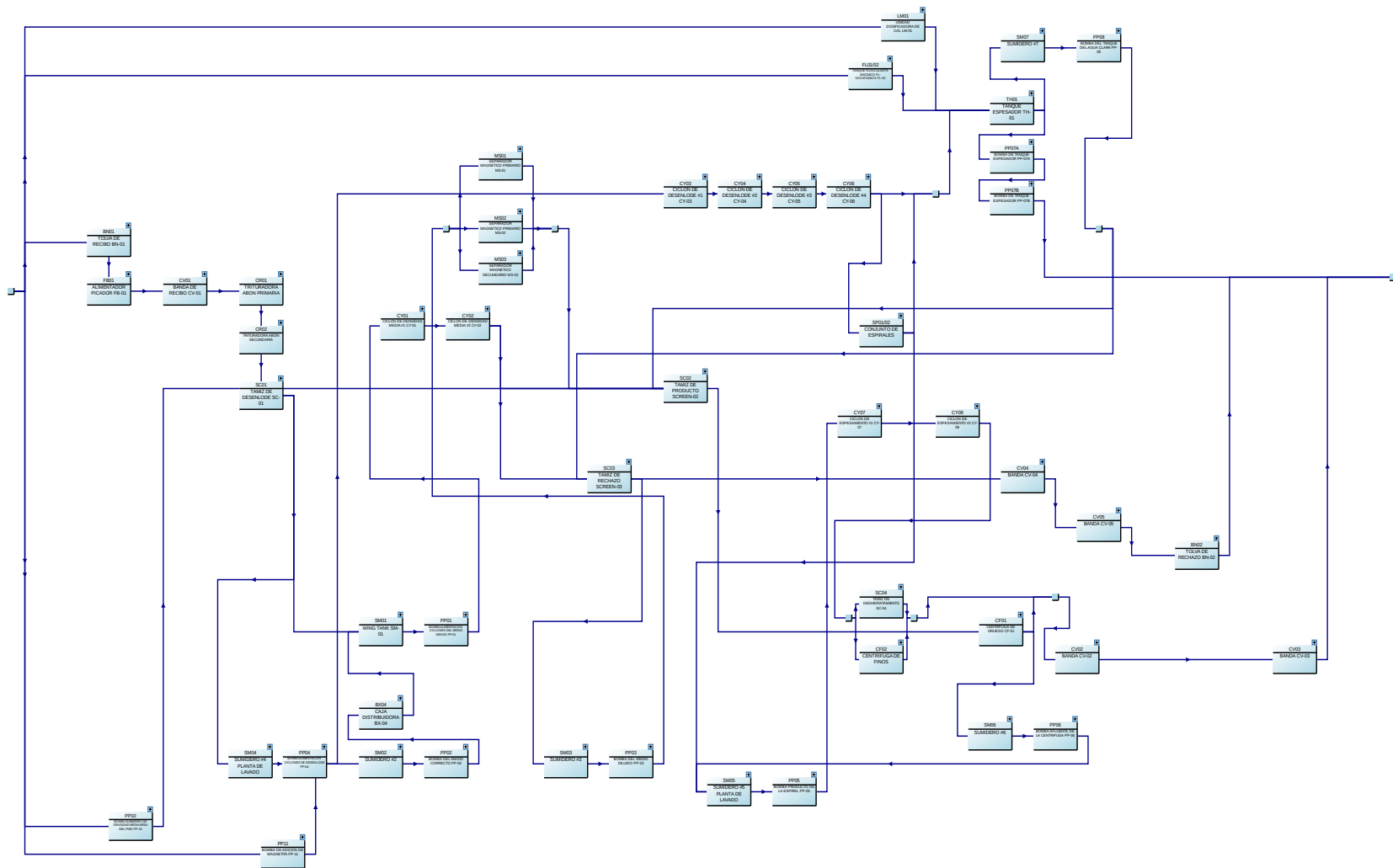


4.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO RBD

Con el análisis RAM combinado al RCM se tiene un modelo que revisa cada sector de la PL, en el módulo AvSim se puede construir un análisis además de las interacciones de dichos sectores y del flujo operativo del proceso mediante la generación de un modelo RBD. A partir del análisis del árbol jerárquico y los niveles identificados en la taxonomía, así como el conocimiento del proceso mismo se construye el flujo operativo de la planta que se presenta en la figura 20.

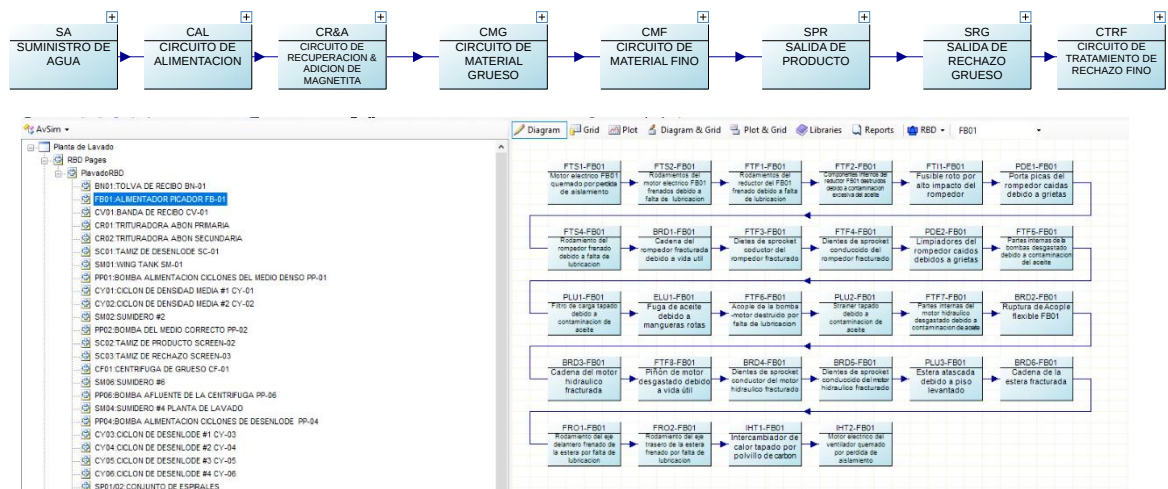
Con la información relacionada de los modos de falla, los efectos, criterios, tareas y demás información, el módulo AvSim de acuerdo a su filosofía de operación permite simular la operación de la planta, en este caso para un año o 8760 horas, con el fin de estimar la tasa de disponibilidad, confiabilidad, tiempo de mantenibilidad, número de paradas de operación, probabilidad de funcionabilidad del equipo, entre otras variables de utilidad en la toma de decisiones de mantenimiento.

Figura 20. Modelo RBD de la PL, Cerrejón, en AvSim, AWB.



La Figura 20 presenta todas las relaciones de los componentes de los sistemas, sin embargo, si contraemos los componentes se tendrá un proceso prácticamente lineal en cada sistema, y cada sistema lineal con respecto al otro. Pese a que hallan relaciones en paralelo de algunos componentes, si un sistema falla toda la operación se detiene, por lo cual, se comportan como diagramas en serie a nivel general. En la figura 21 (Arriba) se puede ver el flujo entre sistemas, y en la figura 21 (Abajo) se puede ver el encadenamiento de los modos de falla para su evaluación en un componente ejemplo, Alimentador-picador FB-01, esta metodología aplica para los demás componentes.

Figura 21. RBD por sistema (Arriba). Cadena de MF para FB-01 (Abajo).



En el siguiente capítulo se presentan los resultados de la simulación conjunta de los modelos a través de AvSim.

5. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

La gestión de mantenimiento actual se basa principalmente en las recomendaciones de fabricantes y la experiencia de técnicos e ingenieros. Cuenta con tareas de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo; pero no existe una base de un modelo con conocimiento adquirido sobre el propio proceso de la planta, contemplando sus condiciones particulares, los modos más probables de falla de acuerdo a la labor industrial y la cadena de proceso que desempeñan. Es decir, el mantenimiento puede mejorarse en la medida que se genere un conocimiento claro sobre los MF de los equipos, sus probabilidades, y cuáles son las tareas prioritarias para mitigar los eventos no deseados más probables y de mayor impacto; lo cual requiere a su vez, de mayor organización y claridad sobre la información adquirida en el contexto de operación propia de esta área.

