

**APROXIMACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM EN EL HORNO CINCO DE  
CLINKER EN LA PLANTA CAIRO DE CEMENTOS ARGOS S.A.**

**JUAN ALFONSO TOBÓN DÍAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2009**

**APROXIMACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM EN EL HORNO CINCO DE  
CLINKER EN LA PLANTA CAIRO DE CEMENTOS ARGOS S.A.**

**JUAN ALFONSO TOBÓN DÍAZ**

**Monografía de grado presentada como requisito para optar el título de  
Especialista en Gerencia de Mantenimiento**

**Director  
LUIS ALBERTO MORA GUTIÉRREZ  
Ph.D, en ingeniería industrial**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO  
BUCARAMANGA  
2009**

## **DEDICATORIA**

A mi familia por el apoyo brindado para realizar los sueños que me he propuesto.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco de manera muy especial al doctor Luis Alberto Mora Gutiérrez por su paciencia y dedicación en la dirección de este trabajo, porque sin su guía no se hubiera podido llevar a cabo.

## CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 CEMENTOS ARGOS	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 General	4
1.4.2 Específicos	4
2. METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD	5
2.1 OBJETIVO	5
2.2 INTRODUCCIÓN	5
2.3 DESARROLLO	5
2.3.1 Historia del RCM	5
2.3.2 Metodologías RCM	6
2.3.2.1 Normas SAE	6
2.3.2.2 Aladon Ltda.	7
2.3.2.3 Grupo de investigación ESReDA	7
2.3.2.4 Norma MIL-STD-2173 (AS)	7
2.3.2.5 Grupo de investigación OREDA	8
2.3.2.6 Mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM	8
2.3.3 Comparación entre metodologías	8

2.3.4 Metodología RCM a utilizar	8
2.3.5 Metodología internacional unificada	9
2.3.5.1 Información Inicial	11
2.3.5.2 Análisis de decisión RCM	13
2.3.5.3 Información de operación	13
2.4 CONCLUSIÓN	13
3. HORNO HC5	14
3.1 OBJETIVO	14
3.2 INTRODUCCIÓN	14
3.3 DESARROLLO	14
3.3.1 Horno rotativo	14
3.3.2 El HC5	15
3.3.3 Sistema horno 5 clinker	16
3.3.3.1 Subsistema alimentación	17
3.3.3.2 Subsistema clinkerización	18
3.3.3.3 Subsistema enfriamiento	20
3.3.3.4 Subsistema despolvamiento	20
3.3.3.5 Subsistema eléctrico y control	22
3.3.3.6 Subsistema obra civil	22
3.3.4 Sistema molienda carbón 5	22
3.3.4.1 Subsistema alimentación	22
3.3.4.2 Subsistema molienda	23

3.3.4.3 Subsistema transporte	23
3.3.4.4 Subsistema obra civil	24
3.3.4.5 Subsistema eléctrico y control	24
3.3.5 Proceso servicios auxiliares directos	24
3.4 CONCLUSIÓN	24
4. RCM EN EL HC5	25
4.1 OBJETIVO	25
4.2 INTRODUCCIÓN	25
4.3 DESARROLLO	25
4.3.1 Preparación del estudio.	25
4.3.2 Selección del sistema a analizar y profundidad del análisis	26
4.3.3 Análisis del sistema	27
4.3.3.1 Funciones	28
4.3.3.2 Falla funcional	28
4.3.3.3 Modos de falla	29
4.3.4 Definición de funciones, identificación de fallas funcionales y efectos	30
4.3.5 Metodología para la obtención de la hoja de información RCM	31
4.3.6 Fallas funcionales y orden jerárquico por criticidad	31
4.3.7 Metodología para la obtención de la hoja de información RCM	32
4.3.7.1 Tareas propuestas e intervalos	32
4.3.7.2 Tareas aplicables y efectivas	34
4.3.7.3 Intervalos	35

4.3.7.4 Tareas por condición	36
4.3.7.5 Tareas por búsqueda de fallas	37
4.3.7.6 Tareas por vida límite	38
4.3.7.7 Rediseño	39
4.3.8 Aproximación del modelo RCM al HC5	40
4.3.9 Cementos Argos S.A. y el RCM	55
4.4 CONCLUSIONES	55
5. CONCLUSIONES	57
5.1 CONCLUSIONES GENERALES	57
5.2 CONCLUSIONES TÉCNICAS	57
5.3 CONCLUSIONES TEMÁTICAS	58
BIBLIOGRAFÍA	59

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación geográfica de la planta Cairo	2
Figura 2. Secuencia lógica de pasos del modelo	9
Figura 3. Proceso global del RCM	10
Figura 4. Proceso global del RCM	11
Figura 5. Diagrama de decisión para la selección de tareas	12
Figura 6. Esquema horno de clinker vía húmeda	15
Figura 7. Subsistema de alimentación	18
Figura 8. Subsistema clinkerización	19
Figura 9. Subsistema enfriamiento	21
Figura 10. Subsistema molienda carbón	23
Figura 11. Diagrama de decisión para la selección de sistemas significativos	26
Figura 12. Análisis de información de paros	27
Figura 13. Diagrama de análisis de sistema	29
Figura 14. Diagrama de decisión para el análisis del sistema	30
Figura 15. Intervalo PF	36
Figura 16. Vida límite segura	39

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Procesos sistemas y subsistemas relacionados con el HC5	17
Cuadro 2. Equipos que componen el subsistemas clinkerización	19
Cuadro 3. Equipos que componen el subsistema enfriamiento	20
Cuadro 4. Equipos que componen el subsistema despolvamiento	21
Cuadro 5. Equipos que componen el subsistema eléctrico y control	22
Cuadro 6. Equipos que componen el subsistema alimentación	22
Cuadro 7. Equipos que conforman el subsistema transporte	24
Cuadro 8. Valores de criterios de Ocurrencia, Severidad y Detección	33
Cuadro 9. Intervalos de búsqueda de fallo	38
Cuadro 10. Hoja de información	41
Cuadro 11. Hoja de cálculo del RPN	45
Cuadro 12. Listado de modos de fallo por RPN	49
Cuadro 13. Hoja de decisión RCM	49
Cuadro 14. Recálculo del RPN después de ejecutar las tareas seleccionadas	51
Cuadro 15. Reclasificación de tareas después del recálculo del RPN	55

## RESUMEN

**TÍTULO:** APROXIMACIÓN DE LA METODOLOGÍA RCM EN EL HORNO CINCO DE CLINKER EN LA PLANTA CAIRO DE CEMENTOS ARGOS S.A.\*

**AUTOR:** Juan Alfonso Tobón Díaz\*\*

**PALABRAS CLAVES:** RCM, mantenimiento, clinker, horno, fmeca.

**CONTENIDO:** El trabajo propuesto tiene por objetivo general ilustrar la metodología *RCM* en el horno cinco de *clinker* de la planta Cairo de Cementos Argos S.A. de tal forma que sirva como patrón metodológico para ser aplicado en cualquier equipo que lo amerite. Además se enuncian las principales normas, metodologías, casas comerciales y grupos de investigación relacionadas con la filosofía *RCM* y se selecciona una metodología internacional unificada para seguir un orden lógico en la realización del análisis *RCM*.

Se realiza una descripción de un horno rotativo de *clinker* y el proceso de *clinkerización* del cemento, igualmente se describen los equipos que componen el horno cinco de clinker de la planta Cairo de Cementos Argos S.A. haciendo énfasis en la función principal. Luego se realiza un análisis de los tiempos de paro y sus causas del horno, mostrando que el 29.5% del tiempo de paro está relacionado con fallas en el molino de carbón de dicho horno y se selecciona este equipo para aplicar la filosofía *RCM*. Posteriormente se realiza un análisis de las funciones y se determinan los modos de falla. A dichos modos de falla se les calcula el *RPN* para priorizar y seleccionar los más críticos. Se seleccionan los tres modos de falla más críticos y se realiza el análisis *RCM* sobre dichos modos de falla, se realiza el ejercicio mental de la ejecución de las tareas propuestas como resultado de dicho análisis y nuevamente se calcula el *RPN* para los modos de falla, mostrando como cambia la criticidad de los modos de fallo del molino de carbón del horno cinco de la planta Cairo de Cementos Argos S.A.

Finalmente el trabajo muestra las conclusiones, que evidencian el cumplimiento del objetivo general del trabajo y los hallazgos realizados de aplicación de la filosofía *RCM*.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería. Director Luis Alberto Mora Gutiérrez

## ABSTRACT

**TITLE:** APPROXIMATION OF THE METHODOLOGY IN THE OVEN RCM CLINKER FIVE IN THE PLANT OF CAIRO CEMENTOS ARGOS S.A.\*

**AUTHOR:** Juan Alfonso Tobón Díaz\*\*

**KEYWORDS:** RCM, maintenance, clinker, kiln, fmeca.

**CONTENT:** The proposed work aims to illustrate the general RCM methodology in the number five kiln clinker plant in Cairo Cementos Argos SA in order to serve as a standard methodology to be applied to any worthy equipment. It also outlines the main rules, standards, methodologies, commercial and research groups related to the RCM philosophy and an unified international methodology is selected to follow a sequence in the analysis RCM.

It is presented a description of a rotary kiln for clinker and cement clinkerization process, it also describes the equipments that make up the number five kiln for clinker in the plant of Cementos Argos SA Cairo, emphasizing in the main function. After, it is analyzed the break off and the causes of homo, showing that 29.5% of the time of break off is related to faults in the coal mill kiln and is selected this equipment to apply the RCM philosophy. Afterwards it is analyzed the functions and it is identified the failure modes. For these failure modes it was calculated the RPN to prioritize and determine the most criticals. It was selected the three most critical failure modes and were analyzed the RCM on these failure modes, it was executed the mental exercise of the execution of the tasks proposed as a result of this analysis and the RPN is calculated again for the failure modes, showing how changes the criticality of the failure modes of the mill coal kiln number five in the plant of Cementos Argos SA Cairo

At the end of the work it is showed the conclusions, which show the compliance with the overall objective of the work and other related to the information collected and the findings of application of the RCM philosophy.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería. Director Luis Alberto Mora Gutiérrez

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (*RCM*) es un tema que por su extenso contenido y abundante bibliografía es compleja su implementación (Kelly, 1998).

El área de mantenimiento es cambiante y prueba las actitudes y habilidades en todas las otras ramas de la industria. Las personas de mantenimiento tienen que adoptar una nueva forma de pensar y de actuar tanto como ingenieros como administradores. Al mismo tiempo, las limitaciones de los sistemas de mantenimiento son cada vez más aparentes, sin importar cuánto estén sistematizadas (Moubray, 1992, 10).

La metodología para recopilar la información, es identificar cuáles son las fuentes principalmente usadas como consulta en el ámbito industrial, para luego poder recolectar información que integra no solamente las fuentes actuales sino también las que sirven de soporte a éstas.

La metodología usada también incluye la consulta de libros de gestión de mantenimiento, libros sobre la implementación del *RCM*<sup>1</sup>, normas internacionales, publicaciones de grupos de trabajo especializados en la administración del mantenimiento, como es el caso del grupo Esreda, y también información encontrada en páginas de Internet, al igual que los manuales de equipos y el sistema de información que se utiliza en la planta Cairo de Cementos Argos S.A.

