

PLANTEAMIENTO DEL RCM DE LA SECCIÓN DE POTENCIA DEL  
CAMIÓN MINERO HITACHI EH4000- AC2 DE UNA EMPRESA MINERA

MARIO ENRIQUE PINTO SOLANO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROGRAMA ACADÉMICO ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA EN  
MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2025

PLANTEAMIENTO DEL RCM DE LA SECCIÓN DE POTENCIA DEL  
CAMIÓN MINERO HITACHI EH4000- AC2 DE UNA EMPRESA MINERA

MARIO ENRIQUE PINTO SOLANO

Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Gerencia de  
Mantenimiento Cohorte XIV Barranquilla

Director

Carlos Borrás P.  
PhD., MSc., Spc Mto.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROGRAMA ACADÉMICO ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA EN  
MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2025

## DEDICATORIA

Sin lugar a dudas le dedico esta monografía y todo el camino recorrido para este fin a mi familia mi esposa Irlena, mi hija mayor Emma, mi angelito Alma y el bebé más consentido Thomas todo sacrificio y logros es por ellos y para ellos, a mi hermana Andrea y mi compadre Juan Carlos por su desinteresado apoyo en las jornadas de estudio. A mi papá y mi mamá un abrazo hasta el cielo todo lo que soy es por ellos, su recuerdo siempre.

## **AGRADECIMIENTOS**

En especial a Ivan Dario mi jefe quien me ha abierto las puertas y me ha brindado las herramientas, el conocimiento y el apoyo para seguir creciendo como persona.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	12
ANTECEDENTES.....	13
1. OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
3. HIPOTESIS.....	19
4. GLOSARIO .....	20
5. DOCUMENTOS DE REFERENCIA.....	21
6. METODOLOGÍA.....	22
6.1 TAXONOMÍA .....	22
6.2 ANÁLISIS DE FUNCIONES Y FALLAS FUNCIONALES.....	22
6.3 MODOS DE FALLA .....	23
6.4 CÁLCULO DE TIEMPO MEDIO ENTRE FALLA MTBF .....	23
6.5 TAREAS CORRECTIVAS.....	23
6.6 TAREAS PREVENTIVAS .....	24
6.7 RBD DIAGRAMA RED DE BLOQUES .....	24
6.8 SIMULACIONES.....	25
6.8.1 Herramienta para el Modelamiento .....	26
6.8.2 ISOGRAPH AWB (Availability Workbench).....	26
6.9 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	27
7. DESARROLLO DEL RCM SISTEMA DE POTENCIA CAMIÓN MINERO EH4000-AC2.....	29
7.1 TAXONOMÍA .....	29

7.2	FUNCIONES.....	30
7.3	MODOS DE FALLA .....	32
7.4	TAREAS CORRECTIVAS .....	34
7.5	TAREAS PREVENTIVAS .....	37
7.6	RBD .....	39
7.6.1	RBD Sistemas.....	39
7.6.2	RBD subsistemas.....	39
7.6.3	RBD modos de falla .....	40
7.6.4	Simulación.....	40
8.	RESULTADO DEL RCM.....	41
9.	CONCLUSIONES .....	46

## Lista de tablas

Tabla 1, Codificación estándar tareas preventivas .....	24
Tabla 2, Plantilla de Microsoft Excel ejemplo de taxonomía .....	29
Tabla 3, Estructura de funciones y Fallas funcionales .....	31
Tabla 4, Modos de falla bomba de combustible.....	33
Tabla 5, Tareas correctivas bomba de combustible.....	35
Tabla 6, Descripción tareas preventivas .....	38

## Lista de figuras

Figura 1, Esquema de funcionamiento del programa Availability Workbench. ....	27
Figura 2, Certificación SAP .....	27
Figura 3, Taxonomía del equipo EH-4000 en el Software Isograph.....	30
Figura 4, Vista de Isograph evidenciando Función y Falla Funcional .....	32
Figura 5, Modos de falla en el módulo RCMCost del Alternador Principal.....	33
Figura 6, Ventana de propiedades de modos de falla.....	34
Figura 7, Pestaña Maintenance .....	36
Figura 8, Propiedades tareas correctiva .....	36
Figura 9, Propiedades tareas preventiva Isograph .....	38
Figura 10, Módulo AVSim RBD.....	39
Figura 11, Sistema de potencia .....	40
Figura 12, Sistema de propulsión .....	40
Figura 13, Modos de falla en RBD .....	40
Figura 14, Opciones de proyecto .....	41
Figura 15, Costos de talento humano .....	42
Figura 16, Ocupación del Talento Humano .....	42
Figura 17, Ocurrencia de los modo de falla .....	43
Figura 18, Disponibilidad a 1 año o 7200 horas.....	43
Figura 19, Disponibilidad para tiempo operacional de 3 años o 21600 horas.....	44
Figura 20, Disponibilidad a 5 años o 36000 horas .....	44
Figura 21, Disponibilidad del Sistema de Potencia 98%.....	44
Figura 22, Disponibilidad Sistema de Propulsión 98,6%.....	45

## LISTA DE APÉNDICES

Anexo A RCM EH-4000 ACII

Anexo B RCM EH-4000 ACII archivo AWB

Anexo C Horas hombre por tiempo operacional

Anexo D AMEF

Plantilla\_Monografía (Presentación Monografía)

## RESUMEN

Título: PLANTEAMIENTO DEL RCM DE LA SECCIÓN DE POTENCIA DEL CAMIÓN MINERO HITACHI EH4000- AC2

Autor: Ingeniero Mario Enrique Pinto Solano

Palabras claves: RCM, confiabilidad, disponibilidad, componente, parte, MTBF, falla, frecuencia.

Descripción: En el proceso de incorporación de una flota de equipos nuevo a la compañía, se busca siempre estar preparados para cualquier novedad que se puede presentar desde el día 1, por lo que el siguiente análisis de RCM del sistema de potencia del camión eléctrico minero de la marca Hitachi con capacidad de carga de 240 Toneladas, busca contribuir en el análisis y la implementación de las estrategias que desde el departamento de confiabilidad de la compañía aporta a los departamentos de producción y mantenimiento.

El análisis RCM desagrega el sistema en subsistemas y a su vez en componentes, bajando en casos un nivel más en la jerarquía con el objetivo claro de identificar las partes mantenibles y sus posibles fallas a lo largo de la vida del equipo, y aplicar una estrategia de mantenimiento enfocado en evitar o controlar las paradas por imprevistos que generen retrasos en la operación y afecten los indicadores de disponibilidad, que son la métrica por la que se mide la gestión del equipo de mantenimiento en la compañía.

La compañía cuenta con un equipo robusto de personal especializado en diferentes áreas, como el caso del personal de laboratorio y de inspección estructural de los equipos, el RCM busca integrarlos dentro de cada metodología indicando una frecuencia de tarea y asignando los tiempos de ejecución, en el caso de laboratorio se tomarán muestra de los aceites y fluidos necesarios para el funcionamiento del equipo y que dan bases para el análisis de desgaste interno y estado de degradación del fluido.

En la implementación del software especializado, se busca simular la vida del equipo, y calcular las horas de mantenimiento necesaria, los costos, dar un indicador de disponibilidad por el tiempo operacional que servirá como objetivo a lograr en la vida real del equipo.

## ABSTRACT

Title: RCM APPROACH FOR THE POWER SECTION OF THE MINING TRUCK HITACHI EH4000 AC2

Author: Mario Enrique Pinto Solano

Key Words: RCM, reliability, availability, component, part, MTBF, failure, frequency

Description: In the process of incorporating a new fleet of equipment to the company, we always seek to be prepared for any new development that may occur from day 1, so the following RCM analysis of the power system of the Hitachi electric mining truck with a load capacity of 240 tons, seeks to contribute to the analysis and implementation of strategies that the reliability department of the company contributes to the production and maintenance departments.

The RCM analysis disaggregates the system into subsystems and in turn into components, in some cases going down one more level in the hierarchy with the clear objective of identifying the maintainable parts and their possible failures throughout the life of the equipment, and applying a maintenance strategy focused on avoiding or controlling shutdowns due to unforeseen events that generate delays in the operation and affect the availability indicators, which are the metric by which the management of the maintenance team is measured in the company.

The company has a robust team of specialized personnel in different areas, such as laboratory personnel and structural inspection of equipment, the RCM seeks to integrate them into each methodology indicating a task frequency and assigning execution times, in the case of laboratory samples of oils and fluids necessary for the operation of the equipment and that provide the basis for the analysis of internal wear and condition of the same fluid will be taken.

In the implementation of the specialized software, the aim is to simulate the life of the equipment, and calculate the necessary maintenance hours, costs, and give an indicator of availability for the operational time that will serve as an objective to be achieved in the real life of the equipment.

## INTRODUCCIÓN

Una empresa multinacional de minería, que se encuentra ubicada en el norte del país se encuentra en la ejecución del proyecto de la adquisición y puesta en marcha de una flota de camiones mineros de 240 toneladas de capacidad Hitachi EH4000 AC2. Estos equipos pertenecientes a la flota de camiones eléctricos, poseen un motor Diesel de la marca Cummins, acoplado a un alternador principal que funciona como un generador eléctrico, alimentando dos motores eléctricos denominados de tracción situados uno en cada rueda trasera.

En este mismo sentido, la siguiente monografía describe el proceso llevado a cabo para desarrollar un estudio de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) enfocado en la sección de potencia del camión eléctrico minero Hitachi. Dicho estudio servirá como base para establecer el plan de mantenimiento integral definido como estrategia, que combine tareas correctivas, preventivas, y de inspección; los procedimientos y las tácticas, alineadas a los estándares de mantenimiento de la multinacional carbonífera, y se espera como resultado las herramientas para la toma de decisiones en programación, planeación, ejecución y abastecimiento de recursos propios del mantenimiento, así también un indicador de disponibilidad para la flota.