Actualmente se tiene un Plan de mantenimiento, PM, con una duración media entre 12 y 18 horas, es rutinario con periodicidad semanal y se desarrollan siempre las mismas tareas de mantenimiento conformadas por SEIS –Servicios e Inspecciones; entre las cuales están: Inspección general, lubricación, limpieza, verificación de condición de operación e inspección estructural en soldadura.

Cabe agregar que también se realizan tareas predictivas, como análisis de aceite o inspecciones estructurales a componentes críticos, con el fin de conocer de la estructura en operación y determinar o predecir si se requiere alguna acción pronta adicional al PM preventivo que se aplica.

En cuanto a las tareas correctivas, en el momento que la planta adquirió relevada importancia en 2016 se realizaron trabajos para analizar el stock de repuestos

críticos. Se determinaron las piezas y las cantidades fundamentales a mantener desde dicho año, permitiendo mejorar notablemente la respuesta del personal ante tareas correctivas para cada equipo.

Finalmente, los indicadores de la estrategia actual se presentan en la tabla 1, los principales se han mantenido aproximadamente similares en los últimos años como la disponibilidad del 77% del tiempo planeado con una confiabilidad en la operación general de 72%; además, un tiempo medio entre falla de solo 36,83 horas y un tiempo medio de reparación de hasta 11,2 horas en promedio. Los trabajos de reparaciones y el mantenimiento preventivo continuo, si bien hicieron parte de las estrategias tomadas para mejorar la confiabilidad, han comprometido el desempeño de la planta bajando su disponibilidad.

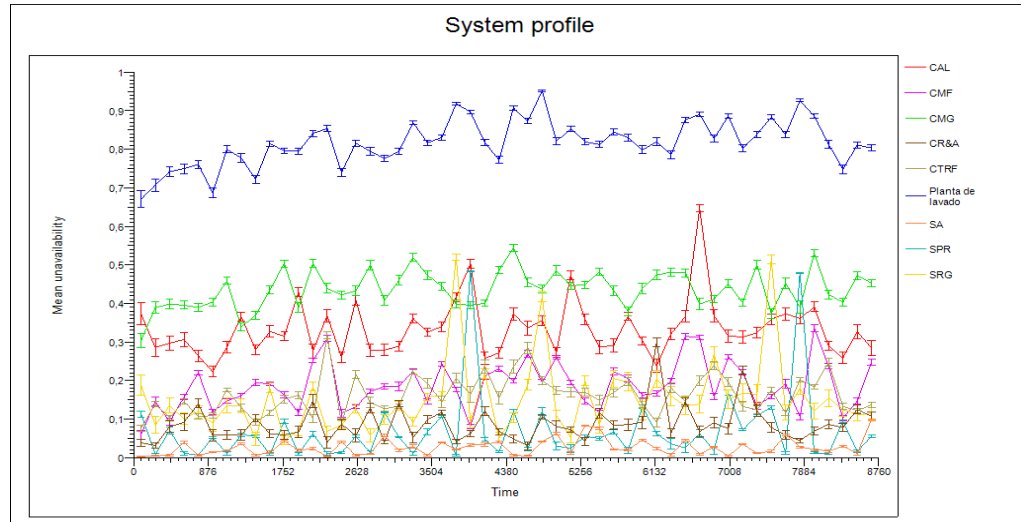
Se entrega al final de este capítulo una propuesta de mantenimiento que cubija un modelo optimizado de análisis RCM-RAM-RBD sostenible y mejorable en el tiempo, soportando el fortalecimiento de los indicadores operativos en conjunto, sin sacrificar uno para elevar otro.

5.1 ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN INICIAL DE LA ESTRATEGIA

Dentro de los resultados destacables en el modelo inicialmente simulado, denominado también como modelo no optimizado, se presentan resultados de amplia dispersión en el tiempo de paradas e intervenciones para mantenimiento, con cruces entre los distintos sistemas. Esto se debe a que el simulador asume inicialmente frecuentes puntos de intervención y mantenimiento, sin contemplar el comportamiento de la falla; por ejemplo, si es una falla prematura y se hace mantenimiento a intervalos pequeños de alta frecuencia, incrementa la probabilidad de falla en operación pese a que se haya hecho mantenimientos sucesivos pues no

mitigan el tipo de falla presente. Estos resultados del perfil de confiabilidad por equipo se presentan en la figura 22.

Figura 22. Perfil del Sistema por Circuitos del Sistema

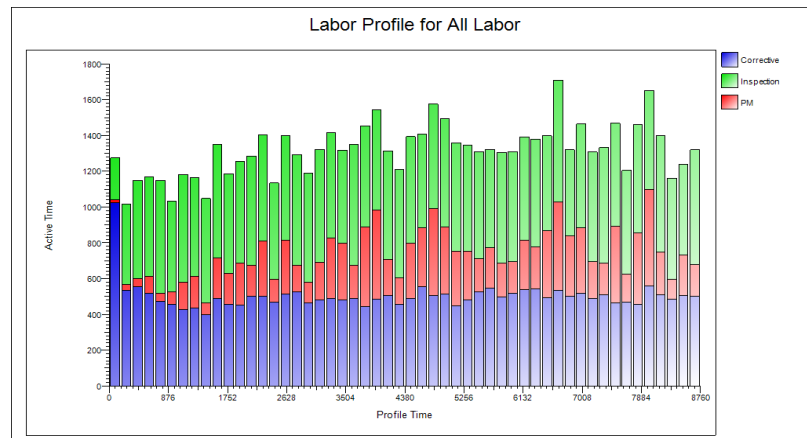


En este contexto, la optimización consiste en evaluar para cada modo de falla cuál es el comportamiento del mismo, mediante el análisis de la curva de probabilidad de falla; y de acuerdo a ello, elegir el tiempo de intervención más adecuado para mejorar la confiabilidad del sistema y los demás indicadores de operación.

El ruido observado en la simulación inicial es transferido desde los componentes hasta los sistemas generales, los cuales presentan el mismo comportamiento de frecuencias sucesivas de mantenimiento, lo cual lleva a la planta a un nivel promedio de indisponibilidad del 82%.

Al revisar el perfil de uso del talento humano, se observa un uso continuo y amplio que confirma la elevada frecuencia de mantenimiento que no atiende a solucionar la naturaleza de las fallas. Ver figura 23.

Figura 23. Perfil de Labor – Planta Lavado



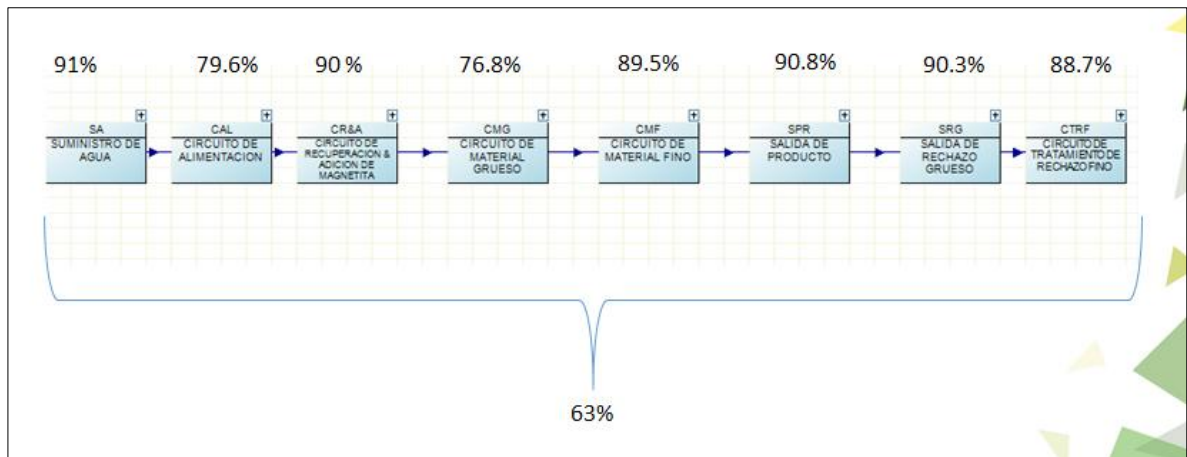
Para optimizar el sistema se requiere de pruebas de desempeño a diferentes tiempos de intervención donde se tienen en cuenta las curvas de probabilidad de confiabilidad, principalmente con el valor Beta. Aquellos de valor Beta superior a uno fallaran por envejecimiento y requieren, por tanto, poco ajuste del tiempo de intervención, los equipos más críticos dependerán de cuanto menor sean con respecto al valor 1.