Las técnicas, normas y documentos utilizados en el desarrollo de este proyecto no sólo incluyen la recopilación de la bibliografía más relevante a nivel mundial que existe sobre este tema, sino también el material más reciente en el medio del mantenimiento industrial internacional como es el caso de las normas de la *SAE*<sup>2</sup>. La aproximación de la metodología *RCM* comienza con la selección de un modelo de implementación unificado que permita seguir un orden lógico de pasos y evitar confusiones causadas por la gran variedad de literatura existente.

El desarrollo del modelo muestra la información que se genera del análisis bajo la metodología *RCM* de un equipo que compone el horno cinco de *clinker* y que sirve como patrón metodológico para hacer dicho análisis en los demás equipos que componen el horno.

---

<sup>1</sup> *Reliability Centered Maintenance* – Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

<sup>2</sup> *SAE- The Engineering Society for Advancing mobility land sea air and space.*- Sociedad de ingeniería para el avance de la movilidad en tierra mar aire y el espacio.

La ejecución de este trabajo consta de cuatro capítulos en los cuales el primero describe las metodologías, casas comerciales y grupos de investigación relacionados con la metodología *RCM* y la metodología seleccionada para la aproximación. El segundo capítulo describe los equipos que componen el horno cinco de *clinker* ( HC5) de la planta Cairo de Cementos Argos S.A. con énfasis en sus funciones. En el tercer capítulo, se realiza una fundamentación teórica y conceptual sobre el mantenimiento centrado en confiabilidad y se muestra como se hace el análisis *RCM* sobre el subsistema que se selecciona y finalmente el cuarto capítulo muestra las conclusiones derivadas del análisis *RCM* y de la literatura consultada.

## 1.2 CEMENTOS ARGOS

Cementos Argos S.A., es una empresa dedicada a la producción, comercialización y distribución de cementos, concretos, agregados, prefabricados, cales, reforestación, explotación de carbón y servicios de operación logística, donde uno de sus negocios más importantes es la producción de cementos con un 51 % de participación en el mercado colombiano y con inversiones en Venezuela, Panamá, Haití, República Dominicana y Estados Unidos. Es considerado como el quinto productor de cemento en América latina con exportaciones de cemento y clinker a 27 países del Caribe, centro, norte y sur América y además es el sexto productor de concretos en los Estados Unidos (argos@,2008).

**Figura 1. Ubicación geográfica de la planta Cairo**



Fuente: Informe ambiental

Sus ingresos provienen en un 50% del cemento, el 45% de concretos, geográficamente sus ingresos provienen en un 50% de Colombia y un 45% de Estados Unidos.

La planta “El Cairo” de Cementos Argos está ubicada en el departamento de Antioquia a 68 Km. al sur de Medellín en el Km. 9 de la vía que conduce de Santa Bárbara a Abejorral. Es una de las plantas más antiguas y pequeñas de la compañía con una producción promedio de 288.000 toneladas de cemento al año que equivalen al 2.4% de la producción de cemento de Argos. En esta planta se despacha cemento en sacos de 50kg o a granel en camiones llamados pipas con una capacidad de 30 a 35 toneladas de cemento.

La planta cuenta con una cantera propia de donde se extrae la materia prima para la elaboración de cemento, la cual está ubicada a 15 minutos de la fábrica en el municipio de Abejorral y es la única planta cementera en Colombia con mina subterránea. En este lugar se encuentran los equipos y las instalaciones necesarias para extraer la materia prima, triturarla, molerla y despacharla en forma de pasta a través del pasto ducto. En fábrica, la pasta es recibida, homogenizada y alimentada a dos hornos donde se produce el clinker, uno de los materiales principales para la fabricación de cemento. La fábrica cuenta con todas las instalaciones necesarias para producir cemento y despacharlo en sacos o a granel a los diferentes clientes en Antioquia, Chocó, el eje cafetero y Córdoba (argos@,2008).

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La compañía Cementos Argos S.A. ha cambiado dramáticamente desde la fusión de once plantas cementeras, pasando de compañías diferentes que compiten entre sí a una sola sólida empresa que aprovecha las sinergias de dicha unión. Dentro de ese cambio, la vicepresidencia técnica ha desplegado un modelo de mantenimiento que debe ser aplicado en todas las plantas que compone la compañía y que esta soportado por tres áreas llamadas: Planeación, ejecución, y confiabilidad.

El área de confiabilidad es una figura nueva dentro de la cultura empresarial de la empresa, además de la complejidad de equipos como el horno de *clinker* y las mayores exigencias en productividad a bajos costos de operación así como los estándares de clase mundial hacia los cuales Cementos Argos S.A. apunta, incentivan la implementación de la metodología *RCM* como método para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos.

## 1.4 OBJETIVOS

**1.4.1 General.** Ilustrar la metodología *RCM* en el horno cinco de clinker - HC5 - de la planta Cairo de Cementos Argos S.A.

### 1.4.2 Específicos

- Identificar las principales metodologías de *RCM* como metodología de mantenimiento, para adaptar sus criterios y desarrollarlos en un elemento, para una función con dos fallas y tres modos de falla en el horno cinco de clinker como patrón metodológico.
- Describir las principales características técnicas del HC5, con énfasis en las funciones del equipo y sus principales componentes, con el fin de presentarlas en el siguiente objetivo.
- Ilustrar la metodología *RCM* adaptada al equipo HC5, en una función crítica con dos fallas y tres modos de falla, evaluando los parámetros de: Función, falla funcional, modo de falla, *RPN*<sup>3</sup> (Severidad, detectabilidad y ocurrencia), asignación de tipo de tareas de mantenimiento, jerarquización lógica de ejecución, nueva evaluación de *RPN* después de ejecución y finalmente análisis integral del resultado.
- Analizar la ilustración *RCM* en el HC5, para organizar las diferentes tareas (planeadas o no) de mantenimiento, con el propósito de mejorar su disponibilidad.

---

<sup>3</sup> Risk Priority Number – Numero de Riesgo Prioritario

## 2. METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD

### 2.1 OBJETIVO

Identificar algunas de las metodologías de *RCM* como metodología de mantenimiento, para adaptar sus criterios y desarrollarlos en un elemento, para una función con dos fallas y tres modos de falla en el horno cinco de clinker como patrón metodológico.

### 2.2 INTRODUCCIÓN

El capítulo comienza con la historia de los inicios de la metodología *RCM* en la industria aeronáutica y su posterior aplicación en la industria en general, luego se describen algunas de las metodologías, normas, casas comerciales que enuncian los principios de la filosofía de *RCM* de tal forma que el lector pueda entender las fortalezas y debilidades de cada una de éstas.

Al final del capítulo se habla sobre una metodología unificada que reúne todos los pasos de las diferentes fuentes, para la implementación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad, la cual se emplea más adelante en el tercer capítulo.

### 2.3 DESARROLLO

La historia de la metodología *RCM* está ligada a la evolución de la seguridad en la industria aeronáutica y es en esta industria donde surge y toma forma, convirtiendo la aviación comercial en la forma segura de viajar.

**2.3.1 Historia del *RCM*.** La metodología *RCM* se define como un proceso utilizado para determinar que se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual (Moubray, 1998, 3).

La metodología de mantenimiento en la industria aeronáutica antes de la aparición del *RCM*, se enfoca en realizar reparaciones periódicas antes que comience el desgaste. Inicialmente se asumen unos periodos de tiempo determinados para realizar dichas reparaciones, pero al analizar los resultados y constatar que la estrategia no mejora el desempeño de los equipos y que las fallas siguen apareciendo. Se decide entonces reducir los tiempos entre reparaciones pero el resultado obtenido es el mismo o peor (Tijuana@,2008)<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> <http://www.industrialtijuana.com/pdf/B-5.pdf>

Las aerolíneas norteamericanas comprenden entonces que sus filosofías de mantenimiento no solo son costosas sino también altamente peligrosas. Ello inspira a la industria a aunar una serie de grupos denominados *MSG*<sup>5</sup> para examinar todo lo que ellos estaban haciendo para mantener sus aeronaves operando. Estos grupos se conformaron con representantes de los fabricantes de aeronaves, las aerolíneas y la Fuerza Aérea Norteamericana (*maintenance technology@*)<sup>6</sup>.

El *RCM* es uno de los procesos desarrollados durante 1960 y 1970 con la finalidad de ayudar a las personas a determinar las políticas para mejorar las funciones de los activos físicos y manejar las consecuencias de sus fallas. De estos procesos el más efectivo es *RCM*.

En 1974, el departamento de defensa de los Estados Unidos comisiona a *United Air Lines* para preparar un informe sobre los procesos usados por la industria de la aviación para elaborar programas de mantenimiento para los aviones. El informe resultante se denomina Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (Moubray, 2004, 222).

El informe es elaborado por Stanley Noulund y Howard Heap y es la culminación de 20 años de investigación y experimentación con la aviación comercial de Estados Unidos, un proceso que genera inicialmente el documento presentado en 1968, llamado Guía *MSG-1*, Manual: Evaluación del Mantenimiento y Desarrollo del Programa, y el documento presentado en 1970: *MSG-2* Planeación de Programas de Mantenimiento para Fabricantes / Aerolíneas (223).

La filosofía innovadora, permite que el *MSG-2* sea usado como base para desarrollar el *MSG-3* el cual es promulgado en 1980: Documento para la Planeación de Programas de Mantenimiento para Fabricante / Aerolíneas (*maintenance technology, @*).

El reporte de Nowlan y Heap, ha sido usado desde entonces como base para varios modelos de *RCM* de tipo militar y para aquellas actividades no relacionadas con la aviación, tales como la industria naval, energía, minería y otras.

**2.3.2 Metodologías RCM.** A continuación se enuncian algunas de las casas comerciales, grupos de investigación o normas relacionados con la filosofía *RCM* que se utilizan en diferentes industrias para reestructurar sus programas de mantenimiento.

---

<sup>5</sup> *MSG– Maintenance Steering Grups* –Grupos de Dirección de Mantenimiento.

<sup>6</sup> <http://www.staff.city.ac.uk/~bonds/technology.htm#FOUNDATION%20OF>

**2.3.2.1 Normas SAE.** La primera norma se establece en 1999 y describe los criterios mínimos y pasos que debe cumplir un proceso de mantenimiento para ser considerado *RCM*. La *SAE* con la norma JA 1011 en la cual se recopilan los procesos y conceptos de tres documentos: El publicado por Nowlan en 1978 llamado Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, la norma *MIL-STD-2173* de la aviación naval americana y el libro de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad de John Moubray. En esta norma se definen todos los términos usados y se plantean las siete preguntas básicas que deben ser desarrolladas para realizar su implementación. Más tarde en el año 2002 se emite la norma JA 1012, la cual es un complemento de la norma JA1011 y en donde se explican con más detalles los elementos claves del proceso *RCM* y como pueden combinarse para seleccionar las políticas apropiadas para manejar los modos individuales de falla y sus consecuencias (Posada y otros, 2003,27).