El alcance del estudio RCM se limita específicamente a los componentes clave que conforman la sección de potencia del camión Hitachi EH4000 AC2: el motor diésel, el alternador principal y los motores eléctricos de tracción. Este enfoque permitirá plasmar los indicadores de disponibilidad, confiabilidad y el desempeño esperados de este sistema crítico para la operación eficiente de la flota de equipos.

## ANTECEDENTES

El RCM<sup>1</sup> es un proceso altamente personalizado con un enfoque único para cada activo adaptado a su uso, componentes clave y amenazas únicas a su usabilidad. El objetivo final es maximizar la disponibilidad del equipo y al mismo tiempo reducir la necesidad de reemplazar activos, reduciendo así los costos. Se diferencia de otros procedimientos de mantenimiento por el hecho de que trata cada activo de manera diferente, según sus necesidades específicas, su importancia para el proceso general y cómo debe monitorearse y mantenerse.

¿De dónde viene el RCM? Antes de que la especialización y la cadena de suministro global separaran a los constructores de equipos de sus usuarios finales, quienes construían activos físicos eran a menudo quienes los utilizaban, por lo que tenían un conocimiento innato de sus partes inherentes. A medida que aumentó la especialización y los constructores de productos ya no eran los usuarios finales, los clientes de activos físicos necesitaron una metodología más completa y estratégica para comprender y abordar las partes de su maquinaria.

Esto ha sido especialmente cierto y crítico para la industria de la aviación, que se considera comúnmente el lugar de nacimiento del RCM. A medida que se aceleraba la tasa de accidentes aéreos en la década de 1960, la industria tuvo que cambiar su forma de gestionar el mantenimiento, que no se realizaba con la frecuencia suficiente para evitar esos accidentes catastróficos. La industria necesitaba ayuda para identificar posibles fallos y tuvo que cambiar su enfoque. El mantenimiento basado en el tiempo, según el cual las intervenciones ocurrían en un lapso específico, ya no funcionaba. Algunos estudios demostraron que dedicar menos tiempo y costos al mantenimiento, pero manejarlo de manera más estratégica producía mejores resultados, lo que sugería que un enfoque más eficiente era posible.

De hecho, el nombre de mantenimiento centrado en la confiabilidad proviene de un informe de Nolan y Heap de 1978 para United Airlines, que buscó codificar el nuevo proceso para garantizar una mejor seguridad aérea a través de un nuevo enfoque para el mantenimiento de equipos. El impacto de este informe ha sido tan duradero que prácticamente cada enfoque de RCM evoca la norma JA1011 de la Sociedad de Ingenieros Automotrices, creada a partir del informe de Nolan y Heap.

---

<sup>1</sup> Artículo ¿Qué es el mantenimiento centrado en la confiabilidad? IBM México <https://www.ibm.com/mx-es/topics/reliability-centered-maintenance>

Ahora, el RCM se ha extendido a casi todas las industrias como una forma inteligente y rentable de ejecutar el mantenimiento durante el proceso de fabricación.

El análisis RAM<sup>2</sup> es el principal pilar de la Ingeniería de Mantenimiento y sus indicadores nos permiten prolongar la vida útil de los equipos, prevenir fallos y reducir los costos de mantenimiento, mejorando la productividad, las ganancias y la competitividad de la empresa.

RAM son las siglas en inglés de Reliability (Confiabilidad), Availability (Disponibilidad) e Maintainability (Mantenibilidad)

Básicamente los objetivos del análisis RAM son reducir los costos de mantenimiento y operación, mejorar la productividad y como consecuencia aumentar las ganancias de la organización. El análisis RAM evalúa el desempeño del sistema por medio de la medición del número de fallos de los activos, mide también el tiempo entre estos fallos, el tiempo de reparación, entre otras medidas.

### **Confiabilidad**

La primera letra del análisis RAM (Reliability) representa la probabilidad de que la máquina realice su función. Esta es especificada por el proyecto y en las condiciones de funcionamiento durante un periodo de tiempo determinado. Y esta probabilidad, que tiene en cuenta los fallos que ya se han producido, indica al responsable de mantenimiento hasta qué punto puede confiar en ese equipo.

### **Disponibilidad**

La disponibilidad se refiere a eventos del pasado y al tiempo que el equipo ha estado disponible para realizar sus funciones especificadas. Es decir, es la capacidad de un equipo para desempeñar la función que se le ha asignado durante un periodo de tiempo determinado. Al calcular la disponibilidad, comparamos el número de horas que la máquina ha estado disponible con el número de horas de trabajo previstas. Este cálculo se basa en dos indicadores importantes:

MTBF (tiempo medio entre fallos), usado para medir la fiabilidad de una máquina.

MTTR (Mean Time To Repair), que analiza el tiempo medio que tarda el equipo en reparar la máquina.

---

<sup>2</sup> Análisis RAM: El manual completo 2025 <https://traction.com/es/blog/analisis-ram-el-manual-completo-2021-2> Alex Vedan

## **Mantenibilidad**

La mantenibilidad se refiere a la facilidad con la que podemos reparar la máquina y devolverla a su funcionamiento normal después de un fallo. En el análisis RAM, la mantenibilidad se centra en eliminar obstáculos y dificultades en el trabajo de los técnicos y mantener el buen funcionamiento de la máquina. Porque, lógicamente, entre más difícil sea reparar el equipo, menor será la mantenibilidad. El desenlace, será mayores costes de mantenimiento y mayores impactos en la productividad de la empresa. Una gran diferencia respecto a los otros componentes del análisis RAM (confiabilidad y disponibilidad), la mantenibilidad no es del todo cuantificable. Por tal motivo, requiere una evaluación más humana que tenga en cuenta, además de los costes, algunos aspectos críticos para el trabajo del equipo de mantenimiento.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar el estudio de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) de la sección de potencia del camión eléctrico Hitachi EH-4000 AC 2.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

- Identificar el árbol de equipo o jerarquía que conforma el sistema de potencia de los camiones Hitachi EH-4000 AC 2.
- Determinar las funciones y las fallas funcionales de cada uno de los componentes.
- Establecer los modos de falla potenciales, así como la causa de la falla, para las partes mantenibles identificadas.
- Calcular y asignar los tiempos medios entre fallas (MTBF) asociados a los diferentes modos de falla.
- Asignar tareas correctivas, preventivas y predictivas, a los modos de falla identificados.
- Realizar simulaciones y proyecciones de disponibilidad operacional de la sección de potencia de los camiones eléctricos Hitachi a tiempos operacionales de 1, 3 y 5 años.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una empresa minera con operaciones en la región Caribe del país se encuentra en el proceso de incorporar una nueva flota de camiones mineros para el transporte de material proveniente de las actividades de extracción de carbón. Con el fin de asegurar la disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de estos equipos a lo largo de la vida útil proyectada, el departamento de Confiabilidad ha determinado realizar un estudio de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad RCM.

El estudio RCM, tendrá como foco principal el sistema de potencia y el sistema de propulsión de un camión eléctrico de la marca Hitachi referencia EH-4000 AC 2 que serán incorporados en la operación, el sistema de potencia se encuentra conformado por los siguientes subsistemas.

- Motor diésel de la marca CUMMINS.
- Subsistema de enfriamiento.
- Subsistema de combustible.
- Subsistema de lubricación.
- Subsistema de admisión y escape.
- Subsistema eléctrico y de control.

El sistema de propulsión compuesto por:

- Alternador principal acoplado al eje de salida del motor diésel que genera corriente alterna.
- Gabinete de control AC.
- Control de tracción.
- Grid boxes
- Ruedas motorizadas, conformado por los motores eléctricos y accesorios ubicados en la parte trasera del camión, encargados de generar el par de tracción.

El estudio RCM buscará establecer las estrategias, tareas, protocolos y recursos necesarios para el plan de mantenimiento de esta flota de camiones a lo largo de 1, 3 y 5 años de operaciones, con el fin de garantizar el cumplimiento de los estándares de seguridad y operación definidas por la empresa.

Es importante destacar que los camiones Hitachi EH-4000 AC 2 no son equipos nuevos de fábrica, sino que han sido adquiridos de otra operación minera de la región. Pero las condiciones operativas a las que se enfrentarán dentro de esta mina están contempladas como más severas por los largos trayectos que deben recorrer dentro de la operación. De ahí la necesidad de realizar este estudio RCM exhaustivo, que permita cubrir todas las necesidades asociadas al mantenimiento, estableciendo un plan de mantenimiento integral para estos equipos.

### 3. HIPOTESIS

El desarrollo de una estrategia de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) propuesta para el Camión minero, busca de manera concisa brindar herramientas a los analistas y planeadores de mantenimiento en aras de la implementación de un sistema de gestión basado en la agrupación de tareas de mantenimiento preventivo y análisis predictivo, sin dejar de lado las tareas correctivas de las condiciones o fallas que se puede presentar a lo largo del tiempo de vida útil del equipo, esto gracias a la operación normal dentro del contexto operacional que se brinda al interior de la mina, y teniendo en cuenta que la misma estrategia de RCM los contempla como parte de sus estándares a implementar. Con esto, se busca no solo el uso optimizado de los costos, sino también un aumento en la disponibilidad y confiabilidad de la flota. Identificando los modos de falla potenciales que se pueden presentar de manera temprana y asociando tareas y recursos para mitigar la ocurrencia de estos.