La optimización se centra en la evaluación de los MF de más impacto para la planta en general, luego los de menor impacto. Se busca encontrar el tiempo que evite la materialización de las fallas prematuras después de un mantenimiento preventivo reduciendo NPT, horas hombre y materiales en las tareas. Para ajustar los tiempos de intervención

5.2 ANALISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos presentan de acuerdo a su MTBO, una confiabilidad general para la planta de lavado en un turno de 12 horas de un 63%, como se puede observar en la figura 24.

Figura 24. Confiabilidad por componente y de la PL

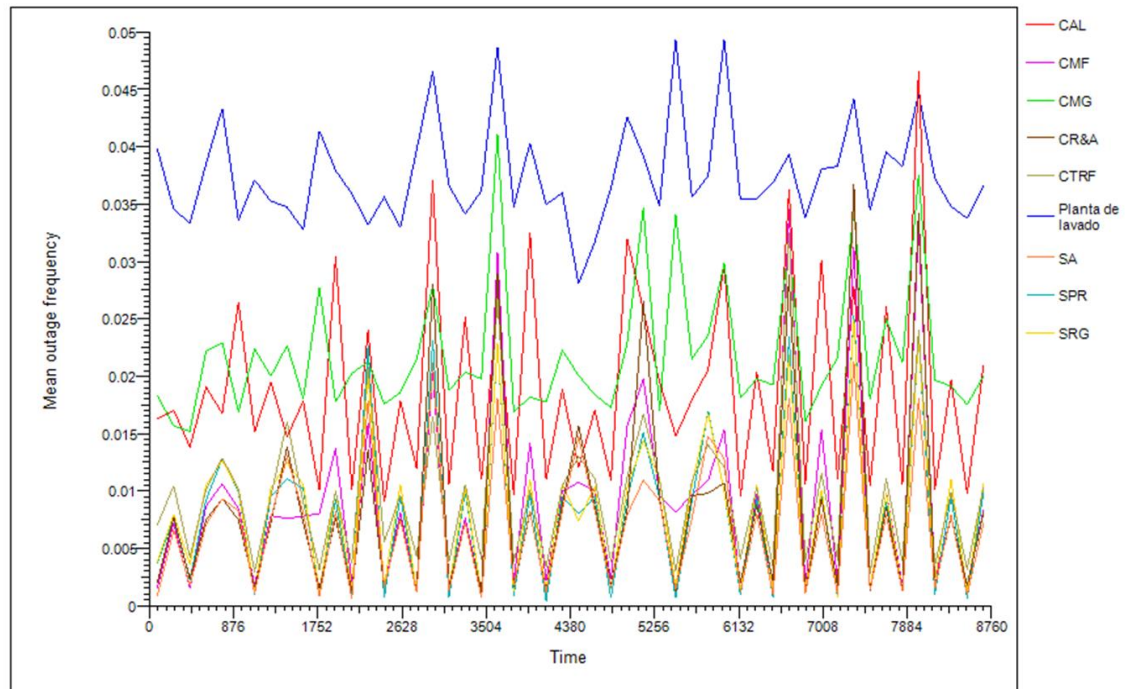


Con lo anterior, se puede concluir que la distribución de tiempos de intervención y las tareas, los repuestos, el talento, y demás parámetros asignados para cada evento permiten obtener cuatro (4) sistemas de alta confiabilidad, igual o mayor al 90%, que son el suministro de agua, el circuito de recuperación y adición de magnetita, el sistema de salida de producto y el de salida de material de rechazo grueso. Por otro lado, los circuitos de menor confiabilidad son el circuito de material grueso (76.8%) y circuito de alimentación (79.6%); que se traducen en una probabilidad de falla para un turno de 12 hora del 23.2% y 20.4% respectivamente.

5.2.1 Análisis General de la PL y sus Circuitos. A partir de la Figura 24 se determina que la probabilidad de falla de la PL, para un turno de 12, es de 37 %; pero la Figura 25 representa la confiabilidad del sistema y sus subsistemas. Esta nos da un comportamiento detallado de la distribución actual de la frecuencia media de falla tanto para la planta, como para sus sistemas. Gracias a esta figura se puede concluir un comportamiento importante a la hora de aumentar la confiabilidad de la PL: aquellos sistemas y circuitos que están sincronizados coincidiendo en su distribución durante el tiempo y con poca diferencia entre los picos de frecuencia, son los de mayor confiabilidad (los que se habían citado con tasa de confiabilidad igual o mayor al 90%. Mientras que los sistemas más desfasados y de

comportamiento menos normalizado son los de mayor tasa de falla, y tiene los mayores picos de frecuencia media de falla además. Estos últimos son el circuito de alimentación (en rojo) y el circuito de material grueso (en verde).

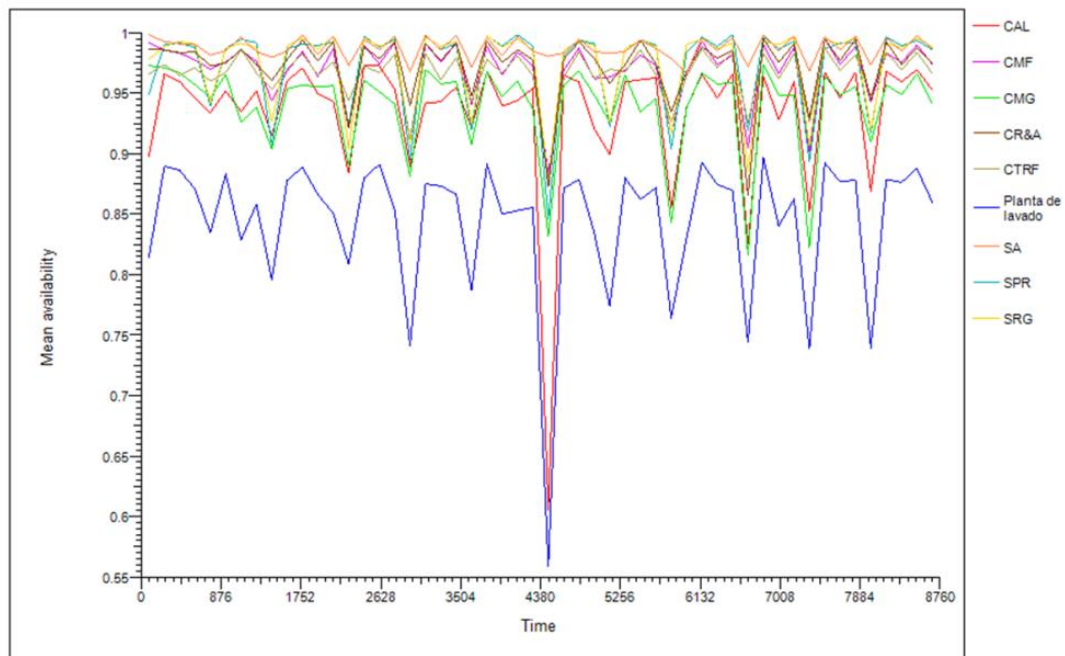
Figura 25. Frecuencia media de falla para la planta y cada circuito.



Cabe mencionar, que la Planta de lavado al ser una combinación de sus diferentes sistemas exhibe un comportamiento en parte sincronizado con la mayor parte de circuitos que conservan una distribución similar en los tiempos de mayor tasa de falla, pero con algunos comportamientos desviados por los circuitos desfasados.

Además de evaluar los resultados y el desempeño de la estrategia mediante los perfiles de confiabilidad de la anterior figura, se puede realizar un análisis del perfil de disponibilidad alcanzada con la estrategia de mantenimiento, mostrado en la figura 26.

Figura 26. Frecuencia media de falla para la planta y cada circuito.