**2.3.2.2 Aladon Ltda.** Esta es una firma de consultoría dedicada a la asesoría en implementación de procesos *RCM* en mantenimiento, la cual a través de diferentes publicaciones en la red, el curso público de formación de tres días y diferentes publicaciones realizadas por su fundador John Moubray, como su libro *RCM // Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*, establece y enuncia los pasos necesarios para una exitosa implementación de esta metodología y conserva los principios fundamentales contemplados en el documento elaborado por Noulard y Heap (Aladon@,2008)<sup>7</sup>.

**2.3.2.3 Grupo de investigación ESReDA.** La asociación europea de seguridad, de la confiabilidad y de los datos (*ESReDA*) se establece en 1992 para promover la investigación, el uso y el entrenamiento en la confiabilidad, la disponibilidad, la capacidad de mantenimiento y la seguridad. La asociación proporciona un foro para el intercambio de la información, los datos e investigación actual en seguridad y confiabilidad. De sus investigaciones se genera el libro *Maintenance Management Handboock* en donde profundizan sobre la filosofía *RCM* y realizan un resumen de los pasos para su implementación basándose en el análisis *FMECA*<sup>8</sup> (*ESReDA*)<sup>9</sup>.

**2.3.2.4 Norma MIL-STD-2173 (AS).** Esta norma emitida en 1980 fundamenta todo proceso *RCM* en la fuerza aérea norteamericana y que tiene como objetivos, proveer procedimientos estandarizados para el análisis de los requerimientos de mantenimiento para cada modelo y tipo de avión, justificar objetivamente cada requerimiento de mantenimiento y fortalecer el desempeño en solo las acciones de mantenimiento justificadas (Posada y otros,2003,27).

---

<sup>7</sup> <http://www.aladon.com/>

<sup>8</sup> *FMECA – Failure Mode effect criticality Analysis* –Análisis de Modos de Falla y evaluación de Consecuencias.

<sup>9</sup> (*ESReDA*@,2007) - pagina de internet <http://www.esreda.org>

**2.3.2.5 Grupo de investigación OREDA.** OREDA es el proyecto de una organización patrocinada por nueve compañías productoras de petróleo y gas, con operaciones mundiales. El propósito principal de OREDA es recoger e intercambiar datos de confiabilidad entre las compañías, a través de un foro para la coordinación y la gerencia de la recolección de datos de confiabilidad dentro de la industria del petróleo y del gas. OREDA ha establecido un banco de datos comprensivo con confiabilidad y datos del mantenimiento para el equipo de la exploración y de producción de una variedad amplia de áreas, de instalaciones, de tipos de equipos y de condiciones de funcionamiento geográficos. Se cubre principalmente el equipo submarino y el de superficie costa afuera. Sin embargo, el equipo terrestre también se incluye. Los datos de OREDA se almacenan en una base de datos, y un software especializado que han desarrollado para recoger, recuperar y para analizar la información, con el fin de mejorar la confiabilidad de los equipos, la seguridad y su mantenimiento (*Sintef@*,2007)<sup>10</sup>.

**2.3.2.6 Mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM.** A mediados de 1970 Stanley Nowlan y Howar Heap de *United Airlines*, realizan un informe para el departamento de defensa de los EE.UU. sobre las acciones en mantenimiento realizadas por la industria de la aviación. Dicho informe es llamado: "Mantenimiento centrado en la confiabilidad" y es un mejoramiento de la metodología propuesta en el MSG-2. Este informe es utilizado como base para realizar el MSG-3 el cual fue promulgado en 1980 y que es ampliamente utilizado en la industria aeronáutica debido a que es desarrollado para este tipo de industrias (*maintenance technology@*,2008).

**2.3.3 Comparación entre metodologías.** La comparación entre sí de cada una de estas propuestas muestra que tienen puntos en común, sin embargo la que más ventajas ofrece desde el punto de vista de un usuario con pocos conocimientos en el tema, son las normas SAE en especial la JA 1012 debido a que esta muestra al usuario todas las etapas y todos los pasos necesarios para implementar de manera exitosa la metodología RCM y explica con más detalle los conceptos clave del proceso. Las otras metodologías pueden ser usadas como complemento y apoyo. Sin embargo, se tiene la dificultad de que todas no tienen el mismo orden ó la profundidad requerida, lo cual puede causar confusiones en el lector (Posada y otros, 2003, 31).

**2.3.4 Metodología RCM a utilizar.** Las metodologías RCM tienen puntos en común, pero al momento de realizar su implementación no conservan el mismo orden. Por tal motivo se hace útil contar con un patrón internacionalizado para la aplicación industrial del RCM. Dicho modelo debe describir los pasos, las etapas, los elementos, las actuaciones empresariales, las tareas de las personas y todo aquello que se requiere para la adecuada implementación de la metodología (Posada y otros, 2003, 27).

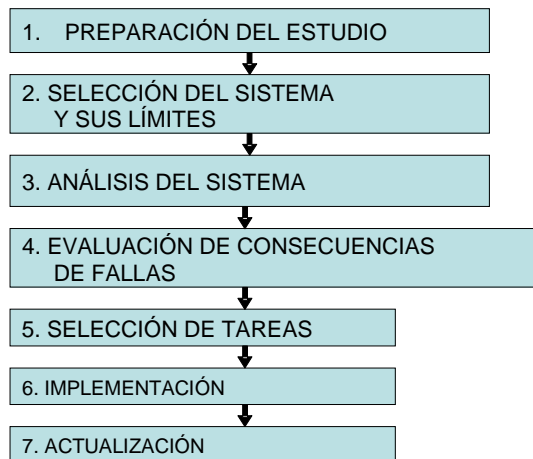
---

<sup>10</sup> *Offshore REliability DATa-* Datos de confiabilidad costa afuera

Para efectos del alcance de este trabajo se utiliza como apoyo una metodología Internacional Unificada desarrollada por Leonardo Posada Hurtado y otros, para seguir un orden lógico coherente y estandarizado del proceso de análisis *RCM*.

**2.3.5 Metodología internacional unificada.** De acuerdo a lo propuesto por este modelo, el proceso *RCM* está compuesto por siete pasos a seguir:

**Figura 2. Secuencia lógica de pasos del modelo**



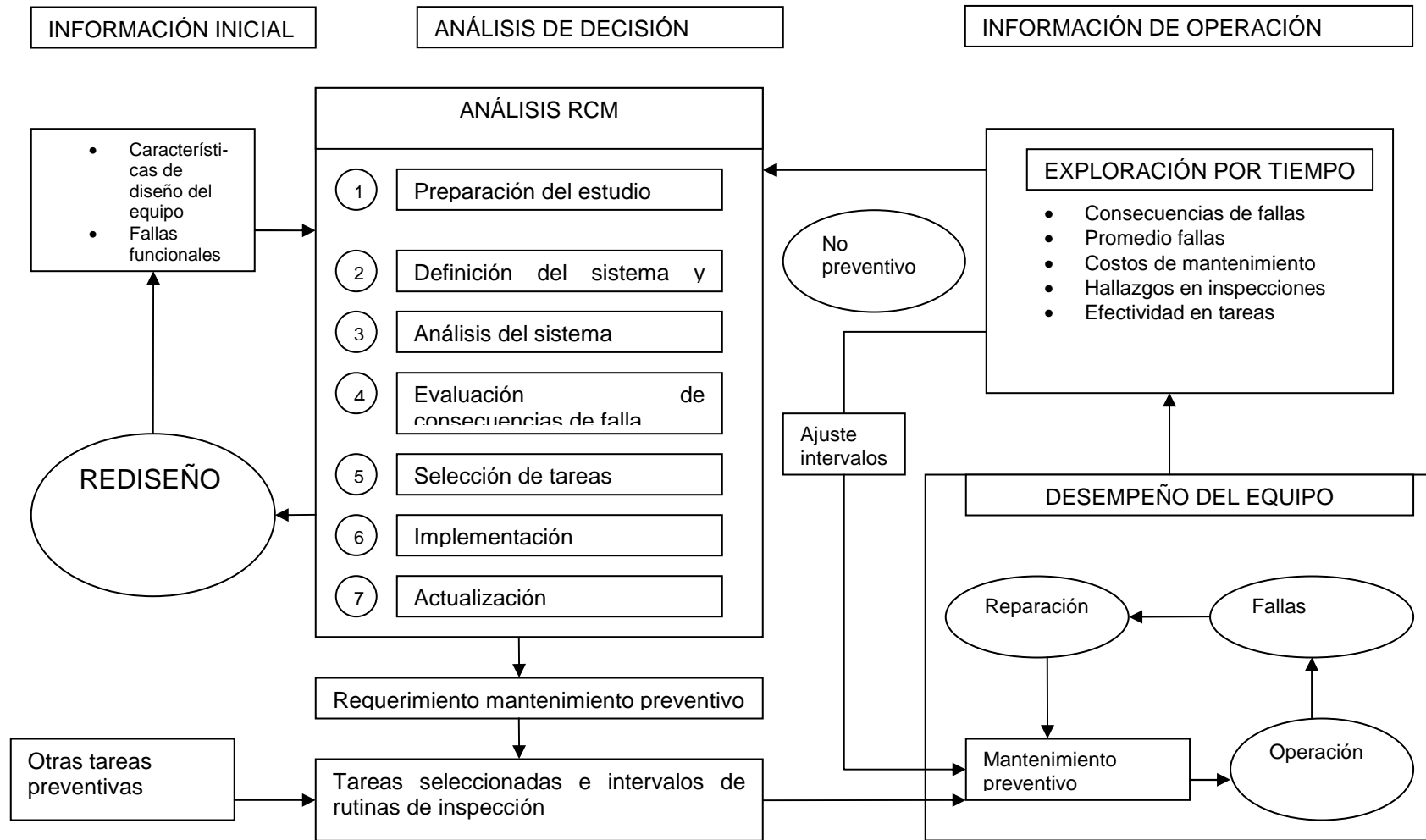
Fuente: Posada y otros, 2003, 35

Cada paso se concluye satisfactoriamente al recopilar la información requerida y tomar las decisiones pertinentes. La información y las decisiones tomadas deben ser documentadas de manera que siempre esté disponible y sea aceptada por el usuario del activo (*SAE JA 1011, 1999, 3*).