#### 4. GLOSARIO

- AMEF FMEA: Análisis de modos y efectos de falla.
- RAM: Modelamiento de Disponibilidad, Confiabilidad y Mantenibilidad.
- RBD: Reliability Block Diagram - Diagrama de Bloques de Confiabilidad.
- RCM: Mantenimiento centrado en confiabilidad.
- MTBF: Tiempo medio entre fallas.
- MDT: Tiempo Medio Fuera de Servicio.
- MTTR: Tiempo medio de reparación
- As good as new: se determina como la condición luego de la ejecución de la tarea y traduce “Tan bueno como nuevo”, se da al finalizar un cambio de parte o componente.
- As good as old: se determina como la condición luego de la ejecución de la tarea y traduce “Tan bueno como viejo”, se da al finalizar una inspección o una reparación de la parte sin requerir su cambio.
- Sistema: Es un conjunto de elementos interrelacionados que trabajan juntos para cumplir una función específica.
- Subsistema: Es una división del sistema principal que realiza una función específica dentro del sistema.
- Componente: Es una unidad funcional dentro de un subsistema que realiza una tarea específica.
- Parte: Es el nivel más básico de la jerarquía y se refiere a los elementos individuales que componen un componente.
- Función: Lo que el dueño o usuario desea que realice un activo físico o sistema
- 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.

## 5. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

A continuación, se nombran los documentos usados como referencia para la elaboración del estudio.

MTMI-F-228 Rutina de mantenimiento 250 EH4000

MTMI-F-229 Rutina de mantenimiento 500 EH4000

MTMI-F-230 Rutina de mantenimiento 1000 EH4000

MTMI-F-231 Rutina de mantenimiento 2000 EH4000

Base de datos de eventos de una flota de equipos similares

EH4000AC2\_P8R7-1-1 Manual de Partes Camión EH4000

EH4000AC2\_P8R7-1-2 Manual de Partes Camión EH4000

EH4000AC2\_P8R7-1-3 Manual de Partes Camión EH4000

EH4000AC2\_P8R7-E1-1 Manual de Partes de componentes

EH4000AC2\_P8R7-E1-2 Manual de Partes de componentes

MANUAL TÉCNICO 1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO EH4000ACII

MANUAL TÉCNICO 2 - LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EH4000 ACII

TO8R7-E-00(20180620) MANUAL OPERADOR

W8R7-E-00, EH4000ACII Workshop Manual

## 6. METODOLOGÍA

Para establecer las estrategias y plan de mantenimiento de la sección de potencia del camión minero Hitachi EH-4000 AC 2 de una empresa minera, se utilizará la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). Y para dicho ejercicio se seguirá la metodología descrita a continuación, logrando una estructura clara y organizada del proceso, siguiendo la metodología establecida por los diferentes softwares de gestión que utiliza la empresa, que es finalmente donde se gestionaran los equipos que se incorporaran.

### 6.1 TAXONOMÍA

Se determina inicialmente la taxonomía o árbol de equipos y la codificación de los componentes claves que conforman el sistema de potencia y el sistema de propulsión, teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la empresa para este ítem. Esta taxonomía se definirá siguiendo los lineamientos y la codificación estandarizada que utiliza la empresa en su software de gestión de mantenimiento. Esto permitirá asegurar la integración de la estrategia RCM con los sistemas de información existentes.

### 6.2 ANÁLISIS DE FUNCIONES Y FALLAS FUNCIONALES

Se establecerá para cada uno de los componentes la función y falla funcional con el fin de determinar la afectación en el equipo al momento de no cumplir la función deseada.

- ▶ Funciones: “¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto operacional presente (funciones)?”
- ▶ 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.

### 6.3 MODOS DE FALLA

Según la norma ISO 14224<sup>3</sup> se refiere a la forma en que la falla ocurre, en este ejercicio se relacionan a cada falla funcional la cantidad de modos de falla que definen la pérdida de función del componente o de los ítems mantenibles.

En lo que dice la norma SAE JA1011 podemos extraer el concepto de modos de falla como:

- ▶ Un evento único, que causa una falla funcional.<sup>4</sup>
- ▶ Se deben identificar los modos de falla “probables” que puedan causar cada falla funcional.
- ▶ Las listas de los modos de falla deben incluir los modos de falla que han ocurrido antes, los modos de falla que están siendo prevenidos actualmente por la existencia de programas de mantenimiento, y los modos de falla que no han ocurrido aún pero que se piensan probables (creíbles) en el contexto operacional.

### 6.4 CÁLCULO DE TIEMPO MEDIO ENTRE FALLA MTBF

Se obtendrá los tiempos medios entre fallas (MTBF) asociados a los modos de falla identificados, utilizando la información histórica proporcionada por el fabricante y la experiencia con equipos similares.

### 6.5 TAREAS CORRECTIVAS

Son las tareas relacionadas con el fin restaurar la función perdida de un equipo sistema o componente, esto luego de ocurrida la falla, se debe tener en cuenta la asignación de cantidad y tipo de Talento humano, repuestos y APL, y duración de la tarea; así como también el Ramp Time o tiempo muerto o de planificación de la tarea o tareas a ejecutar.

---

<sup>3</sup> Norma ISO 14224:2016 Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural – recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos

<sup>4</sup> SAE JA1011 Sección 1.1

## 6.6 TAREAS PREVENTIVAS

Son las actividades necesarias que son planeadas y se ejecutarán a frecuencias de intervalos fijas determinadas principalmente por sugerencias del fabricante, con el fin de mitigar la aparición de fallas durante la operación del equipo, estas mayormente son tareas de servicio, de inspección o tareas de reemplazo; estas últimas son muy importante dentro de la compañía ya que establecen unas pautas para mantener y alargar la vida útil de equipos y sistemas. Igualmente se relacionarán, tipo de Talento humano, horas de ejecución, repuestos y APL.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN ESTANDAR TAREA PREVENTIVA
PSPE	Actividades Pre-SEIS
IPPE	SEIS
ISPD	Inspección predictiva
ISPE	Inspección general de flota
COPE	Reemplazo de componente mayor
RMPE	Reemplazo de componente menor
CAPE	Calibración

Tabla 1, Codificación estándar tareas preventivas

## 6.7 RBD DIAGRAMA RED DE BLOQUES

La metodología RBD pretende representar cuantitativamente de acuerdo a la filosofía y contexto operacional; un proceso productivo tal como su secuencia y lógica de operación es, con esto se puede detallar y evaluar los diferentes impactos y afectaciones que pueden tener las paradas programadas y no programadas de cada uno de los activos evaluados, valorar el tiempo efectivo de trabajo, vida útil, tiempo programados y no programados de paradas (tareas Correctivas y Preventivas) y los recursos asociados a éste.

Con esta valoración es posible plantear diferentes estrategias y planes de contingencia que permitan optimizar los tiempos de parada. La metodología Weibull aplicada a los RBD; ayuda a determinar la Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de un activo basado en estadística en base logarítmica; la cual tiende a ser más asertiva por los métodos de corrección que se pueden usar.

La metodología RBD permite también desagregar de cada uno de los activos en subsistemas. Esto con el fin de ponderar cuantitativamente la vida útil de cada

sistema, así como su Disponibilidad y Mantenibilidad, hasta llegar a determinar todos los Modos de Falla de cada uno de ellos, y como valor agregado tareas de mantenimiento acorde a cada componente.

## 6.8 SIMULACIONES

El modelamiento RAM / CDM (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad) permite conocer el comportamiento de las tasas de falla, tiempos de parada y tiempos de reparación respectivamente basados en las etapas de vida útil de los equipos y componentes; con el fin de proponer frecuencias de intervención preventiva y predictiva previniendo las fallas en tiempos de operación no deseados, estandariza los tiempos de parada y reparación; todo para poder optimizar un plan de mantenimiento coherente de acuerdo con las necesidades de operación.

En la metodología RAM / CDM tipo Weibull; son usadas las distribuciones estadísticas que modelan el comportamiento de degradación y desgaste según su estándar de función, equipos mecánicos, hidráulicos, eléctricos e instrumentación.

El modelamiento usado en las estimaciones RAM / CDM tipo Weibull son regresiones lineales en base logarítmica con corrección de datos tipo Nelson; método que ayuda a minimizar el margen de error estadístico necesario para las simulaciones. Las distribuciones que representan en este caso la vida útil y desgaste de los componentes y equipos objeto de estudio son: Weibull de dos (2) y tres (3) parámetros, Exponencial de uno (1) y dos (2) parámetros, Normal y Lognormal para el caso de los tiempos de reparación. Se usa la distribución Weibull de dos parámetros debido a su flexibilidad estadística y teniendo en cuenta que se estudia la confiabilidad y disponibilidad en la etapa de la ingeniería detallada; esta distribución se asemeja matemáticamente a las distribuciones Exponencial (Beta igual a uno) y Normal (Beta entre tres y cuatro).

Para lograr un modelamiento RAM acorde a los comportamientos típicos de cada uno de los componentes, sistemas o subsistemas del proceso; se emplea el método Montecarlo para la simulación de modelos matemáticos basados en distribuciones Weibull, el cual permite o respeta el comportamiento normal de cada estándar de función de los componentes analizados; el modelamiento incluirá el Tiempo medio entre fallas MTBF de acuerdo con el valor de vida útil Beta ( $\beta$ ); es relevante tener en cuenta que el valor beta depende del tipo de equipo: Mecánico, Hidráulico, Eléctrico o Electrónico, esto debido a que la degradación o desgaste de cada uno

de estos activos es diferente y por lo tanto las tendencias y comportamiento de las tasas de fallas cambian.

### 6.8.1 Herramienta para el Modelamiento

Debido a la cantidad de información y el tipo de cálculos requeridos para este modelamiento, se usa la herramienta lógica computacional ISOGRAPH que cumple con los alcances del proyecto teniendo en cuenta las normas ISO14224 y JA1011/12, además de tener comunicación con diversas bases de datos y ERP: Excel, Access, SQL, CSV y SAP, Ellipse y Maximo respectivamente. La versión utilizada es el Availability Workbench versión 4.0, en su módulo AvSim.