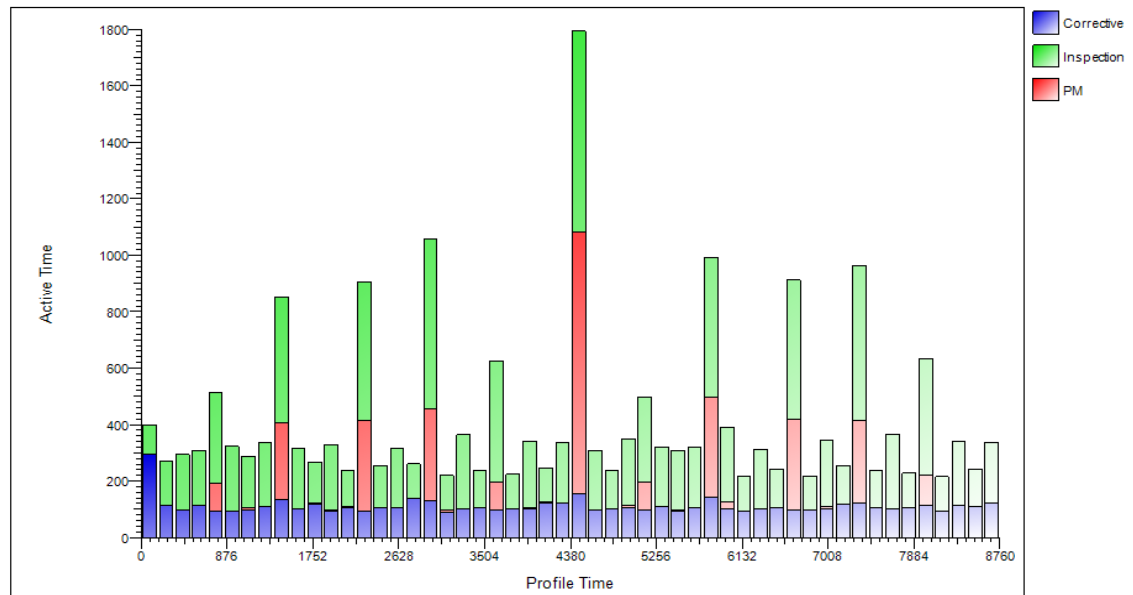


Se observa que la disponibilidad media para la planta está alrededor del 85%. El comportamiento revela que los circuitos de menor disponibilidad son nuevamente el circuito de alimentación y el circuito de material grueso. Cabe resaltar dos puntos, el primero que nuevamente la sincronización del comportamiento de los circuitos en cuanto a su disponibilidad en el tiempo ayuda a alcanzar valores más eficientes de este indicador, y segundo, cuando se da la parada de mitad de año el principal sistema que más influye en esta es el del circuito de alimentación.

El último análisis general contempla la distribución del tiempo de la mano de obra para las diferentes tareas de la estrategia propuesta. La figura 27 muestra que las tareas de inspección son más significativas que las correctivas aunque ambas se desarrollen de forma continua a lo largo del año. Por otro lado, la estrategia de mantenimiento contempla una planeación periódica de las tareas preventivas con consumo de una mayor proporción del tiempo activo que las tareas correctivas pero

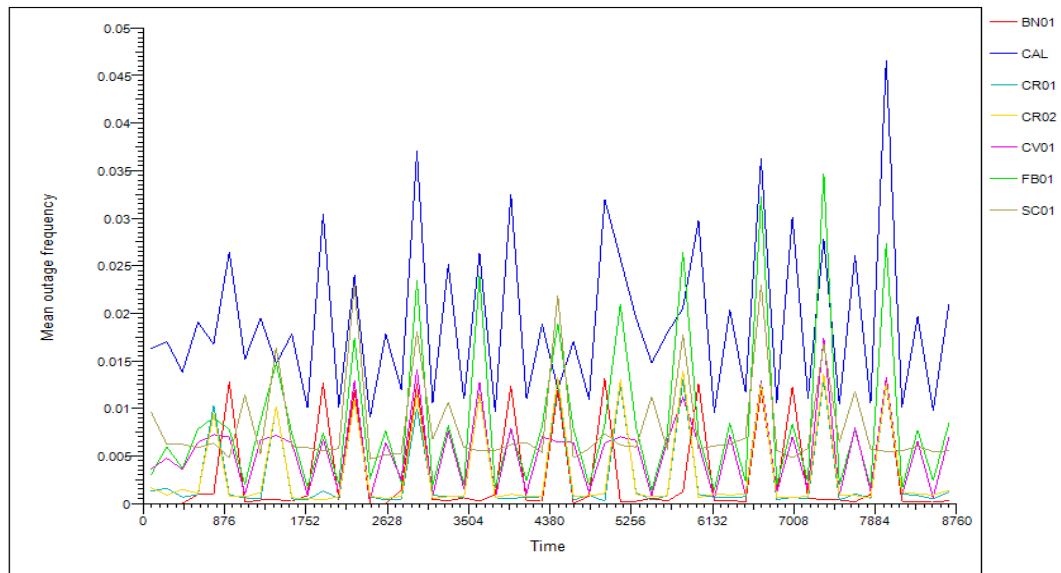
menor a las de inspección (excepto en la mitad del año). La estrategia distribuye estas tareas de forma casi simétrica a la principal parada del año.

Figura 27. Horas hombre por labor, optimizada.



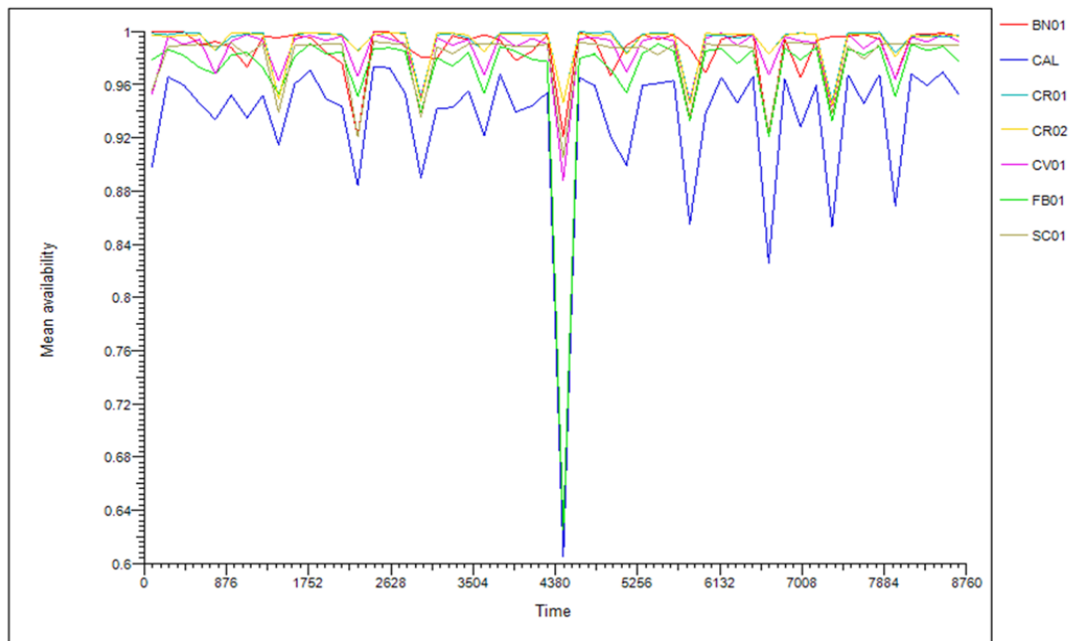
5.2.2 Análisis de los Dos Principales Circuitos Críticos. Para analizar los dos circuitos más críticos se requiere encontrar dentro de sus componentes cuales fueron los MF que más contribuyeron a la baja confiabilidad de los circuitos de alimentación y de material grueso. Para el primero respectivamente, se presentan las Figuras 28 y 29.