El proceso global de *RCM* se divide en tres etapas que son:

1. Información inicial
2. Análisis de decisión
3. Información de operación

**Figura 3. Proceso global del RCM**



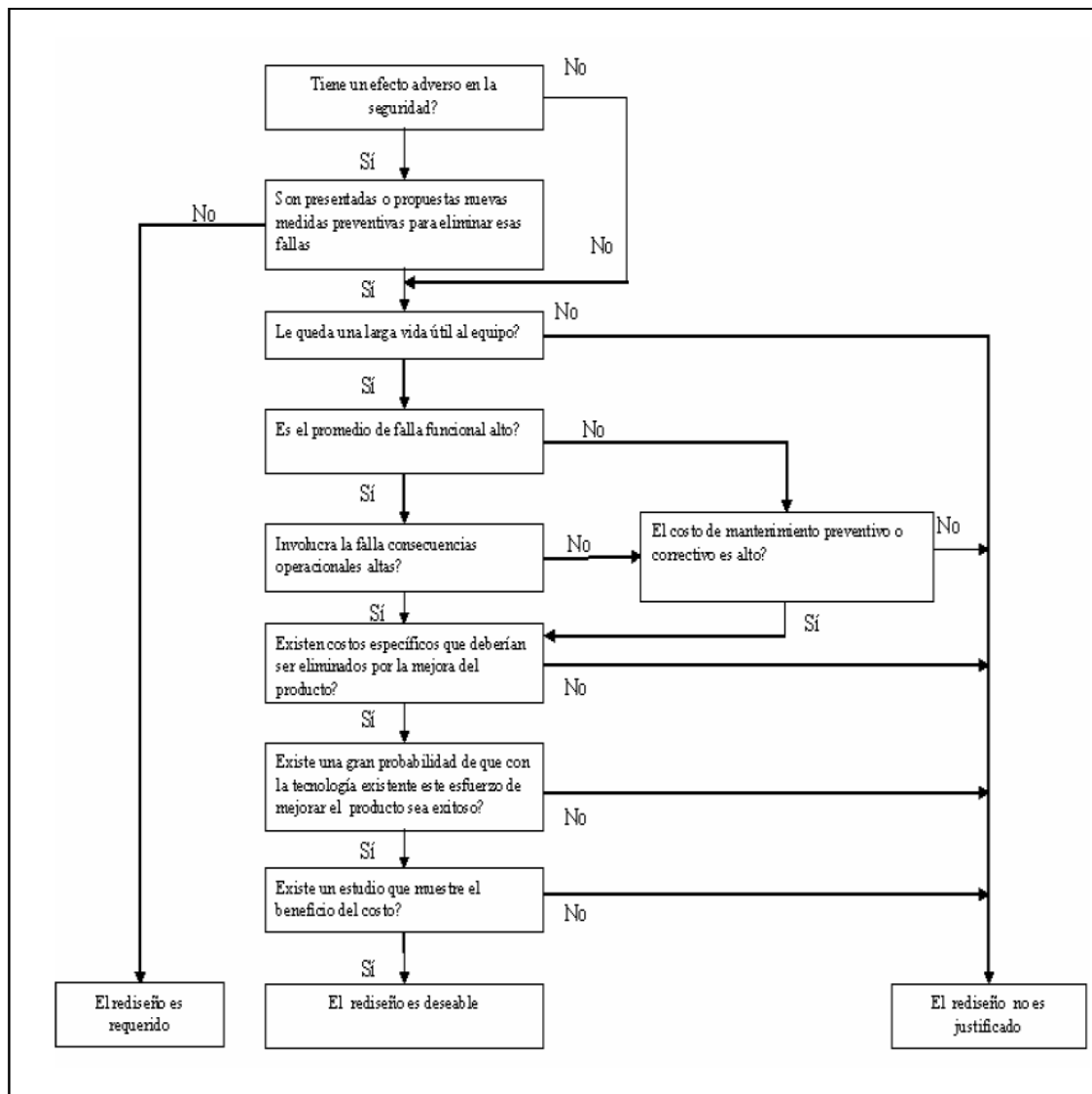
Fuente: MIL2173, 1986, 16

**2.3.5.1 Información inicial.** La información inicial, es el punto de partida para el análisis *RCM* y en éste se recoge la siguiente información:

- Las características de diseño del equipo
- Fallas funcionales
- Elementos importantes

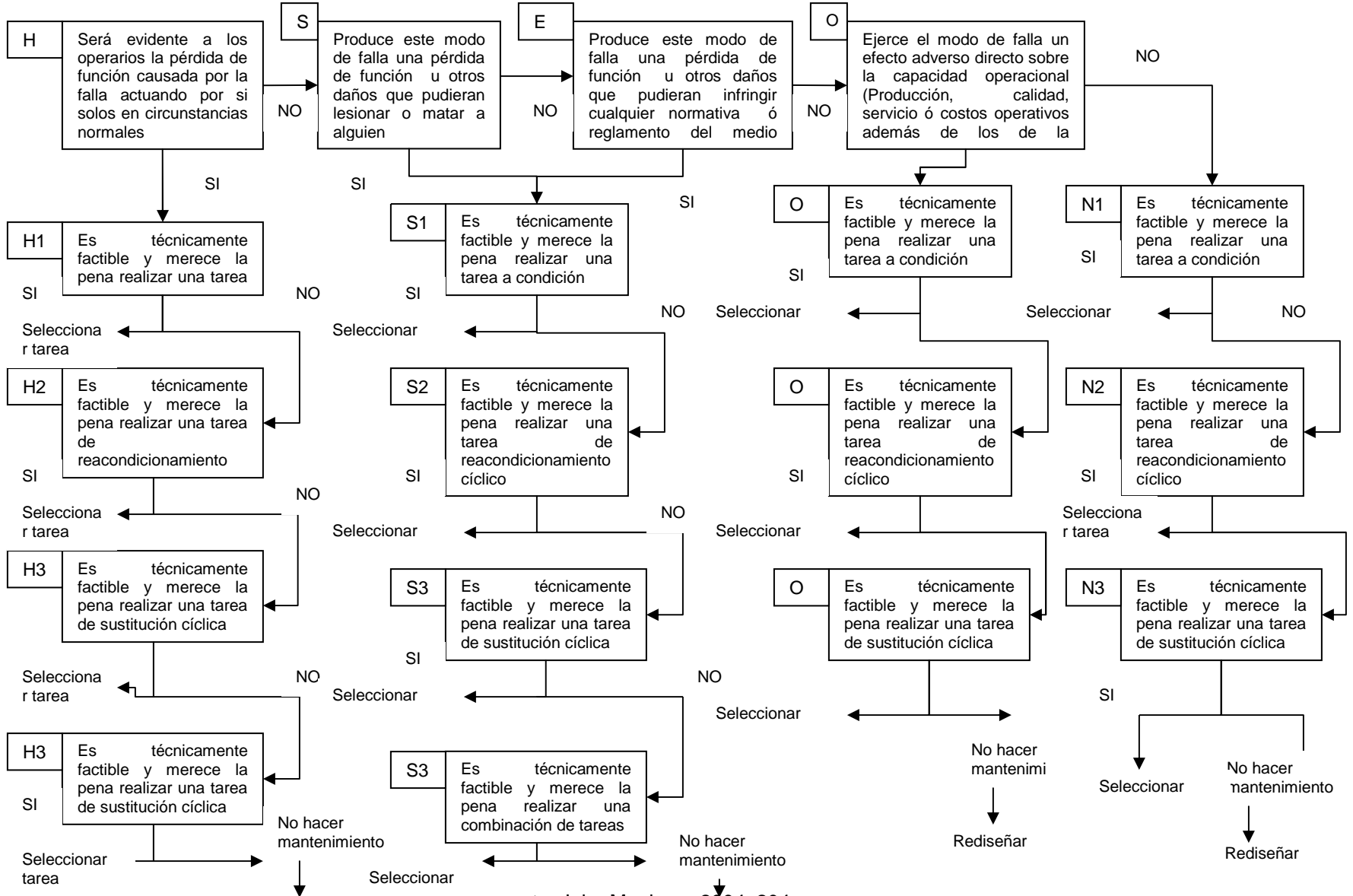
La etapa de rediseño entra en consideración si el diagrama de decisión de tareas no arroja ningún resultado satisfactorio. El proceso global del *RCM* contempla que se debe entrar en esta fase una vez se haya realizado el siguiente diagrama:

**Figura 4. Proceso Global del *RCM***



Fuente: MIL 2173, 1986, 96

**Figura 5. Diagrama de decisión para la selección de tareas**



Fuente: John Moubray, 2004, 204

**2.3.5.2 Análisis de decisión RCM.** En esta etapa se realiza todo el proceso de análisis de los activos para posteriormente definir la confiabilidad y hacer la evaluación de tareas e intervalos de inspección (Mora, 2005, 222).

- Análisis del sistema: Se incluye todo el proceso *FMECA* que requiere la definición de los sistemas a ser inspeccionados, las funciones de éstos y las formas como pueden fallar, posteriormente se analiza qué consecuencias pueden tener los fallos tanto en la operación como en la seguridad y el medio ambiente (ntu@,2008)<sup>11</sup>. El proceso de análisis de decisión *RCM* se puede ver con claridad en la 0 paso a paso.

- Evaluación de tareas e intervalos: Incluye la selección de las diferentes tareas propuestas en los pasos de implementación para utilizarlas en los activos. El diagrama de decisión demuestra como se realiza la selección de tareas.

**2.3.5.3 Información de operación.** En este punto se recogen todas las características físicas de los activos para hacer los análisis pertinentes cuando se esté realizando la implementación. Estos incluyen:

- Exploración por tiempo: Se toman todos los registros de historia de máquina para evaluar desempeños.

- Desempeño del equipo: Se consideran todos los aspectos productivos de seguridad y de operación del equipo; en cuanto a reparación, fallas, operación y planes preventivos realizados.

- Ajuste de intervalos: Es una de las etapas posteriores a la evaluación de los equipos, ya que incluye la retroalimentación del comportamiento para cambiar y ajustar los períodos de inspección (Posada y otros, 2003, 42).

## 2.4 CONCLUSIÓN

El desarrollo de este capítulo identifica algunas de las metodologías de *RCM* utilizadas en la industria como metodología de mantenimiento y se hace un resumen de las características de cada una de ellas. Además esboza un modelo unificado de aplicación de la metodología *RCM* que será utilizado como apoyo para desarrollar el alcance de este trabajo.

---

<sup>11</sup> <http://frigg.ivt.ntnu.no/ross/slides/fmeca.pdf>

### 3. HORNO HC5

#### 3.1 OBJETIVO

Describir las principales características técnicas del HC5, con énfasis en las funciones del equipo y sus principales componentes, con el fin de presentarlas en el siguiente objetivo.

#### 3.2 INTRODUCCIÓN

El capítulo describe la estructura lógica de activos en que se clasifica el HC5 como máquina grande y compleja, la función principal de cada uno de los sistemas de dicha estructura y las características de un horno rotatorio para la producción de *clinker* y en particular, se nombran los equipos que componen HC5 y permiten que éste opere y produzca *clinker* de cemento.

#### 3.3 DESARROLLO

En el mundo existen muchas clases de hornos, cada uno de ellos con características específicas y comunes a todos que los hacen más apropiados para ciertos tipos de aplicaciones. A nivel industrial, en la fabricación de *clinker* para la elaboración de cemento ya sea por vía húmeda o seca, el horno utilizado es del tipo rotativo (*kiln@*, 2008)<sup>12</sup>.

**3.3.1 Horno rotativo.** Los hornos rotativos constan de un tubo cilíndrico de acero algo inclinado (de 3 a 5% sobre la horizontal), que en su interior lleva un recubrimiento de material refractario, y a la vez accionado por motores que le permiten girar a razón de 10 metros por minuto. Su diámetro y longitud dependen de la capacidad de producción para la cual fueron proyectados, y del tipo de proceso, es decir si es proceso húmedo o seco. Los hornos pueden tener diámetros de 2 a 6 metros y longitudes de 60 a 200 metros (Johan @,2007).

El horno se calienta con petróleo, carbón pulverizado o gas, que se inyecta con aire por medio de un quemador en la zona más baja (zona de descarga del *clinker*), donde se produce la combustión. Los gases calientes pasan a través de todo el horno y son enviados hacia la chimenea, pasando antes por equipos recuperadores de calor y de polvo (Johan @,2007).