### 6.8.2 ISOGRAPH AWB (Availability Workbench)

Las características de la herramienta usada en este estudio son las necesarias para el tipo de análisis requerido:

- Permite adaptar cualquier matriz de consecuencia a la herramienta sin importar los criterios de riesgo.
- Respeta y da la posibilidad de crear el árbol de equipos de la manera más flexible posible; permitiendo dejar la Taxonomía y estructura Jerárquica de los activos incluso cuando son bajadas de ERP (SAP, Ellipse, Maximo).
- En las simulaciones respeta las tendencias de las tasas de falla; modelando el comportamiento de los costos, Horas Hombre, repuestos y las consecuencias de falla acorde a los MTBF.
- Permite importar y exportar la totalidad de la información en diversas bases de datos: (Excel, Access, CSV, Oracle, entre otros).
- Posee un módulo incorporado de interface SAP (Portal SAP) al RCMCost y AvSim (RBD) para hacer cargas y descargas masivas en doble vía.
- Genera reportes para análisis de datos, Gráficas y Tablas de: Confiabilidad, Disponibilidad, Riesgo, flujos de caja, Capacidad, Criticidad acorde a la matriz de riesgo aplicada.
- La aplicación Availability Workbench de ISOGRAPH posee en una sola herramienta las metodologías: RCM, RBD, Weibull, LCC, Reliability Process y Portal SAP.

Isograph AWB - Availability Workbench ofrece un entorno amigable integrado por los siguientes 3 módulos:

- RCMCost: Aplica la herramienta FMEA, Criticidad y RAM para desarrollar y proponer un Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM / MCC) Optimizando la confiabilidad y la disponibilidad de la estrategia de mantenimiento.
- AvSim: Realizar predicciones de plena disponibilidad del sistema teniendo en cuenta las complejas dependencias de equipos y componentes y los recursos asociados.
- Weibull: Análisis de históricos de fallas de los equipos a estudiar por medio de herramientas estadísticas.

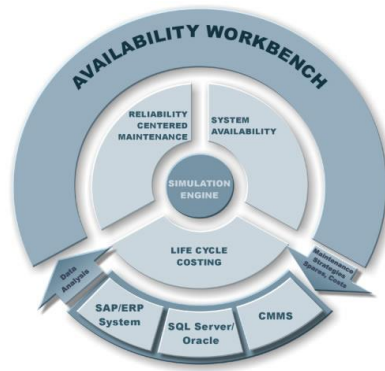


Figura 1, Esquema de funcionamiento del programa Availability Workbench.

**SAP**® Certified  
Integration with SAP Applications

Figura 2, Certificación SAP

## 6.9 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Una vez definidas las estrategias y el plan de mantenimiento basado en el análisis RCM del sistema de potencia y sistema de propulsión de los camiones mineros Hitachi EH-4000 AC 2, se procederá a evaluar los resultados obtenidos mediante el uso del software especializado Isograph.

El objetivo principal de este análisis será determinar el impacto que tendrán las tareas de mantenimiento preventivo propuestas sobre la disponibilidad general de la flota de equipos. Para ello, se realizarán las siguientes actividades:

Se simularán los escenarios de implementación del plan de mantenimiento definido. Esto permitirá proyectar los niveles de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de los camiones Hitachi a diferentes horizontes de tiempo (1, 3 y 5 años).

Evaluación de las tareas preventivas, Se analizará a detalle cómo las tareas de mantenimiento preventivo, en cuanto a frecuencias y tiempos de ejecución, afectan la disponibilidad operativa de los equipos. Esto con el fin de identificar oportunidades de optimización en la planificación de estas actividades.

Este proceso de análisis de resultados permitirá validar la efectividad del plan de mantenimiento RCM propuesto, y realizar los ajustes necesarios para asegurar que se cumplan los objetivos de disponibilidad, confiabilidad y mantenibilidad de la flota de camiones mineros Hitachi EH-4000 AC 2.

## 7. DESARROLLO DEL RCM SISTEMA DE POTENCIA CAMIÓN MINERO EH4000-AC2

Inicialmente se ha establecido una plantilla en Microsoft Excel que permitirá centralizar y procesar la información recopilada del estudio de RCM, facilitará el análisis detallado de cada componente y la definición de las estrategias de mantenimiento.

La plantilla incluye una sección o campo de codificación o ID, para equipo, sistema, subsistema, componente, función, falla funcional, parte, modo de falla, tareas; con una descripción detallada de cada una.

### 7.1 TAXONOMÍA

La taxonomía o árbol de equipo se muestra en la tabla 1, donde se muestra el sistema de potencia, y sistema de propulsión, los diferentes subsistemas, y componentes, cada uno identificado con un ID único, y una descripción, en este caso se tiene el SPO Sistema de Potencia, en la siguiente columna el subsistema y al final el componente. Se tiene en cuenta como premisa que el componente se ubica dentro de la jerarquía donde cumple la función y por lo tanto donde se ve afectada, la falla dentro del equipo, un ejemplo de esto es el subsistema de control del motor Diesel que se encuentra dentro del sistema de potencia y no dentro del sistema de control general del equipo. En la figura 3, se realiza la importación al software especializado, donde se muestra el sistema de potencia y al desplegar se muestran los subsistemas.

ID SISTEMA	DESCRIPCIÓN SISTEMA	ID SUBSISTEMA	DESCRIPCIÓN SUBSISTEMA	ID COMPONENTE	DESCRIPCIÓN COMPONENTE
SPO	Sistema de Potencia	MOTR	Motor Básico Cummins	MOTR	Motor básico
SPO	Sistema de Potencia	MOTC	Sistema de Admisión y Escape	FIAD	Filtro admisión aire motor
SPO	Sistema de Potencia	MOTC	Sistema de Admisión y Escape	TURBO	Turbo
SPO	Sistema de Potencia	MOTC	Sistema de Admisión y Escape	INDVA	Indicador de vacío
SPO	Sistema de Potencia	MOTC	Sistema de Admisión y Escape	MULES	Múltiple de escape

Tabla 2, Plantilla de Microsoft Excel ejemplo de taxonomía

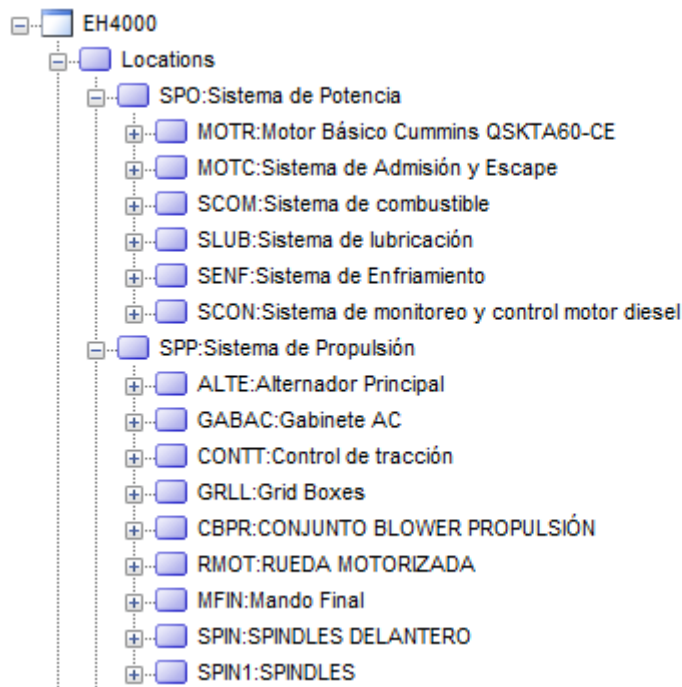


Figura 3, Taxonomía del equipo EH-4000 en el Software Isograph

## 7.2 FUNCIONES

Las funciones dentro del RCM, están dadas por una estandarización que se ha desarrollado por el departamento de confiabilidad omitiendo en gran parte las capacidad y parámetros de funcionamiento de los componentes, realizando una lista de funciones y fallas funcionales menos específica al componente en el equipo, esto debido a la gran cantidad de equipos al interior de la mina y que según políticas deben contar con un ejercicio RCM, en el anexo del RCM, se evidencia que por el ejemplo el Motor Diesel posee varios Turbo cargadores y se le asigna la función de “Comprimir el aire de entrada requerido por el motor” y la falla funcional principal sería la negación de la función o el no cumplimiento de esta “No comprimir el aire de entrada requerido por el motor”.

Las funciones y fallas funcionales, se definen hacia los componentes igualmente poseen una identificación única o Id, conformado de la siguiente manera, para el Id de la función se agrega el Id del sistema punto (.), Id del Subsistema punto (.) Id del componente punto (.) y termina con la letra F (Función). Para la falla funcional

igualmente se repite el Id de la función, pero al final se agrega doble FF indicando Falla Funcional, como se muestra en la tabla 3.