Figura 28. Tasas de falla por componente del CA



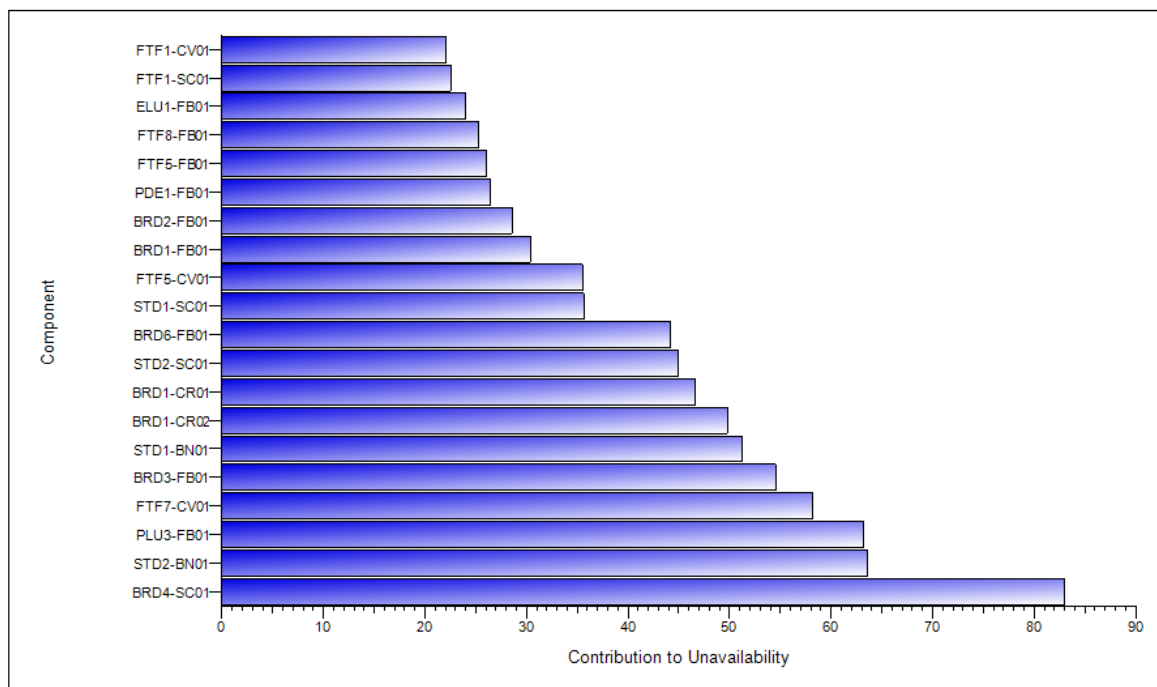
Fuente: Simulación del autor del proyecto en AWB, Isograph.

Figura 29. Disponibilidad por componente del CA



De acuerdo a los análisis previos, tanto por alta tasa media de falla y menores valores de disponibilidad, el componente más crítico es el FB01(feeder breaker). Al estudiar los principales 20 modos de falla para evaluar su relación con el componente crítico que contribuye en la baja disponibilidad y confiabilidad de este circuito se obtuvo los resultados de la figura 30.

Figura 30. Contribución por modo de falla-componente a la indisponibilidad de CA



Si bien se obtiene que el modo de falla de mayor contribución es el BRD4-SC01, el componente SC01 solo tiene 4 modos de falla dentro de los 20 principales, mientras que el componente FB01 posee 9 MF de los 20 graficado, todos estos modos combinados hacen que el feeder breaker sea el componente menos disponible de este circuito.

Para el segundo circuito, el de material grueso, se presentan las Figuras 31 y 32.

Figura 31. Tasas de falla por componente del CMG

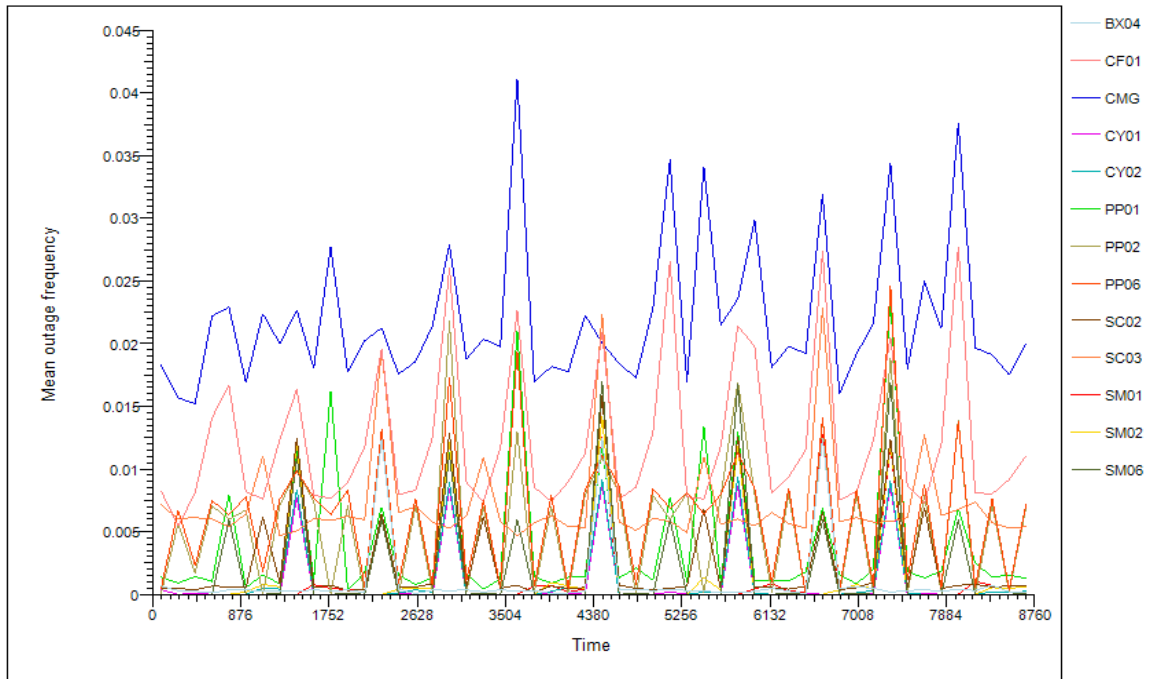
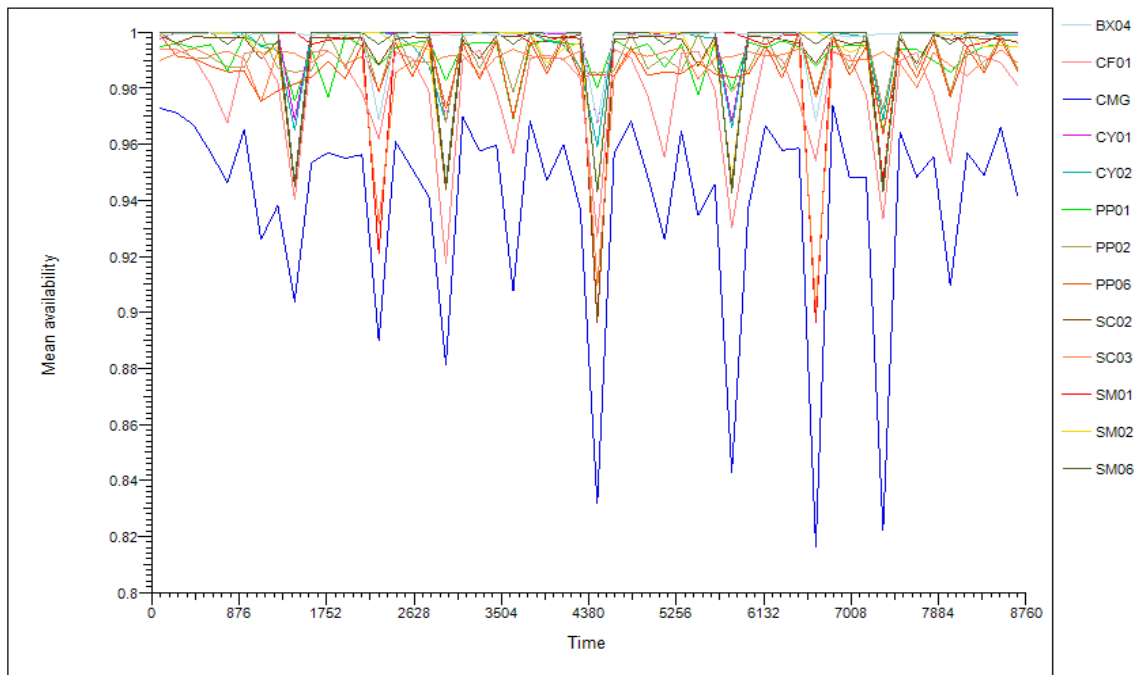
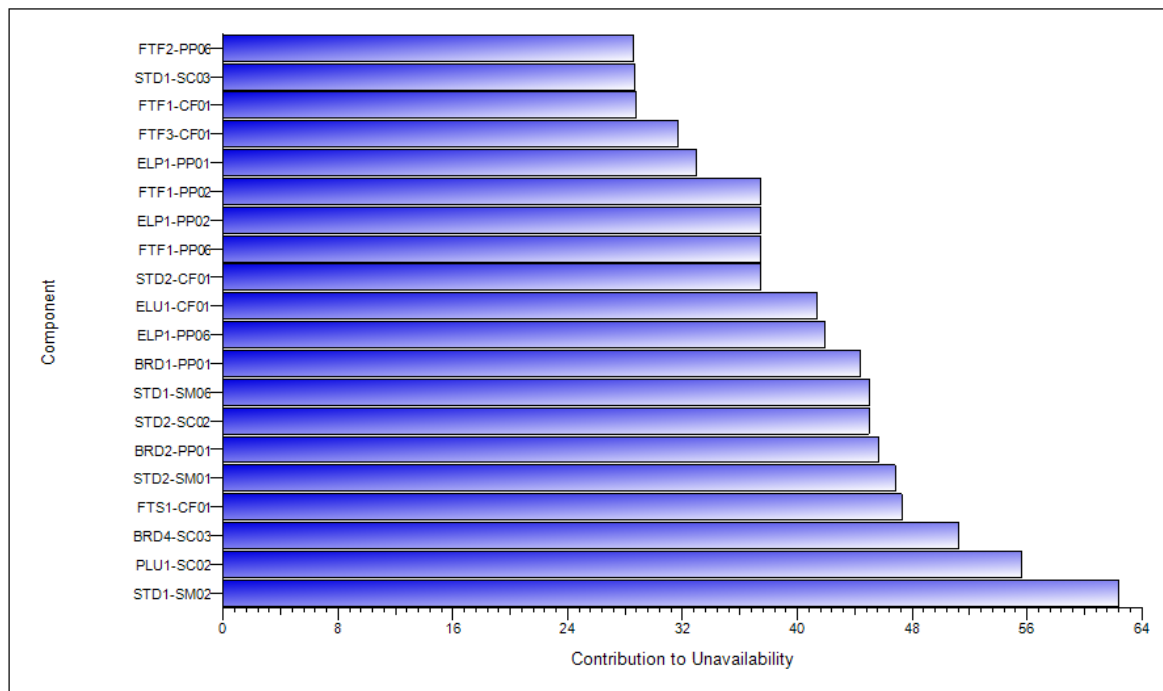