El material crudo se alimenta por la parte superior y gracias al movimiento e inclinación del horno, se va desplazando, encontrándose con zonas de mayor temperatura hasta llegar a la llama, donde se produce la *clinkerización*.

Anexo al horno mismo encontramos los siguientes sistemas:

---

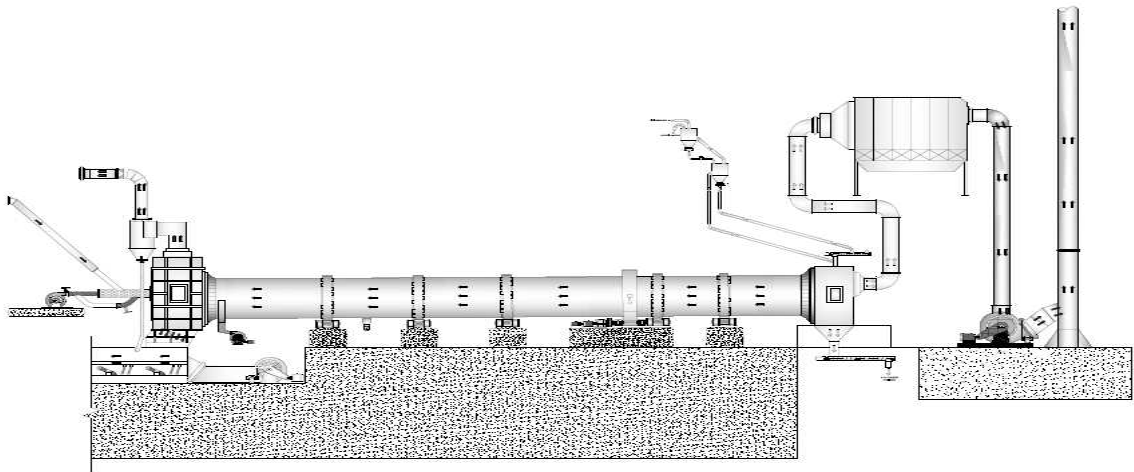
<sup>12</sup> <http://www.mtc.com.my/publication/library/drying/ch22.htm>

- Sistema de alimentación que regula la cantidad de crudo que entra al horno.
- Sistema de preparación e inyección del combustible.
- Sistema de recuperación del calor de los gases.
- Sistema de captación del polvo de los gases.
- Sistema de control y monitoreo de la operación.
- Sistema de alimentación eléctrica de potencia.

A medida que el material avanza por el horno, éste va sufriendo diversas transformaciones.

- Secado o pérdida del agua libre.
- Deshidratación o pérdida del agua combinada.
- Disociación de carbonato de calcio en cal (CaO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Clinkerización o combinación de los diferentes óxidos para formar silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de los cuales componen químicamente el clinker (Historia@, 2008)<sup>13</sup> (Johan @, 2007)<sup>14</sup>.

**Figura 6. Esquema horno de *clinker* vía húmeda**



Fuente: Flujograma informe

**3.3.2 El HC5.** El HC5 es el horno de clinker de cemento fabricado por la casa *Allis Chalmers*<sup>15</sup>, con 11 pies de diámetro y 375 pies de longitud, soportado sobre cinco bases de concreto cada una con dos rodillos de carga de 48 pulgadas de diámetro. Tiene una inclinación de 3/8 de pulgada por cada pie de longitud y una

<sup>13</sup> <http://www.mtc.com.my/publication/library/drying/ch22.htm>

<sup>14</sup> <http://johan.jmc.utfsm.cl/pi/Cementodoc1.PDF>

<sup>15</sup> Fabricante de hornos <http://www.a-cequipment.com/company/default.asp>

velocidad máxima de una revolución y media por minuto. Es accionado por un motor de 150 h.p. mediante un reductor de velocidad marca *jhons* sistema de transmisión por piñón de ataque y catalina, ubicado en la cuarta base<sup>16</sup>.

Cementos Argos considera los hornos de *clinker* como equipos grandes y complejos, por tal razón ha definido una estructura lógica para la identificación de activos para dichos equipos, de tal manera que los cuatro primeros dígitos identifican el proceso, las tres letras siguientes identifican el sistema y los últimos tres dígitos identifican el subsistema.

**3.3.5 Sistema horno 5 clinker.** El HC5 de la planta Cairo pertenece al sistema horno 5 *clinker* identificado con el código lógico 00204HO5, el cual a su vez está conformado por seis subsistemas cada uno con una serie de equipos con una función principal para la cual fueron adquiridos e instalados. Dentro de esta estructura lógica de codificación existe la figura proceso, la cual agrupa los sistemas y subsistemas y es la de mayor jerarquía dentro de las plantas que conforman la compañía Cementos Argos.

El HC5 requiere para su correcta operación y funcionamiento de equipos auxiliares y periféricos, los cuales se han agrupado bajo los procesos preparación de combustible cemento identificado con el código lógico 00207 y el proceso servicio auxiliar directo identificado con el código lógico 00208.

El sistema molienda de carbón identificado con el código lógico 00207MA pertenece al proceso molienda de carbón cemento. Este sistema, está directamente relacionado con el sistema horno 5 *clinker* ya que se encarga de procesar el carbón requerido para el funcionamiento de dicho horno.

Los sistemas suministro de energía, manejo de agua, aire comprimido, sala de control, son esenciales ya que soportan la operación y funcionamiento del HC5 a través de las funciones primarias de los equipos que componen cada sistema.

Después del sistema *clinkerización* continúa el sistema transporte el cual se encarga de llevar el clinker desde el horno hasta el salón de clinker.

---

<sup>16</sup> Oferta y contrato No C-9087 de ALLIS CHALMERS.

**Cuadro 1. Procesos sistemas y subsistemas relacionados con el HC5**

COD	PROCESO	COD	SISTEMA	COD	SUBSISTEMA
00204	CLINKERIZACIÓN	HO5	HORNO 5 CLINKER	008	ALIMENTACIÓN
				025	CLINKERIZACIÓN
				040	ENFRIAMIENTO
				032	DESEMPOLVAMIENTO
				075	OBRA CIVIL
				038	ELÉCTRICO Y CONTROL
00207	PREPARACIÓN COMBUSTIBLE - CEMENTO	MA5	MOLIENDA CARBÓN 5	008	ALIMENTACIÓN
				068	MOLIENDA
				113	TRANSPORTE
				075	OBRA CIVIL
				038	ELÉCTRICO Y CONTROL
00208	SERVICIO AUXILIAR DIRECTO	SUE	SUMINISTRO ENERGÍA	041	ENTRADA
				080	PLANTA EMERGENCIA
				107	SUBESTACIÓN
				095	RED TRANSF DISTRIBUCIÓN
				075	OBRA CIVIL
				038	ELÉCTRICO Y CONTROL
		MAA	MANEJO AGUA	009	ALMACENAMIENTO
				090	RED AGUA INDUSTRIAL
				091	RED AGUA POTABLE
				092	RED AGUA RESIDUAL
				093	RED CONTRA INCENDIO
				075	OBRA CIVIL
		AIC	AIRE COMPRIMIDO	006	AIRE ALTA PRESIÓN
				007	AIRE BAJA PRESIÓN
				075	OBRA CIVIL
				038	ELÉCTRICO Y CONTROL
		SAC	SALA CONTROL	098	SALA DE CONTROL
				075	OBRA CIVIL
				038	ELÉCTRICO Y CONTROL

Fuente: Creación propia

**3.3.3.1 Subsistema alimentación.** La función principal de este subsistema, es ser capaz de alimentar 27.37 metros cúbicos por hora de pasta, con un 35% de humedad, al HC5 para ser procesada y está compuesto por los siguientes equipos:

Alimentador directo de pasta que consta de una válvula y un medidor de flujo para control y medición de la alimentación de pasta.

Mezclador de pasta que se encarga de mezclar el material particulado proveniente del electro filtro con la pasta y retornarlo al proceso.

### Figura 7. Subsistema de alimentación



Fuente: Creación propia

**3.3.3.2 Subsistema clinkerización.** La función principal de este subsistema es *clinkerizar* el material crudo ó pasta a una temperatura de 1200 grados centígrados y se compone de los siguientes equipos:

**Cuadro 2. Equipos que componen el subsistema clinkerización**

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Potencia</b>
Ventilador de descarga	<i>Chicago blowers</i>	4468 cfm <sup>17</sup>	Motor de 180 hp <sup>18</sup>
Horno de clinker	<i>Allis Chalmers</i>	470 tpd	Motor de 200 hp
Reductor accionamiento horno	<i>Jones modelo 2003 HKD</i>	240 hp	Motor de 200 hp
Ventiladores de virolas	<i>Siemens modelo 2CC1714-5YB6</i>	295 cfm	Motor de 5 hp
Ventilador de tiro	Ingeaire tipo centrífugo	3500 cfm	Motor de 200 hp
Quemador dual	Indisa	500 tpd	--
Centro control motores	--	--	--

Fuente: Creación propia

**Figura 8. Subsistema clinkerización**



Fuente: Creación propia

<sup>17</sup> cfm- cubil Feet per minute – pies cúbicos por minuto.

<sup>18</sup> hp – Horse Power – Caballos de potencia.

**3.3.3.3 Subsistema enfriamiento.** La principal función de este subsistema, es reducir rápidamente la temperatura del clinker a 200 grados centígrados, para provocar un temple superficial.

**Cuadro 3. Equipos que componen el subsistema enfriamiento**

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Potencia</b>
Ventilador <i>hurriclon</i>	<i>Whirlex</i> tipo didiw3400rb	75000 cfm	Motor de 168 hp
Ventilador enfriador	<i>whirlex</i> tipo didw5500af	14000 cfm	Motor de 150 hp
<i>Hurriclon</i>	<i>PMT ZYCLON</i> modelo HU 1320ST	75000 cfm y una eficiencia de remisión de material particulado del 95%.	--
Tornillo sinfín <i>hurriclon</i>	DyF	4 tph <sup>19</sup>	Motor de 4 hp
Ventilador despolvamiento	<i>chicago blower</i> tipo centrífugo	800 cfm	Motor de 125 hp
Enfriador de clinker	<i>Allis Chalmers</i> modelo 4'6" por 70' tipo B	500 tpd	Motor de 20 hp
Trituradora de clinker	Sin marca Tipo martillos	500 tpd	Motor de 40 hp
Centro control motores	--	--	--

Fuente: Creación propia

**3.3.3.4 Subsistema despolvamiento.** Este subsistema tiene como función principal reducir la emisión de material particulado hasta un 98% para una corriente de aire de 120000 cfm a 288 grados centígrados con una concentración de material particulado de 12.85 miligramos por metro cúbico y un contenido de humedad del 20%. Los equipos que hacen parte de este subsistema son:

<sup>19</sup> tph – Toneladas Por Hora.