ID COMPONENTE	DESCRIPCION COMPONENTE	ID FUNCIÓN	FUNCIÓN	ID FALLA FUNCIONAL	FALLA FUNCIONAL
MOTR	Motor básico	SPO.MOTR.M OTR.F	Proveer la potencia nominal de trabajo bajo el requerimiento de torque de los sistemas asociados	SPO.MOTR.M OTR.FF	No proveer la potencia nominal de trabajo bajo el requerimiento de torque de los sistemas asociados
FIAD	Filtro admisión aire motor	SPO.MOTC.FI AD.F	Retener el material particulado existente en el aire que ingresa al equipo	SPO.MOTC.FI AD.FF	No retener el material particulado existente en el aire que ingresa al equipo
TURBO	Turbo	SPO.MOTC.T URBO.F	Comprimir el aire de entrada requerido por el motor	SPO.MOTC.T URBO.FF	No comprimir el aire de entrada requerido por el motor
MULES	Múltiple de escape	SPO.MOTC.M ULES.F	Canalizar el flujo de gases de combustión del motor hacia turbo	SPO.MOTC.M ULES.FF	No direccionar el flujo de aire a la cámara de combustión
COMBU	Combustible	SPO.SCOM.C OMBU.F	Proveer el flujo y presión de combustible necesario para que el motor entregue la potencia requerida de acuerdo al régimen de operación	SPO.SCOM.C OMBU.FF	No proveer el flujo y presión de combustible necesario para que el motor entregue la potencia requerida de acuerdo al régimen de operación
TACO	Tanque combustible	SPO.SCOM.T ACO.F	Contener sin derrame y aislado del ambiente el combustible disponibles para el motor	SPO.SCOM.T ACO.FF	No contener sin derrame y aislado del ambiente el combustible disponibles para el motor

Tabla 3, Estructura de funciones y Fallas funcionales

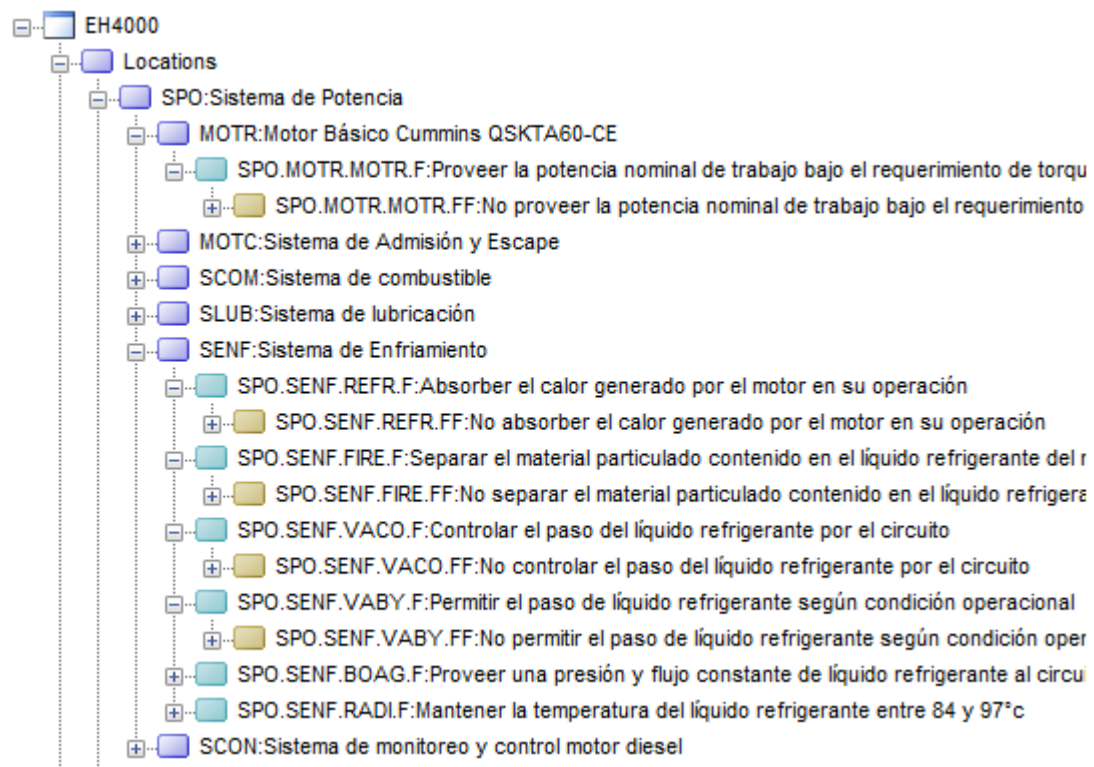


Figura 4, Vista de Isograph evidenciando Función y Falla Funcional

### 7.3 MODOS DE FALLA

Los modos de falla, al igual que las funciones presentan unos parámetros estandarizados, esto a que se cuenta con una lista de códigos

La descripción de los modos de falla se lleva a cabo con la siguiente estructura: Parte, Afectación y Causa de la falla, por ejemplo: “Cojinete desgastado debido a contacto con partículas abrasivas”, donde cojinete es la parte, desgastado la afectación y contacto con partículas abrasivas la causa de la falla. Se utiliza un contador con la letra M seguido del número de modos de falla que se presentan en una parte por ejemplo si posee 3 entonces el contador llega hasta M3.

El Id de los modos de falla está conformado por el Id de la falla funcional, seguido por punto (.) se agrega el Id de la parte punto (.) luego el contador M# punto (.) y el código que se le asigno según la empresa a la afectación, por ejemplo, **SPO.MOTR.MOTR.FF.EMPCU.M1.QUEMA**

ID MODO DE FALLA	M	DESCRIPCIÓN MODO DE FALLA	CAUSA MODOS DE FALLA	CÓDIGO STD CJN	DESCRIPCIÓN CÓDIGO STD CJN
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M1.AVERI	M1	Bomba de combustible averiada por daño en componentes internos	Vida útil	AVERI	AVERIADO/A
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M2.FUGA	M2	Bomba de combustible con fuga en sello distribución por cristalización	Alta temperatura	FUGA	FUGA
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M3.DESGA	M3	Bomba combustible desgastada por material particulado en sistema	Diesel de mala calidad	DESGA	DESGASTADO/A
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M4.DESGA	M4	Eje bomba de combustible partido por fatiga del material	Falla del material	DESGA	DESGASTADO/A
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M5.SUOLT	M5	Tornillo de sujeción bomba de combustible sueltos por vibración	Vibración	SUOLT	SUELTO/A
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M6.DETER	M6	Coupling desgastado por vida útil	Vida útil	DETER	DETERIORADO/A
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M7.PARTI	M7	Coupling partido por fatiga del material	Falla del material	PARTI	PARTIDO/A
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M8.AVERI	M8	Válvula retorno averiada por daño interno	Vida útil	AVERI	AVERIADO/A

Tabla 4, Modos de falla bomba de combustible

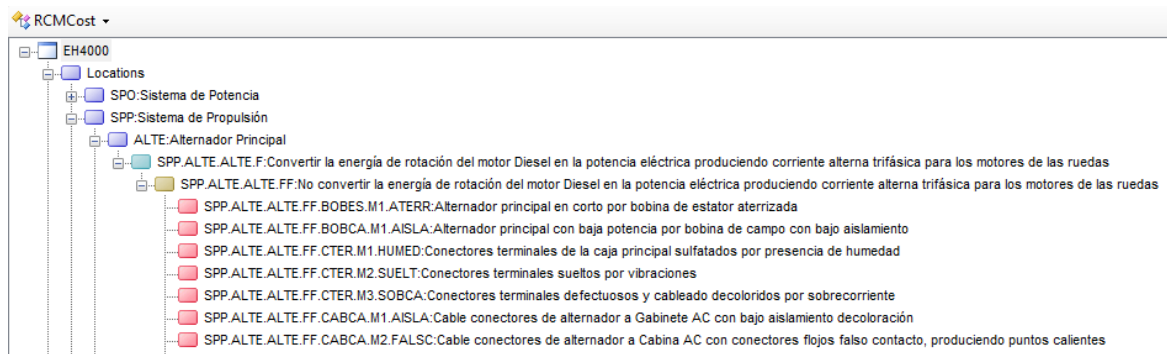


Figura 5, Modos de falla en el módulo RCMCost del Alternador Principal

En la figura 6, ventana de propiedades del modo de falla en la pestaña General, se muestra el Id del modo de falla, descripción y una casilla que describe el método de detección

Cause Properties - SPO.SENF.REFR.FF.REFRI.M2.CONTA : Refrigerante contaminado con ot... ?

General | Effects | Failure | Maintenance | Alarm | Commission | Redesign | Notes | Strategy

ID: SPO.SENF.REFR.FF.REFRI.M2.CONTA

Description: Refrigerante contaminado con otro liquido

Detection method: Falla en circuito de refrigeración

Compensating provisions:

Remarks: CONTA

Highlight text

OK Cancel

Figura 6, Ventana de propiedades de modos de falla

## 7.4 TAREAS CORRECTIVAS

Para las tareas correctivas se realiza la descripción de la misma iniciando con un verbo de la acción a ejecutar, en las siguientes columnas se establece el tiempo de ejecución y de tiempo muerto estos dependen del recorrido dentro de la mina y la gestión relacionada con algún repuesto de ser necesario, luego se establece el Id del talento humano TH necesario para la ejecución de la actividad, estos se muestran en la tabla 5, el número de personas en la tarea donde en la mayoría de veces se utiliza una pareja de la especialidad, puede que en la tarea intervengan dos o más tipos de TH diferentes, las simulaciones muestran la utilización de la mano de obra, y se puede variar la cantidad de personal disponible con el fin de determinar el punto de equilibrio para la utilización plena de este y evitar tiempos no productivos.

Según la metodología planteada, se establece la condición luego de la intervención por ejemplo si la parte es reemplazada por una nueva la condición se obtendrá será

“Tan bueno como nuevo, As good as new”, o por lo contrario esta fue reparada, ajustada, se limpiará, calibrará, etc, donde se reestableció su función, pero no fue necesario su reemplazo, la condición luego de la tarea queda “Tan bueno como viejo, As good as old”, la diferencia de estas dos se ve reflejado en las simulaciones donde la primera condición reinicia la vida útil de la parte mientras la otra no.

El Id de la tarea correctiva, considera el mismo Id del modo de falla y se agrega al final seguido de punto (.) las letras CO. Como premisa se aclara que cada modo de falla tiene relacionado una tarea correctiva.