Figura 32. Disponibilidad por componente del CMG



En este caso no se observa un mínimo tan marcado en la indisponibilidad como en el CA, ni picos tan marcados y dominantes en las tendencias de tasa media de falla como en el primer circuito analizado. Sin embargo, existen algunas tendencias dominantes de los componentes CF01 y SC02 que influyen en la baja confiabilidad y disponibilidad del CMG. Al estudiar los principales 20 modos de falla para evaluar su relación con los componentes críticos que contribuyen en el comportamiento del circuito, se obtuvo los resultados de la figura 33.

Figura 33. Contribución por MF-componente a la indisponibilidad de CMG



En este caso, nuevamente se obtiene que un modo de falla independiente es por sí solo el de mayor contribución, el STD1-SM02, sin embargo, el componente CF01 posee 5 modos de falla cuyo acumulado en contribución pone a este componente como el más crítico del circuito, seguido del componente PP01 con tres MF cuyo acumulado supera al del SC02.

5.2.3 Identificación de los MF a Mitigar o Contrarrestar. La tabla 6 permite identificar los aportes de cada MF a la indisponibilidad del sistema general, lo cual permite estudiar procedimientos o tareas para controlar o mitigar las fallas que alteran la indisponibilidad de cada circuito y elevar la disponibilidad general de estos y de la PL.

Tabla 6. Tabla de Contribución General a la Indisponibilidad de la PL

Circuito	EQUIPO2	Descripción Equipo	ID MF	Modo de falla (SAE)	Hrs No Disp.
CAL -Circuito de Alimentación	SC01	TAMIZ DE DESENLODE SC-01	BRD4-SC01	Paneles SC01 rotos/caídos	83
	CF02	CENTRIFUGA DE FINOS (CMG)	STD1-CF02	Canasta CF02 rota	69
CMG- Circuito de Material Grueso	SC04	TAMIZ DE DESHIDRATAMIENTO SC-04	BRD4-SC04	Paneles SC04 rotos/caídos	63
CMF- Circuito de Material Fino	SM02	SUMIDERO #2	STD1-SM02	Estructura del SM02 agrietada/corroida	60
	CV02	BANDA CV-02	FTF5-CV02	Rodamientos de la CV02 desgastados por vida útil	58
SP - Salida de Producto	SC02	TAMIZ DE PRODUCTO SCREEN-02	PLU1-SC02	Duchas del SC02 tapadas	56
SRG - Salida de Rechazo de Grueso	CV05	BANDA CV-05	FTF7-CV05	Rodillos de la CV05 desgastado/destruido por vida útil	56
	PP07A	BOMBA DE TANQUE ESPESADOR PP-07A	ELP1-PP07A	Bomba PP07A con fugas debido por desgaste de sello	55
Circuito de Tratamiento de Rechazo de Fino	CV04	BANDA CV-04	FTF7-CV04	Rodillos de la CV04 desgastado/destruido por vida útil	49
Circuito de Recuperación y Adición de Magnetita	SM03	SUMIDERO #3	STD1-SM03	Estructura del SM03 agrietada/corroida	44
	MS01	SEPARADOR MAGNETICO PRIMARIO MS-01	STD1-MS01	Estructura MS01 agrietada/corroida	43
Suministro de Agua	PP08	BOMBA DEL TANQUE DEL AGUA CLARA PP-08	ELP1-PP08	Bomba PP08 con fugas debido por desgaste de sello	37

Este análisis a diferencia del anterior se hace para estudiar los MF en todo el sistema ubicándolos por circuitos, y no los componentes críticos de un circuito. Esto permite estudiar estrategias para mejorar la disponibilidad de cada circuito al combatir su falla más propensa.

En el caso de la frecuencia de falla, esta se puede reducir en cada circuito de la manera análoga, estableciendo controles en las fallas más críticas que incrementan la frecuencia de falla. La tabla 7 presenta las fallas a controlar o mitigar.

Tabla 7. Tabla de Contribución General a la Frecuencia de Falla de la PL

Circuito	EQUIPO2	Descripción Equipo	ID MF	Modo de falla (SAE)	No Ocurrencia.
CMG- Circuito de Material Grueso	SC02	TAMIZ DE PRODUCTO SCREEN-02	PLU1-SC02	Duchas del SC02 tapadas	64
CMG- Circuito de Material Grueso	CF01	CENTRIFUGA DE GRUESO CF-01	STD2-CF01	Amortiguadores CF01 cristalizados/rotos	52
CMF- Circuito de Material Fino	SC04	TAMIZ DE DESHIDRATAMIENTO SC-04	BRD4-SC04	Paneles SC04 rotos/caídos	50
CAL -Circuito de Alimentación	SC01	TAMIZ DE DESENLÓDE SC-01	BRD4-SC01	Paneles SC01 rotos/caídos	49
CMG- Circuito de Material Grueso	SC03	TAMIZ DE RECHAZO SC-03	BRD4-SC03	Paneles SC03 rotos/caídos	48
Circuito de Tratamiento de Rechazo de Fino	PP07A	BOMBA DE TANQUE ESPESADOR PP-07A	ELP1-PP07A	Bomba PP07A con fugas debido por desgaste de sello	33
CAL -Circuito de Alimentación	FB01	ALIMENTADOR PICADOR FB-01	BRD2-FB01	Ruptura de Acople flexible FB01	32
CMF- Circuito de Material Fino	CF02	CENTRIFUGA DE FINOS (CMG)	STD1-CF02	Canasta CF02 rota	31
Circuito de Tratamiento de Rechazo de Fino	PP07B	BOMBA DE TANQUE ESPESADOR PP-07B	ELP1-PP07B	Bomba PP07B con fugas debido por desgaste de sello	27

En resumen, una estrategia efectiva y confiable debe lograr la mayor coordinación de los sistemas individuales; optimizando las paradas de la planta para las diversas tareas de mantenimiento y coordinando tareas preventivas solo en momentos que permitan mitigar fallas críticas. De acuerdo al modelamiento desarrollado, se pueden enfocar esfuerzos en las oportunidad de mejora como la reducción de la repetitividad de una tasa de falla, mediante RCA-Análisis de causa raíz, por ejemplo.