**Cuadro 4. Equipos que componen el subsistema despolvamiento**

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Potencia</b>
Electro filtro diseñado	<i>Envirotech corporation</i>	120000 cfm y una eficiencia de remoción del 98%	--
Tornillo sinfín campo A	DyF	5 tph	Motor de 7.4 hp
Tornillo sinfín campo B	DyF	5 tph	Motor de 7.4 hp
Elevador cenizas	Allis Chalmers modelo CEC 8520	543 cfm	5.5. hp
Tornillo sinfín 1	DyF	3 tph	1 hp
Tornillo sinfín 2 elevador	DyF	4 tph	5.4 hp
Válvula dosificadota tolva	D Y F tipo rotativa de aspas	4 tph	1.3 hp
Tornillo sinfín descarga	DyF	5 tph	4.8 hp
Tornillo sinfín humos	DyF	3.5 tph	1.5 hp
Válvula tornillo sinfín 1	D Y F tipo rotativa de aspas	4 tph	1.3 hp
Centro control motores	--	--	--

Fuente: Creación propia

**Figura 9. Subsistema enfriamiento**



Fuente: Creación propia

**3.3.3.5 Subsistema eléctrico y control.** Como su nombre lo indica este Subsistema está compuesto por equipos eléctricos y electrónicos cuya función principal es recoger información del proceso y enviarla a sala de control para analizarla y tomar acción sobre el proceso. Los equipos que pertenecen a este Subsistema son:

**Cuadro 5. Equipos que componen el subsistema eléctrico y control**

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Potencia</b>
Cámara de video	<i>Diamonds electronics</i>	Lente de 4mm	--
Pirómetro zona de quema	<i>RAYTEC</i>	0 – 1500C	--
Escáner explorador	<i>RAYTEC</i>	500C – 1500C	--
Analizador de gases	<i>TELEDYNE</i>	O:0-25%, CO:0-5%	--
Instrumentación clinkerización	Diferentes marcas	--	--
Instrumentación enfriamiento	Diferentes marcas	--	--
Instrumentación despolvamiento	Diferentes marcas	--	--

Fuente: Creación propia

**3.3.3.6 Subsistema obra civil.** El subsistema obra civil es conformado por todos los edificios que brindan soporte estructural y protección contra el clima a los equipos que se agrupan en el sistema clinkerización, cumpliendo así su principal función.

**3.3.4 Sistema molienda carbón 5.** Este sistema agrupa los subsistemas definidos en la planta Cairo de Cementos Argos que intervienen en el procesamiento del carbón requerido por el sistema horno 5 clinker, al cual pertenece el HC5.

**3.3.4.1 Subsistema alimentación.** Este subsistema tiene como función principal, contener y dosificar el carbón a procesar por el molino de carbón y lo componen los siguientes equipos:

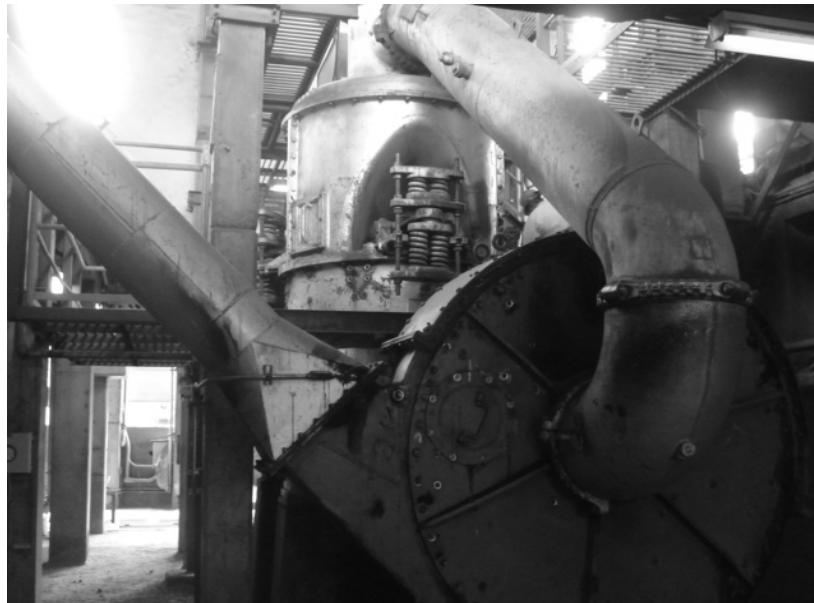
**Cuadro 6. Equipos que componen el subsistema alimentación**

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Potencia</b>
Banda dosificadora	<i>Merrick</i>	15 tph	0.5 hp
Tolva de almacenamiento	--	30 t	--
Válvula dosificadora	<i>Raymond</i>	33 tph	1 hp

Fuente: Creación propia

**3.3.4.2 Subsistema molienda.** Este subsistema es constituido por el molino de carbón propiamente dicho y cuya función principal es pulverizar el carbón para luego ser alimentado al HC5. Este molino marca *Raymond* tiene una capacidad de procesar 10 tph con una potencia de 250 hp.

**Figura 10. Subsistema molienda carbón**



Fuente: Creación propia

**3.3.4.3 Subsistema transporte.** El subsistema transporte del sistema molienda carbón 5, tiene como función recuperar calor del horno y transportar el carbón pulverizado por medio de una corriente de aire caliente que toma del mismo horno; la hace pasar por el molino de carbón y la lleva hasta el quemador dual para realizar la combustión del carbón para alcanzar y mantener las temperaturas del proceso.

### Cuadro 7. Equipos que conforman el subsistema transporte

Equipo	Marca	Capacidad	Potencia
Ventilador aire primario	Raymond	20000 cfm	100 hp
Ciclón de gases calientes	--	90% remoción de material particulado	--

Fuente: Creación propia

**3.3.4.4 Subsistema obra civil.** El subsistema obra civil es conformado por todos los edificios que brindan soporte estructural y protección contra el clima a los equipos que se agrupan en el sistema molienda carbón 5, cumpliendo así su principal función.

**3.3.4.5 Subsistema eléctrico y control.** Como su nombre lo indica este Subsistema está compuesto por equipos eléctricos y electrónicos cuya función principal es suministrar fluido eléctrico para el funcionamiento de los equipos y recoger información del proceso, enviarla a sala de control para analizarla y tomar acción sobre el proceso

**3.3.5 Proceso servicios auxiliares directos.** Este proceso agrupa una serie de sistemas de apoyo que relacionan equipos cuya función está directamente relacionada con la operación y funcionamiento del HC5 y otros equipos de la planta. Estos sistemas son:

- Sistema suministro de energía.
- Sistema manejo de agua.
- Sistema aire comprimido.
- Sistema sala de control.

### 3.4 CONCLUSIÓN

El HC5, es una máquina grande y compleja que debe ser clasificada en una estructura lógica para permitir el análisis de los requerimientos de mantenimiento de cada uno de sus componentes. Además se explica cada uno de los sistemas que forman el proceso de *clinkerización*, su función principal y algunos procesos auxiliares necesarios para la operación correcta del HC5.

## 4. RCM EN EL HC5

### 4.1 OBJETIVO

Ilustrar la metodología adaptada RCM al equipo HC5, en una función crítica, en dos fallas y tres modos de falla.

### 4.2 INTRODUCCIÓN

El capítulo muestra el desarrollo del análisis de la metodología *RCM* aplicada al HC5 a través de la ejecución de los cinco primeros pasos del modelo de implementación de esta metodología esbozada en el capítulo 1.

### 4.3 DESARROLLO

El desarrollo de este capítulo comienza con la preparación del estudio, luego continúa con la selección del sistema a analizar y sus límites, después se realiza el análisis propiamente dicho del sistema en cuestión, la evaluación de las fallas y finaliza con la selección de tareas de mantenimiento. Estos son los primeros cinco pasos del modelo implementación que es utilizado como apoyo para el alcance de este trabajo.

**4.3.1 Preparación del estudio.** El estudio y la comprensión del sistema HC5, sobre el cual se ilustra la metodología *RCM*, se soporta en los diagramas de procesos, en el listado maestro de equipos de la planta Cairo, en el listado de partes y planos del HC5, los programas de mantenimiento preventivo, en el manual de mantenimiento para hornos rotatorios de *FLS*<sup>20</sup>, en la ficha técnica del HC5 y los equipos que conforman el sistema, en el panorama de riesgos asociado a este sistema y el historial de paros y sus causas de dicho horno (Posada y otros,2005,50).

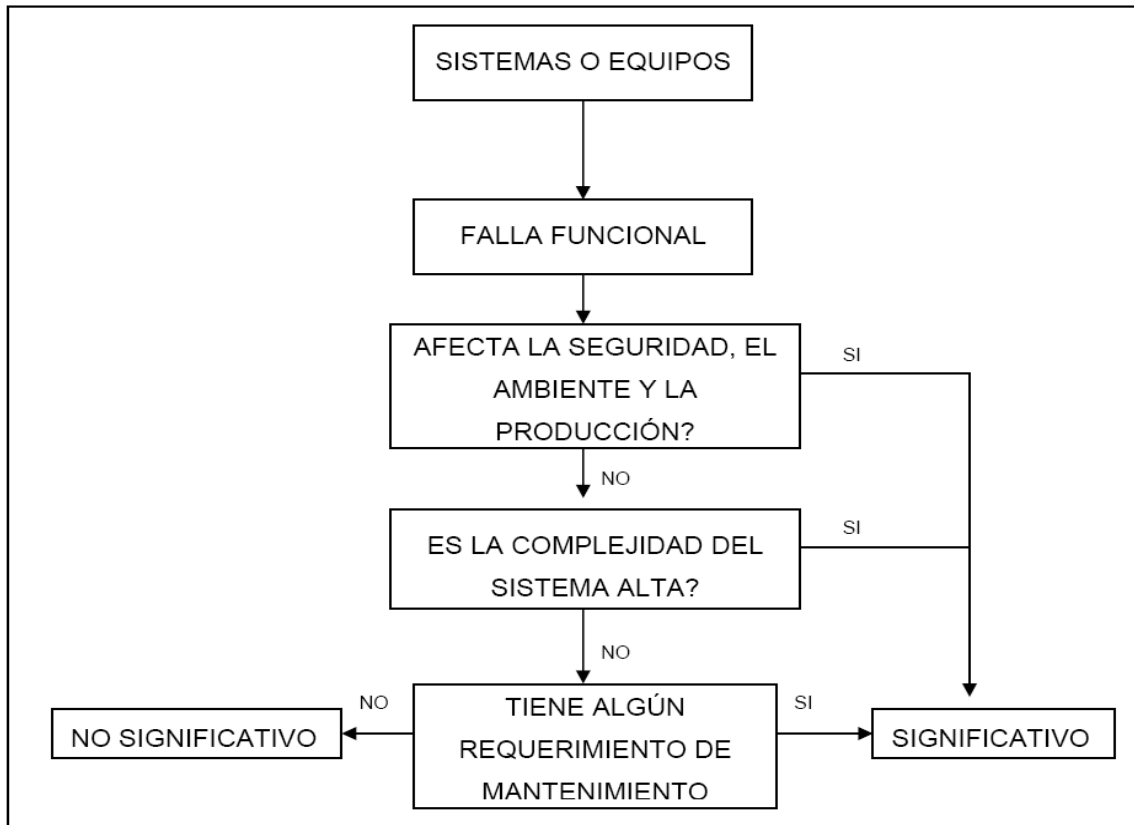
**4.3.2 Selección del sistema a analizar y profundidad del análisis.** El sistema HC5 dentro de la jerarquía establecida en el listado maestro de equipos de la Planta Cairo definido por Cementos Argos, muestra los sistemas que lo componen y sus fronteras, con sus equipos y componentes principales y por tanto se establece que hasta ese grado de profundidad se realiza el análisis de *RCM*.