ID Correctivo	Descripción tarea correctiva	Duración (hr)	Tiempo muerto (hr)	ID talento humano	Cantidad Talento humano	Condición después de reparado
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M1.AVERI.CO	Cambio de bomba de combustible	3	1	MOT	2	As good as new
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M2.FUGA.CO	Cambio de bomba de combustible	3	1	MOT	2	As good as new
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M5.SUELT.CO	Retorquear tornillos de sujeción bomba de combustible	0,5	1	MOT	1	As good as old
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M6.DETER.CO	Cambio de coupling bomba de combustible	1	1	MOT	2	As good as new
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M7.PARTI.CO	Cambio de coupling bomba de combustible	1	1	MOT	2	As good as new
SPO.SCOM.BOIN.FF.BOMCO.M8.AVERI.CO	Cambio de válvula de retorno línea de combustible	1,2	1	MOT	2	As good as new

Tabla 5, Tareas correctivas bomba de combustible

Siguiente a esto, se relaciona si se requiere, los repuestos para realizar la tarea correctiva, estos se establecen con el part no. del fabricante, la descripción y la cantidad requerida. Se obtienen de los manuales de fabricante de Hitachi y Cummins, con esto se logra establecer en las simulaciones realizadas, la rotación de repuestos, adicionalmente la frecuencia en la que se pueden necesitar estos facilitando la gestión de analistas y de almacén, logrando acoplar la logística de compras a la necesidad de tener en bodega las partes que al final son consideradas como críticas.

En la figura 7, se muestran las tareas que están relacionadas a cada modo de falla, en este caso se asignó la tarea correctiva y una tarea de inspección. En la figura 8, se evidencian las propiedades de las tareas correctivas, descripción, Id de la tarea, duración y ramp time, en la sección de recursos se anotan el talento humano y el consumible necesario para la ejecución de la tarea.

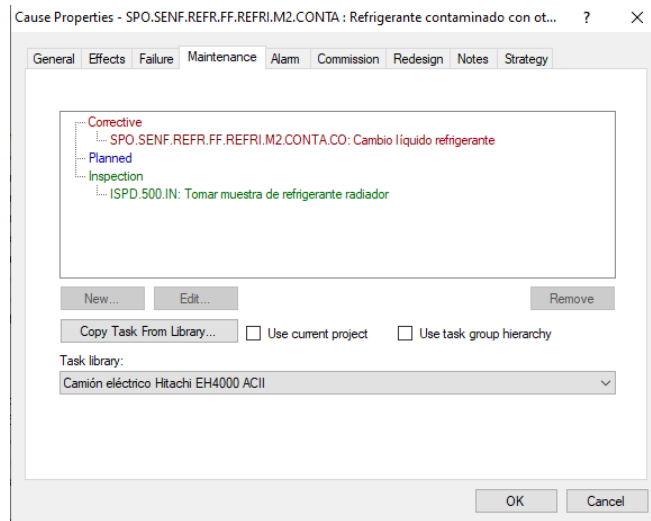


Figura 7, Pestaña Maintenance

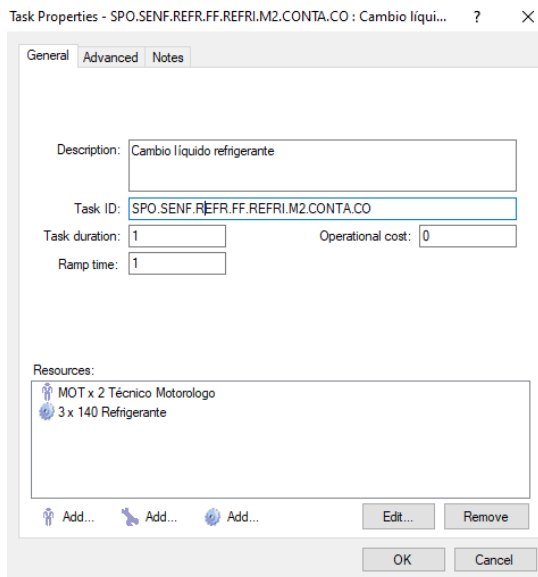


Figura 8, Propiedades tareas correctiva

## 7.5 TAREAS PREVENTIVAS

En las tareas preventivas o de inspección, se establece por políticas de la empresa frecuencias en intervalos de 250 horas para lo que se cuentan con formatos de ejecución de tareas para 250, 500, 1000 y 2000 horas. Las frecuencias están dadas de la siguiente manera, 250 horas se considera como tareas relacionadas a la inspección general del equipo si se encuentra alguna condición a corregir se puede realizar o se puede programar para la próxima parada del equipo, a las 500 horas de operación en la cual se repiten las tareas de inspección de 250 y se ejecutan tareas de cambio de aceite y filtraciones, luego se repite la frecuencia de 250 horas, siguiente a esta las de 1000 horas y así sucesivamente.

Adicional a esto, ya se encuentran establecidas unas estrategias como políticas para garantizar el óptimo funcionamiento de los equipos, basadas en el reemplazo de componentes mayores a una vida media establecida para cada uno. Por lo tanto, el motor diésel, y sus componentes como turbo, radiadores, bases, mangueras de lubricación y de combustible que puedes causar incendios son reemplazadas por seguridad sin importar su condición física al momento de cumplido dicho tiempo. En la tabla 6, se muestran algunos componentes y su frecuencia de cambio.

Las tareas se diferencian como Planned o de PM donde se ejecuta una labor de intervención al equipo las de rutina y las que hacen parte de la estrategia, y de Inspection o IN donde se realiza todas las tareas de inspección, pruebas, análisis de aceite, monitoreo por condición, además otras que ya se tengan como estrategia en la compañía. Por lo tanto, un modo de falla puede no tener una tarea planeada, tener una o más tareas, las cuales se diferencian por un Subindex al momento del cargue en el software especializado. Igualmente, las tareas planeadas y de la estrategia poseen unos recursos que son importantes enmarcarlos, los cuales son talento humano, repuestos y APL's. La codificación de estas tareas en el Id cambian por la condición de la misma, donde se tienen varias condiciones, en la tabla 6, se

pueden observar los diferentes utilizados al momento de categorizar la tarea a ejecutar, seguido de la frecuencia de ejecución de la tarea, y al final se identifica si es IN o PM.

ID MANTENIMIENTO PM/IN	TYPE	ID PM/IN (1)	DESCRIPCIÓN TAREA PREVENTIVA O INSPECCIÓN	DURACIÓN (HR)	FRECUENCIA (HR)	AFECTACIÓN OPERACIÓN	ID TALENTO HUMANO	CANTIDAD TALENTO HUMANO	CONDICIÓN DESPUÉS DE REPARADO
PM	Planned	CAPE.12000.PM	Calibrar válvulas de motor	2	12000	TRUE	MOT	2	As good as old
IN	Inspection	IPPE.500.IN	Comprobar el estado de los soportes del motor	0,15	500	TRUE	MOT	2	As good as old
PM	Planned	IPPE.500.PM	Cambio de filtro primario	0,5	500	TRUE	MOT	2	As good as new
IN	Inspection	IPPE.250.IN	Limpiar e inspeccionar tapas del sistema de admisión de aire	0,15	250	TRUE	MOT	1	As good as old
IN	Inspection	IPPE.250.IN	Revise que los ductos de admisión no se encuentren agrietados.	0,15	250	TRUE	MOT	1	As good as old

Tabla 6, Descripción tareas preventivas

Task Properties - ISPD.500.IN : Tomar muestra de refrigerante radiador

General | Advanced | Predictive Data | Notes | Optimization

Task enabled

Interval: 500    Offset: 0     Fixed interval

Description: Tomar muestra de refrigerante radiador

Task ID: ISPD.500.IN

Task duration: 0,2    Operational cost: 0

Ramp time: 0    Minimum age: 0

Task group: Not set

New Group...    Edit Group...

Resources:

MOT x 1 Técnico Motorologo

Add...    Add...    Edit...    Remove

OK    Cancel

Figura 9, Propiedades tareas preventiva Isograph

## 7.6 RBD

Al finalizar el ejercicio de RCM y el cargue en el software especializado Isograph en el módulo RCMCost, se realiza una importación directa entre bases de datos interna hacia el módulo AVSim, lo que traduce los sistemas, subsistemas, componentes y modos de falla en bloques, utilizando la metodología de diagrama de bloques RBD.

### 7.6.1 RBD Sistemas

Así como se muestra en la figura 10, donde en la parte izquierda se presenta el módulo AVSim y en la parte derecha los bloques que determinan los sistemas de estudio, con el Id en la parte superior del bloque y en la parte central la descripción, el (+) determina que se puede bajar un nivel en la jerarquía y acceder a los subsistemas.

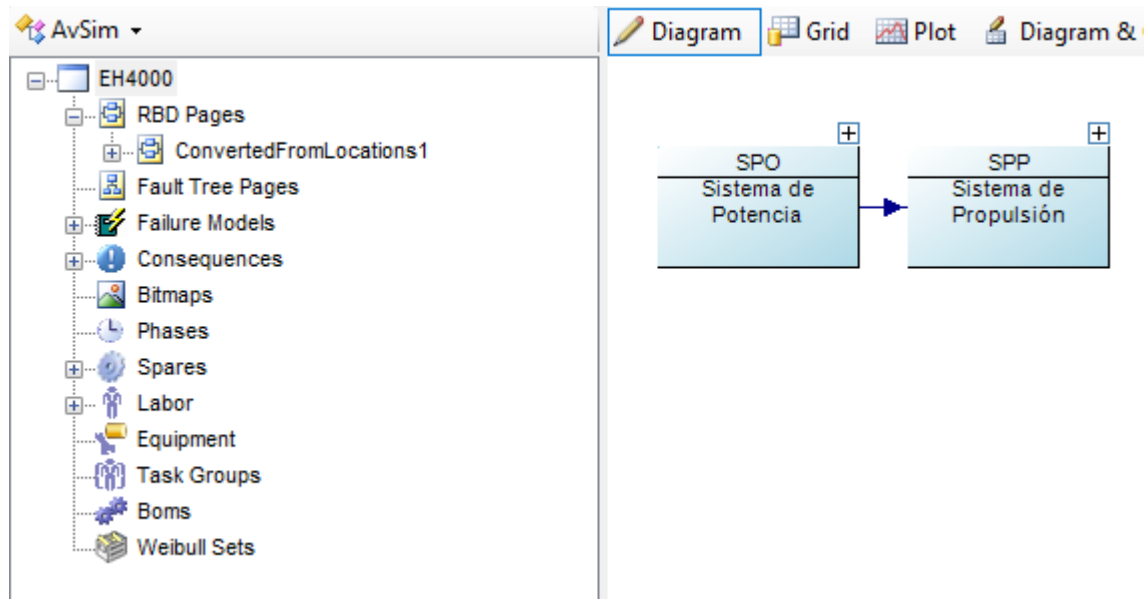


Figura 10, Módulo AVSim RBD

### 7.6.2 RBD subsistemas

En la figura 11, se muestra el interior del bloque del sistema de potencia, conformado por los subsistemas motor básico, sistema de combustible, entre otros, en este caso se evidencia que todos los subsistemas son fundamentales para la

operación del sistema potencia, por lo tanto, el diagrama muestra todos los bloques en serie, el (+) representa que en cada bloque existe una jerarquía inferior, en este caso, los modos de falla.