En el caso de los MF que influyen en la indisponibilidad mayor, se proponen análisis de los tiempos de respuesta, “demoras”, ya sea por repuesto (repuestos críticos) o por recurso humano. El modelamiento nos abre toda una ventana para enfocar estrategias y toma decisiones en pro de la confiabilidad, mantenibilidad y confiabilidad. Los entregables directos más importantes del modelamientos RAM son los siguientes:

- RCM : estrategia de mantenimiento
- FMEA /FMECA: análisis de modos de falla, efectos y criticidad.
- Listado de repuestos críticos- Predicción de repuesto de acuerdo a la simulación.
- Predicción de costo de Recurso Humano, min-max personal necesario.
- Modelamiento RAM de la estrategia de mantenimiento.

6. CONCLUSIONES

El modelamiento RAM posee actualmente una disponibilidad de aproximadamente 85%. Este modelo permite establecer esquemas de tiempos de intervención eficientes. El estudio de las curvas de probabilidad de falla de los MF detectados por el RCM, parte del criterio de que aquellas con betas inferiores a 1, poseen una probabilidad de falla creciente con cada intervención de alta frecuencia. Mientras que las curvas con betas superiores a 1, da cabida al incremento de la frecuencia de intervención en pro de la disponibilidad y contemplando los costos.

Adicionalmente, el modelamiento RAM, cimienta líneas base con amplios márgenes de mejora en la planeación del mantenimiento. Una de las fronteras de mejora es la detección de las fallas y su relacionamiento con el correspondiente MF para que se cree un registro confiable y estandarizado de acuerdo al RCM. A mayor base de datos adecuadamente registrados, mayor será la precisión en la generación de las curvas de probabilidad del método Weibull, reduciendo la proporción de datos analizados mediante Weibayes.

El objetivo principal del modelamiento, es evitar a toda costa una falla de un componente, entendiendo su naturaleza y probabilidad de falla. Con ello se busca llevar al equipo a su máxima vida útil, siendo confiable, e implementando tareas programadas para los cambios de componentes, apoyándose en la curva de probabilidad de falla. Con esto se busca también evitar fallas correctivas que representen altos costos de intervención.

Actualmente, se llevan a cabo mantenimientos programados semanalmente de tipo preventivo, donde se aplican inspecciones, solo se genera una mejora de la condición de operación del equipo y posiblemente una reducción de la velocidad de

desgaste de algunas o todas sus piezas, pero estas seguirán trabajando hasta fallar. En base a ello, se genera la presente propuesta de mejora en donde se evalúa la periodicidad actual de las tareas preventivas, y se blindó la operación con una garantía adicional y es la incorporación de cambios programados y tareas predictivas, de acuerdo a las tasas de fallas halladas en el modelo simulado.

Cabe mencionar, que la estrategia de mantenimiento se basa en la combinación de las tareas predictivas de inspección, las correctivas y las de mantenimiento preventivo contemplando el comportamiento del modo de falla de acuerdo a los sets de probabilidad incorporados y los efectos y criticidad relacionadas al MF durante la operación de la PL. La efectividad de esta estrategia radica en el cumplimiento de las periodicidades y calidades de las tareas definidas en la optimización del modelo.

Otro aspecto a resaltar, es que una pieza importante de la estrategia es el pico de mantenimiento preventivo, una ventana de mantenimiento a los 6 meses de operación con duración de hasta 5 días para dejar a punto óptimo todo el sistema, este tiempo se puede tomar como una oportunidad de negocio, de rediseñar o mejorar los diferentes circuitos de la cadena.

Finalmente, el proyecto permitió hallar una simulación eficiente de una estrategia RCM-RAM-RBD que cumple con las horas operativas, los indicadores planeados y muchas exigencias operacionales como la determinación de las periodicidades de las tareas de mantenimiento. Con ello, se tiene confianza en que el modelo responde al reto de los nuevos años y el cambio del contexto operacional que ha potenciado la importancia de la Planta de Lavado en la producción de carbones de calidad que suplan las necesidades del mercado actual y para años venideros.

7. RECOMENDACIONES

Implementar en los registros para reportes por DOWN la identificación de fallas dentro de los modos de fallas detectados por el RCM, de manera que exista una alimentación de las frecuencias de fallas de los modos, y a la vez, como línea base para la mejora de la data y calidad de información.

La presencia de ruido en la data depurada en principio, para detectar modos de falla, llevó a tiempos estimados muy elevados; las gráficas eran no concluyentes dentro de un análisis de operatividad. Tras un análisis profundo de los datos, se halló que la proporción de datos preventivos era muy superior a los datos correctivos y estos afectaban las curvas de probabilidad de falla por lo que se retiraron del análisis de curva de falla.

Por último, se recomienda la elaboración de un Análisis de Causa Raíz –RCA - para identificar la razón de repetitividad de los Modos de Falla de alta tasa de probabilidad de incidencia y altas consecuencias de indisponibilidad (por ejemplo, la caída de paneles en los *screens*). Con ello, se pueden generar oportunidades de mejora que podría relacionarse a la disposición de recurso, la configuración o diseño del equipo o incluso en los procedimientos de mantenimiento aplicados al mismo.

BIBLIOGRAFÍA

ABENETHY, R. B.; BRENNEMAN, J. E.; MEDLIN, C. H.; REINMAN, G. L. *Weibull Analysis Handbook*. Florida, EE.UU.: Pratt & Whitney Aircraft, 1983.

AREMAS. Presentación sobre el RCMCost, AvSim y Weibull e integración con SAP. 2011, p. 5. [Revisado el 25 de noviembre de 2018]. 64 pp.

CERREJÓN, Minería Responsable [En línea]. Página Web. 2017. Revisado el 2 de diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.cerrejon.com/index.php/nuestra-operacion/nuestra-empresa/>

CERREJÓN. Manual de Operación: Planta de Lavado. Código: MA-MDC-PC-0001. 2009, p.6-12. 40 pp.

CERREJÓN. Refresco en Operación Planta de Lavado. Presentación. 2016, p.2. 127 pp.

DU, Junrong. Evaluation Of Equipment Reliability, Availability And Maintainability In An Oil Sands Processing Plant. University of British Columbia. Vancouver: April, 2008.

ISOGRAPH LIMITED. Guía del Usuario: Availability Workbench 2007, Simulación del Sistema Integrado de Mantenimiento Enfocado en la Confiabilidad según el Análisis Weibull del Costo del Ciclo de Vida. 2007, p.9. Versión en español, traducido por: GSAPGROUP- [Revisado el 25 de noviembre de 2018]. 333p.

KELLY, A. & HARRIS, M.J. Gestión del mantenimiento industrial. Fundación Repsol, YPF, 1998.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. Manual de Confiabilidade, Manutenabilidade e Disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2001.

MEJÍA, Lina. Cifras históricas para Cerrejón. Agencia Nacional de Minería [en línea]. Revisado el 2 de diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.anm.gov.co/?q=Cifras-historicas-para-Cerrejon>

MONCHY, François. A Função Manutenção. Editora Brasileira/Editora Duran, 1989.
MORA GUTIERREZ, Luis A. Mantenimiento Industrial Efectivo. Medellín: Coldi Limitada, 2009.

MORA GUTIERREZ, Luis A. Norma SAE JA1011. Medellín: Coldi imitada, 2003.

MOUBRAY, John. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad RCM II. Reino Unido: Aladon Ltd, 2004

NAKAJIMA, Seiichi N. S. Introducción al TPM Programa para el Desarrollo. Fundación REPSOL. España: Cambridge, Productivity Press, D.L. 1991.

NASERI, Masoud. *RAM Analysis of Oil and Gas Production Facilities Operating in the Arctic Offshore*. Universidad del Ártico de Noruega, 2016.

NORMA SAE: JA1011. Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. 1999, p. 4. [Revisado el 5 de diciembre de 2018]. 12 pp.

NORMA SAE: JA1012. Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). 2002, p. 14. [Revisado el 5 de diciembre de 2018]. 62 pp.

ORTIZ, Daniel. Curso: Mantenimiento Centrado en Confiabilidad. Bogotá D.C.: Ortiz Ruiz Consultores S.A.S, 2014.

PHAM, Hoang. *Handbook of Reliability Engineering*. Springer. Springer Ed, 2003.

PUPO MALABET, Iván Enrique. Estrategias de Mantenimiento y Operación en Línea de Trituración y Apilamiento Cerro Matoso S.A. Montelíbano – Colombia, desde el Análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad Alcanzada. Universidad EAFIT. Medellín, 2014.