Para seleccionar el sistema a analizar, se sigue el siguiente diagrama de decisión para la elección de sistemas significativos.

---

<sup>20</sup> Fabricante de hornos para la industria cementera

**Figura 11. Diagrama de decisión para la selección de sistemas significativos**



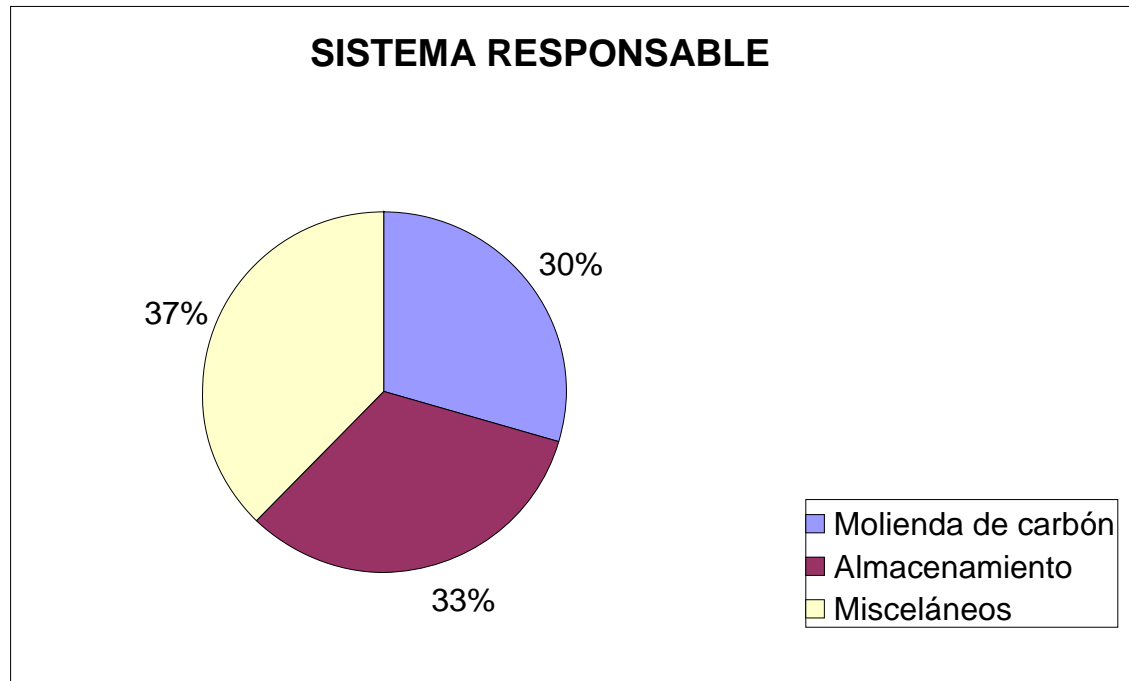
Fuente: MIL 2173, 1986, 18

La aplicación del diagrama para la selección de sistemas significativos sobre el proceso de *clikerización* da como resultado, que todos los sistemas que componen el proceso son significativos, incluyendo los procesos auxiliares y preparación de combustible. Esto obliga a realizar un análisis diferente para determinar un sistema significativo para efecto de la ilustración de la metodología *RCM*.

La información recolectada de los paros y sus causas del HC5, muestra que del total de tiempo de paradas no programadas, el 9.56% corresponde a problemas eléctricos, el 35.44% corresponde a causas mecánicas, el 46.38% obedece a razones de producción y el 8.6% es debido a causas externas a la planta. Al mirar los datos en general por equipos, se observa que el 29.5% del tiempo de paro no programado es debido a problemas en el sistema molienda de carbón del proceso preparación de combustible y el 32.83% es debido a una sola causa de producción denominada salón de clinker lleno, la cual es ajena a mantenimiento. El 37.67% del tiempo restante obedece a causas diversas.

El sistema significativo seleccionado a partir del análisis efectuado es el de molienda de carbón y sobre el cual se ilustrara la metodología *RCM*.

**Figura 13. Análisis de información de paros**



Fuente: Creación propia

**4.3.3 Análisis del sistema.** Los elementos que conforman una máquina cumplen una función específica dentro de los sistemas o subsistemas de los equipos; los que a su vez operan basándose en un estándar de funcionamiento para así lograr un fin determinado de operación (Santamaría, 2003, 62).

La falla hace que un componente trabaje fuera de los estándares establecidos por los fabricantes, por ello es importante utilizar herramientas de manejo de fallas, con previa identificación de las mismas (Sierra, 1999, 62).

Para el análisis del sistema se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La identificación de las funciones del sistema.
- La identificación de fallas funcionales y sus efectos.
- Fallas funcionales y orden jerárquico por criticidad.
- Determinación de componentes críticos.

**4.3.3.1 Funciones.** Son características que el activo debe ser capaz de cumplir y por lo general son más de una, por este motivo las funciones se clasifican en primarias y secundarias, las cuales a su vez tienen otras subdivisiones.

Los activos físicos son adquiridos por las empresas por una sola razón y muy pocas veces por dos o más. Estas razones son descritas por definiciones de funcionamiento. Se conocen como funciones primarias por ser la razón por la cual se adquiere el activo físico. Son las razones por las cuales existe el activo, por lo que deben definirse tan precisamente como sea posible (Moubray, 2004,37).

Las funciones primarias se clasifican así:

- Funciones primarias múltiples e independientes.
- Funciones primarias dependientes o en serie.

El primer tipo de función primaria, es característico de activos que sirven para la fabricación de varios productos y el segundo tipo es típico en activos que deben hacer una función para poder continuar con la otra como robots.

Las funciones secundarias, son el resto de funciones adicionales a las primarias, menos obvias y cuya pérdida puede tener consecuencias serias en la expectativa de operación del activo. Se dividen en siete y el objetivo es evitar que se pasen por alto. Estas son:

- Ecología, integridad ambiental.
- Seguridad, integridad estructural.
- Control, contención, confort.
- Apariencia.
- Protección.
- Eficiencia, economía.
- Superfluas.

Las funciones secundarias pueden generar confusión en el momento de clasificarse, pero en la práctica lo importante es listar todas las funciones que el usuario requiere para que se cumpla su expectativa de operación sobre el activo (46).

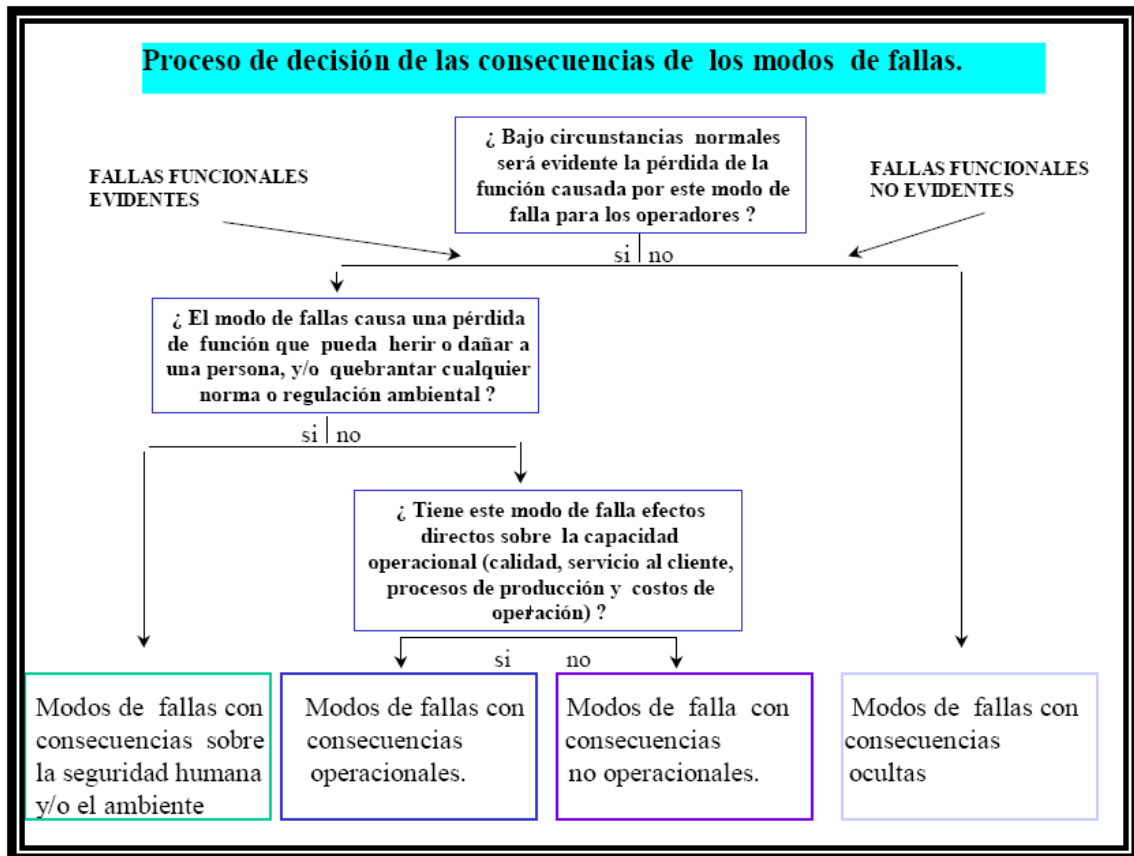
**4.3.3.2 Falla funcional.** La falla se define según la metodología *RCM*, como la incapacidad de cualquier activo de hacer aquello que sus usuarios quieren que haga. Esta definición es demasiado simple ya que la mayoría de los activos tienen más de una función y cada función tiene más de un estándar de funcionamiento deseado. Al ser esto cierto, entonces es posible que fallen todas y cada una de esas funciones y por ende el activo puede ser afectado por diversos estados de

falla diferentes. Por esto es deseable definir la falla como la pérdida de una función específica, más que la falla del activo como un todo. (46).

La falla funcional es un término utilizado por el proceso *RCM* para describir estados de falla, pero esto no es suficiente, es necesario asociar a cada función un estándar de funcionamiento. Por lo tanto una falla funcional se da, cuando un activo es incapaz de cumplir una función según un parámetro de funcionamiento aceptable para el usuario (Aladon, 1998).

**4.3.3.3 Modos de falla.** La metodología *RCM* define que cualquier evento que produzca una falla funcional es un modo de falla. La importancia de esta definición radica en que al conocer los eventos que producen el cese de una función de un activo, permite adelantarse a la falla funcional y por consiguiente estar mejor preparado para hacer lo que deba hacerse para restablecer la función del activo, es decir, que genera proactividad. (Esreda, 2001, 33).