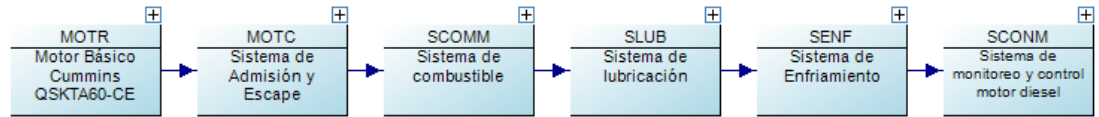


Figura 11, Sistema de potencia

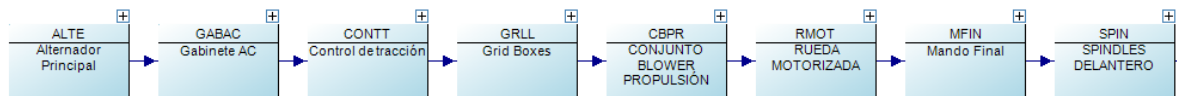


Figura 12, Sistema de propulsión

### 7.6.3 RBD modos de falla

En el nivel inferior del componente los bloques representan los modos de falla asociados, en el caso de la figura 13, se encuentran bloques en serie representando los modos de falla que paran el sistema por la ocurrencia del evento y otros en una línea abajo que se consideran en paralelo, determinando con esto de que, si se materializa el modo de falla, este no produce una parada en el subsistema o equipo, se puede operar y programar la corrección de la falla.

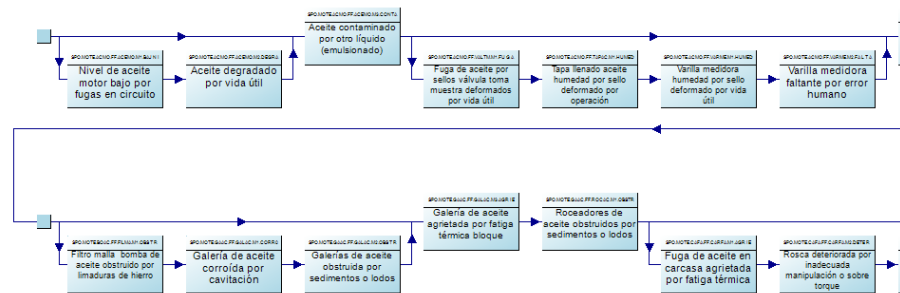


Figura 13, Modos de falla en RBD

### 7.6.4 Simulación

Los parámetros de la simulación esta dado en la ventana Project options, pestaña tiempo de vida Lifetime figura 14, donde se podrá modificar en la casilla Lifetime el

tiempo de simulación en este caso se contempla 21600 horas o 3 años, dividido en 36 meses o ciclos operacionales modificable en la casilla Number of intervals, y en la casilla Interval length se mostrará las horas consideradas por cada ciclo operacional en este caso, en cada mes. Luego se ejecuta la simulación dando los resultados mencionados a continuación.

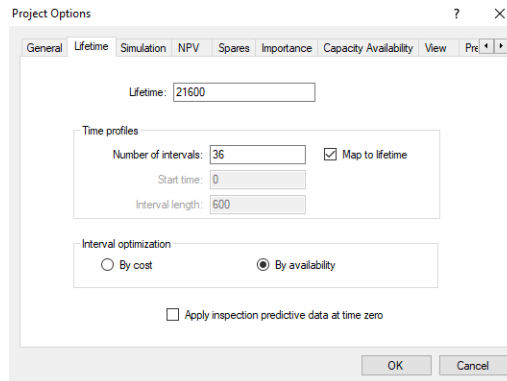


Figura 14, Opciones de proyecto

## 8. RESULTADO DEL RCM

Luego del análisis RCM, realizado al sistema de potencia y sistema de propulsión del Camión eléctrico Hitachi EH4000 ACII, se generaron los siguientes anexos:

- Anexo A, RCM de los sistemas propuestos, en una plantilla propia de Excel donde se muestra el desarrollo del ejercicio.
- Anexo B, El archivo nativo de ISOGRAPH, en el cual se importó el RCM.

Los reportes generados por la simulación:

- Anexo C, Horas Hombre por tiempo operacional.
- Anexo D, Un archivo en PDF del AMEF.
- Anexo E, Listado de tareas preventivas y de inspección, con frecuencia, duración y recursos.

Como resultado de las interacciones a un tiempo operacional de 21600 horas, se tienen los siguientes resultados que se pueden contrarrestar junto con los anexos y se encuentran descritos a continuación.

En la figura 15, se muestra la gráfica de los costos de las labores de mantenimiento por intervalo de tiempo, en rojo se evidencia las labores correctivas y en azul las labores preventivas, con un costo mayor que las primeras evidenciando los resultados de la estrategia. La figura 16, describe la ocupación en horas del talento humano para los diferentes intervalos de tiempo.

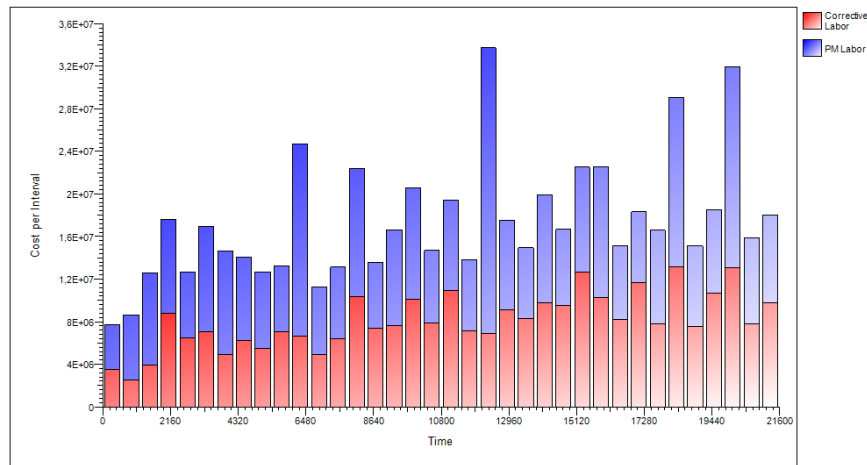


Figura 15, Costos de talento humano

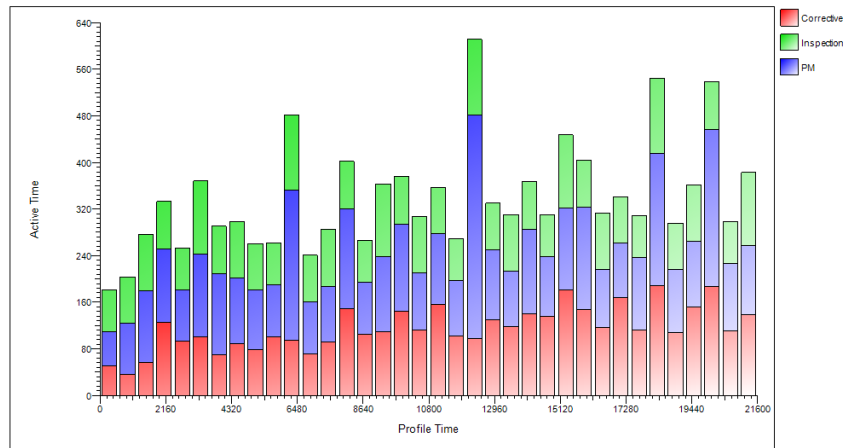


Figura 16, Ocupación del Talento Humano

La figura 17, la ocurrencia de la falla, donde muestra de menor a mayor los modos de falla más repetitivas. El modo de falla que más contribuye con la indisponibilidad

es: **Filtro respiradero mando final obstruido por contaminación** el cual tiene una tarea preventiva asociada **Limpiar el respiradero del mando final** ejecutada por 1 Técnico mecánico con duración de 0,5 horas, con una frecuencia de 250 horas.