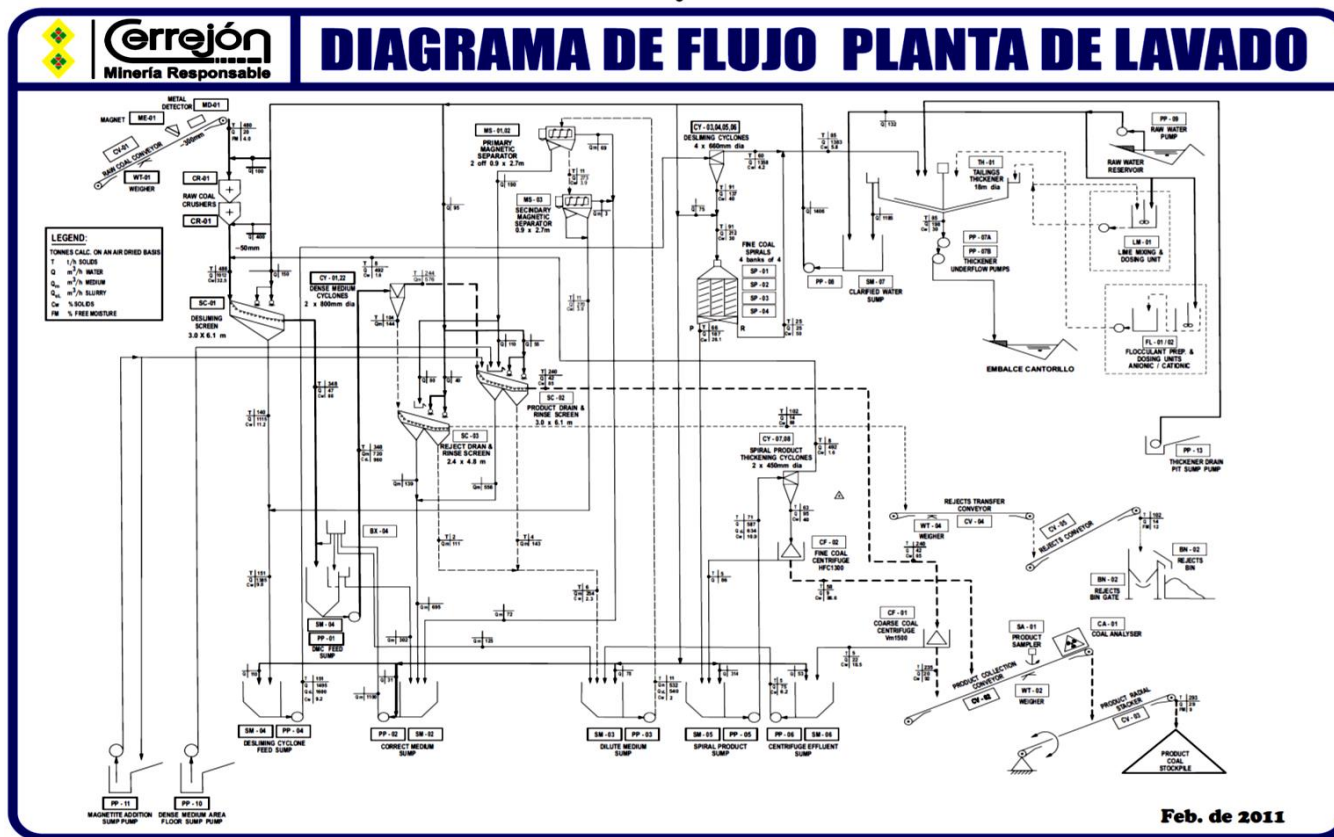
SALAZAR M., Raquel; ROJANO A., Abraham; FIGUEROA H., Esther y PÉREZ S., Francisco. Aplicaciones de la Distribución Weibull en Ingeniería de Confiabilidad. Colmeme UAN, 2013.

UPARELA SAAD, Juan M. Medición Estratégica CMD en el Sistema de Vapor de una Planta Química en el Departamento del Atlántico. Universidad EAFIT. Medellín, 2013.

ZEGARRA, Manuel. Indicadores para la Gestión del Mantenimiento de Equipos Pesados. En: Ciencia y Desarrollo. Universidad Alas Peruanas. Volumen 19 (1): 25-37. Enero-junio 2016, p.32.

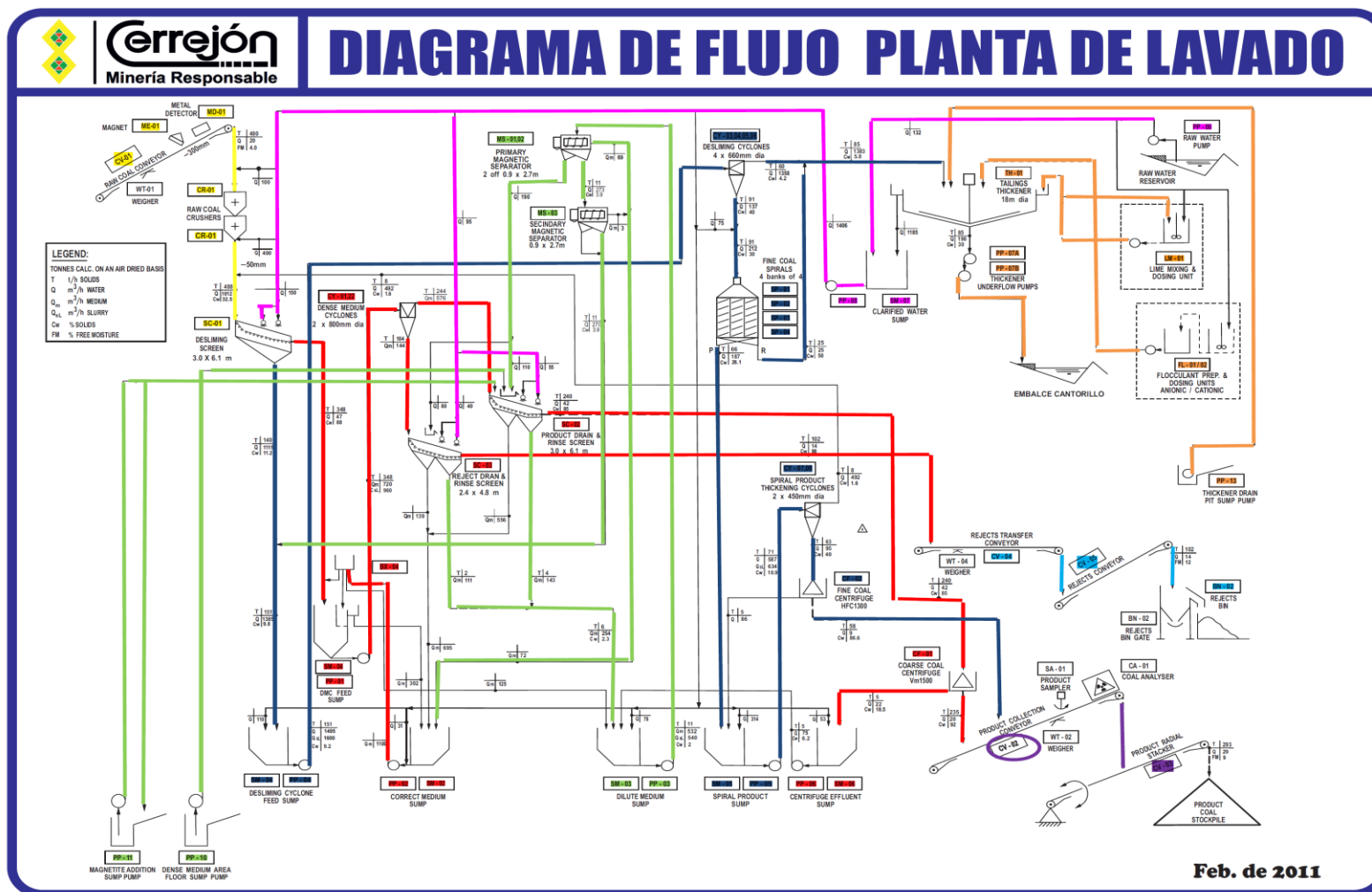
ANEXOS

Anexo A. Diagrama de Flujo Planta de Lavado



Fuente: Carbones Del Cerrejon Limited. Derechos reservados.

Anexo B. Identificación de Fronteras Planta de Lavado



Fuente: Carbones Del Cerrejon Limited. Derechos reservados.