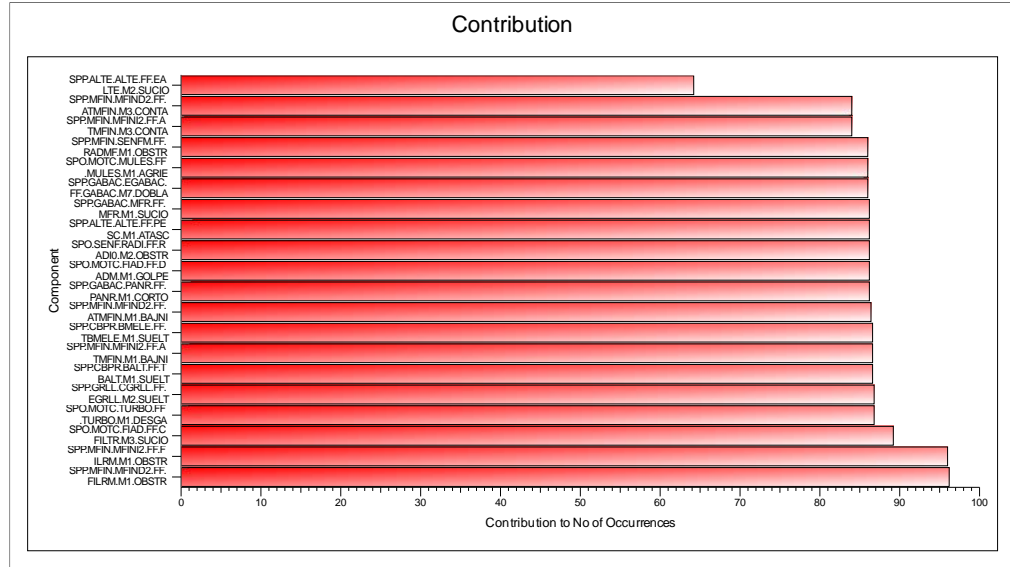


Figura 17, Ocurrencia de los modo de falla

La figura 19, es la gráfica obtenida de disponibilidad operacional a 3 años, donde se evidencia en eje x los tiempos de operación y en el eje x el porcentaje de disponibilidad, la línea roja más abajo en la gráfica representa la disponibilidad de los dos sistemas, la azul hace referencia a SPO sistema de potencia y la verde a SPP sistema de propulsión.

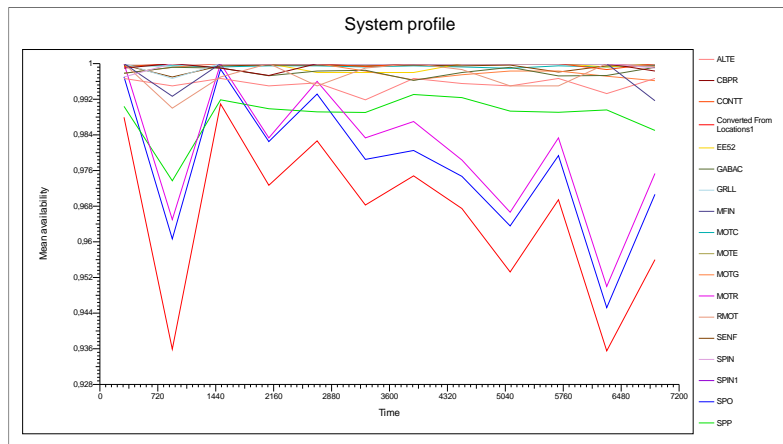


Figura 18, Disponibilidad a 1 año o 7200 horas

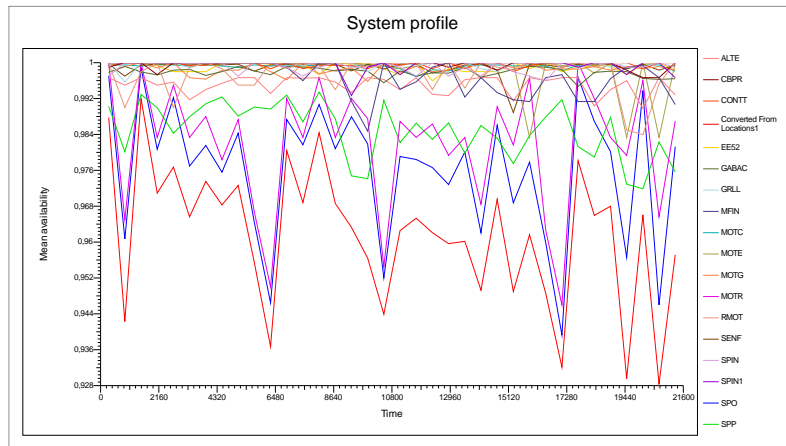


Figura 19, Disponibilidad para tiempo operacional de 3 años o 21600 horas

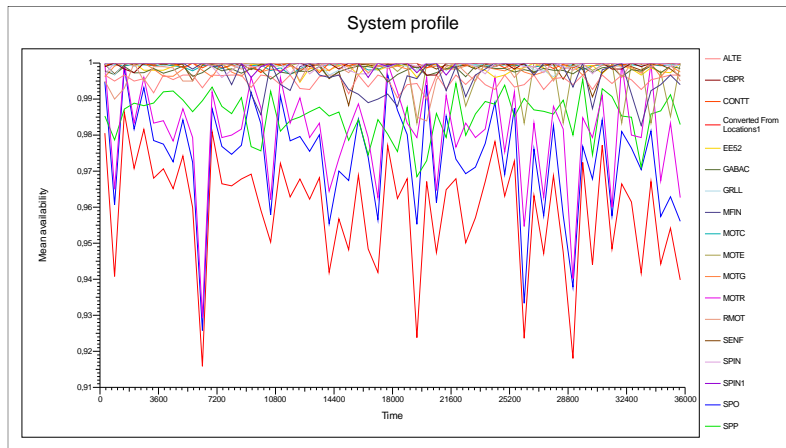


Figura 20, Disponibilidad a 5 años o 36000 horas

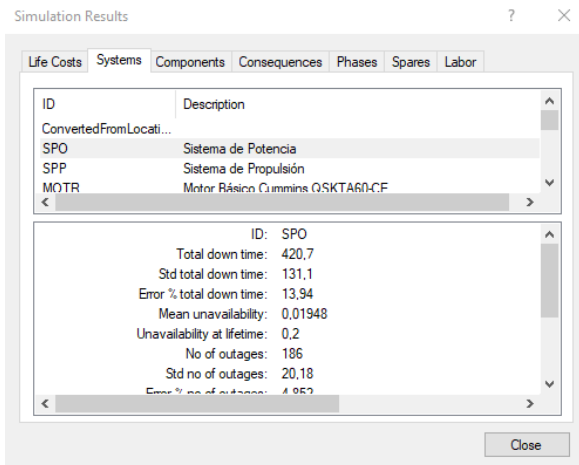


Figura 21, Disponibilidad del Sistema de Potencia 98%

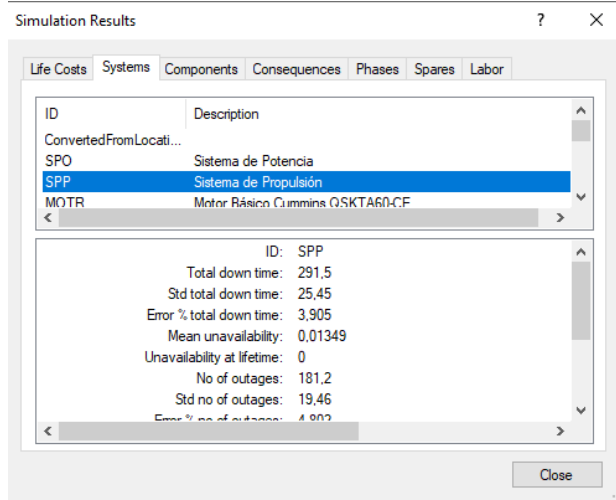


Figura 22, Disponibilidad Sistema de Propulsión 98,6%

## 9. CONCLUSIONES

La disponibilidad obtenida en el sistema de potencia es de 98% y el sistema de propulsión es de 98,6%, para un tiempo operativo de 21600 horas o 3 años, la disponibilidad también se ve afectada por la cantidad de paradas programadas que en este caso tienen frecuencias de 500 horas y por lo correctivos que se puedan presentar.

Se obtuvieron 463 modos de falla igual número de tareas correctivas, 36 tareas de inspección y 50 tareas planeadas preventivas, que representan en promedio 926 horas anuales por equipo.

La mayor afectación en el equipo mostrado en los modos de falla que más afectan la disponibilidad evidencia que la contaminación generada por la operación minera repercute en las frecuencias de limpieza e inspección de componentes.

Por la severidad de la operación las frecuencias de los PM se deben mantener a 500 horas.

Los tiempos de simulación no deberían ser mayor a los tenidos en cuenta debido a que el ejercicio debería retroalimentarse y actualizar la estrategia, y en ese caso el archivo debe modificarse y volver a realizar simulaciones.

### **Recomendaciones**

Cualquier nueva consideración en la estrategia o cualquier modificación considerable requiere una actualización del ejercicio y se generarían nuevos análisis.

Se recomienda que transcurrido un año se revisen los tiempos medios entre falla (MTBF), y los modos de falla que se presentaron, y retroalimentar el ejercicio, se

puede repetir luego de un tiempo de operación para mantener constantemente actualizada la estrategia y lograr optimizaciones acordes a la realidad.

Se recomienda también a la organización el manejo de Técnicos electromecánicos que optimizarían en mayor medida las horas hombre.

## BIBLIOGRAFÍA

- IBM México Artículo: ¿Qué es el mantenimiento centrado en la confiabilidad?  
<https://www.ibm.com/mx-es/topics/reliability-centered-maintenance>
- Análisis RAM: El manual completo 2025 <https://tractian.com/es/blog/analisis-ram-el-manual-completo-2021-2> Alex Vedan
- Norma ISO 14224:2016 Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural – recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos
- Norma SAE JA1011 Criterios de Evaluación para Procesos de Mantenimiento Centrados en Confiabilidad (RCM) 2002
- Norma SAE JA1012 Una Guía para la Norma de Mantenimiento Centrados en Confiabilidad (MCC) 2002
- Manual Hitachi P8R7-1-2, EH4000ACII Parts Manual, Catalogo de partes
- Manual Hitachi SM8R7-1-1, EH4000ACII Manual del Operario
- Isograph Availability Workbench  
<https://www.isograph.com/software/availability-workbench/rcm-software/reliability-centered-maintenance/>