**Figura 13. Diagrama de análisis de sistema**

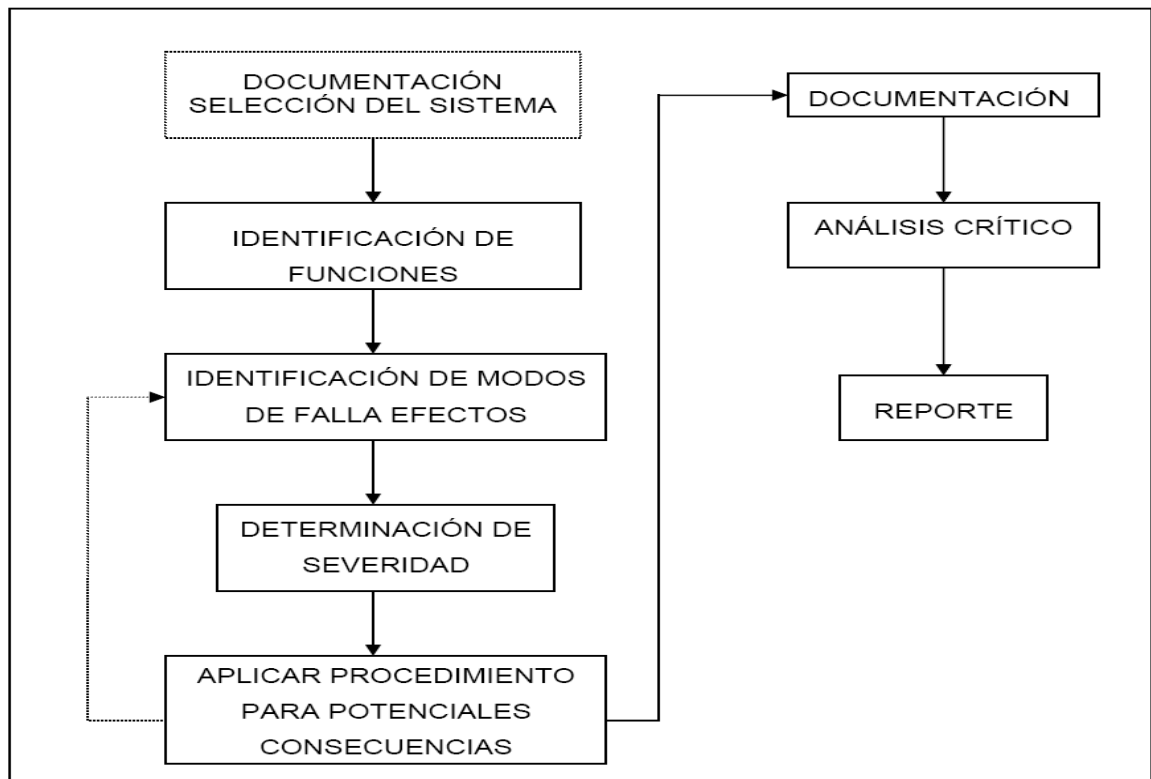


Fuente: Higuera 1999, 59

El diagrama de la 013 muestra el procedimiento necesario para llevar a cabo un completo análisis del sistema paso a paso usando las anteriores consideraciones y el cual es aplicado sobre el sistema molienda de carbón.

El desarrollo de los tres primeros pasos del diagrama mostrado en la 0 da como resultado una tabla, donde se muestran las funciones, las fallas funcionales, los modos de falla y el efecto de las fallas.

**Figura 14. Diagrama de decisión para el análisis del sistema**



Fuente: Esreda, 2001, 40

#### **4.3.4 Definición de funciones, identificación de fallas funcionales y efectos.**

Las funciones que desempeña un activo dentro del contexto operacional, son los factores a tomar en cuenta a la hora de evaluar la criticidad e importancia de cada uno en su normal contexto operacional. Estas son el propósito ó misión en un contexto operacional específico ya que cada activo puede tener más de una función en el contexto operacional (Parra, 1999).

Los criterios que el proceso debe satisfacer para la definición de las funciones son los siguientes:

- Contexto operacional.
- Identificación de las funciones del sistema.
- Estándares de desempeño.
- Informe de funciones.

El contexto operacional del sistema de molienda de carbón se define de la siguiente manera:

El molino de carbón Raymond 573 está ubicado en la plataforma de hornos de la planta Cairo de Cemento argos y opera 24 horas al día durante los siete días de la semana. Este molino debe moler de 0 hasta 10 toneladas hora reguladas de carbón bituminoso con una humedad máxima del 14% el cual entra al molino con una granulometría promedio de ¼ de pulgada y sale con una granulometría promedio del 20% retenido sobre malla 170. Para hacer esto, utiliza una potencia de 250 hp alimentada por fluido eléctrico a 440 voltios y 60 ciclos y debe trasportar el carbón molido por una tubería hasta el quemador del horno, sin equipos de respaldo.

**4.3.5 Metodología para la obtención de la hoja de información RCM.** Las funciones del sistema de molienda de carbón y sus estándares de funcionamiento, las fallas funcionales y los modos de fallas para la aproximación de la metodología RCM en el HC5, se consignan en la hoja de información de RCM en la cual se identifica el sistema, el subsistema bajo análisis y el facilitador responsable por el análisis. Además, se diligencian tres columnas adicionales en donde se codifica cada función, falla y modo de falla, para su identificación de manera abreviada. De esta forma, se presenta la información de manera resumida, clara, organizada y compacta para su análisis. En este paso del modelo se da respuesta a las primeras cinco preguntas que conforman el proceso de análisis RCM:

- ¿Cuáles son las funciones y los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su actual contexto operacional?
- ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?
- ¿Cuál es la causa de cada falla?
- ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla? (Moubray, 2004, 94).

**4.3.6 Fallas funcionales y orden jerárquico por criticidad.** La jerarquización de las fallas funcionales se realiza mediante el cálculo del RPN<sup>21</sup> con el fin de identificar aquellas con mayor criticidad para priorizar los esfuerzos en los equipos que más lo requieren (Mora, 2006, 212).

---

<sup>21</sup> RPN- Risk Priority Number –Número de Riesgo Prioritario.

Ecuacion 1. Cálculo del *RPN*

$$RPN = S \times O \times D$$

Fuente: Mora,2006,219

El valor del *RPN* es el resultado del producto de la severidad por la posibilidad de ocurrencia por la probabilidad de ocurrencia, en donde el cálculo de la severidad se realiza en dos partes, en la primera de ellas se asigna valores probabilísticos a cada criterio y la segunda parte se obtiene por análisis y discusión de las tablas internacionales de valores de los distintos criterios de severidad (Mora,2006,219).

La calificación de la severidad se realiza mediante el concurso de de cinco criterios:

FO – Fallas Ocultas.

SF – Impacto Seguridad Física.

MA – Impacto medio Ambiente.

IC – Impacto Imagen Corporativa.

OR – Costos Reparaciones o Mantenimientos.

OC – Efectos en Clientes.

Ecuacion 2. Cálculo de severidad

$$\text{Severidad} = FO \times K_{FO} + SF \times K_{SF} + MA \times K_{MA} + IC \times K_{IC} + OR \times K_{OR} + OC \times K_{OC}$$

$$K_{FO} = 0.05; K_{SF} = 0.2; K_{MA} = 0.1; K_{IC} = 0.3; K_{OR} = 0.3; K_{OC} = 0.05$$

Fuente: Mora,2006,220

**4.3.7 Metodología para la obtención de la hoja de información RCM.** La información que se genera en el cálculo del *RPN* para cada modo de falla, es consignada en la hoja de cálculo del *RPN* la cual consta de cuatro columnas principales, donde se identifica el código del modo de falla, los criterios de severidad, posibilidad de ocurrencia, probabilidad de detección y el valor de *RPN*. Los modos de falla con más alto *RPN* se consideran los de mayor criticidad, es decir se identifican los modos de falla y los componentes críticos del equipo, a los cuales se les da prioridad, cumpliéndose así los pasos 3 y 4 del modelo y responde la sexta pregunta del proceso de análisis *RCM*: En qué sentido es importante la falla.

**4.3.7.1 Tareas propuestas e intervalos.** El paso cinco del modelo relaciona las consecuencias de los modos de falla con las tareas proactivas para eliminar o

reducir las consecuencias de dichos modos de falla. Esta relación se establece por medio de los diagramas de decisión de selección de tareas, el cual permite contestar las dos últimas preguntas de proceso de análisis *RCM*:

- Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?
- Qué puede hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada? (Moubray, 2004,202)

### Cuadro 8. Valores de criterios de Ocurrencia, Severidad y Detección

FO Fallas ocultas		SF Seguridad física	
No existen fallas ocultas que puedan generar fallas múltiples posteriores	0	No afecta personas ni equipos	0
Existe una baja probabilidad de que la falla no sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores	1	Afecta a una persona y es probable que cause incapacidad de tipo temporal	1
En condiciones normales, la falla siempre será oculta y generará fallas múltiples posteriores	2	Afecta de 2 a 5 personas y es probable que cause incapacidad de tipo temporal	2
Existe una baja probabilidad de que la falla si sea detectada y ocasione fallas múltiples posteriores	3	Afecta a 5 personas ó más y es probable que cause incapacidad de tipo temporal o permanente	3
La falla siempre es oculta y ocasionará fallas múltiples graves en el sistema	4	Genera incapacidad permanente o la muerte a una o más personas	4
MA Medio ambiente		IC Imagen corporativa	
No afecta el medio ambiente	0	Es irrelevante	0
Afecta el medio ambiente pero se puede controlar no daña el ecosistema	1	Afecta la credibilidad del cliente pero se maneja con argumentos	1
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el ecosistema, es reversible en menos de 6 meses con un valor inferior a 5000 dólares	2	Afecta la credibilidad del cliente pero se maneja con argumentos e inversión inferior a 1000 dólares	2
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el ecosistema, es reversible en menos de 3 años con un valor inferior a 50.000 dólares	3	Afecta la credibilidad del cliente pero se maneja con argumentos e inversión entre 1000 y 10.000 dólares	3
Afecta la disponibilidad de recursos sociales y el ecosistema, es reversible en mas de 3 años ó es irreversible su impacto social ó ecológico es superior a 50.000 dólares	4	Afecta la credibilidad del cliente pero se maneja con argumentos e inversión superior a 10.000 dólares	4
OR Costos de reparación		OC Efectos en clientes	
Entre 0 y 50 dólares	0	Entre 0 y 50 dólares	0
Entre 51 y 500 dólares	1	Entre 51 y 500 dólares	1
Entre 501 y 5000 dólares	2	Entre 501 y 5000 dólares	2
Entre 5001 y 50.000 dólares	3	Entre 5001 y 50.000 dólares	3
Mayor as 50.001 dólares	4	Mayor as 50.001 dólares	4

**Cuadro 8. (Continuación)**

Ocurrencia O		Detección D	
Frecuente 1 falla en un mes	4	Nula No se puede detectar una causa potencial, mecanismo y modo de fallo subsecuente	4
Ocasional una falla en un año	3	Baja probabilidad para detectar causas potenciales, mecanismos y modos de falla subsecuentes	3
Remota 1 falla en 5 años	2	Media probabilidad para detectar causas potenciales, mecanismos y modos de falla subsecuentes	2
Poco probable 1 falla en 20 años	1	Seguro siempre se detectarían causas potenciales, mecanismos y modos de falla subsecuentes	1

Fuente: Mora, 2006, 221

El desarrollo del diagrama de decisión para la selección de tareas, permite a través de una serie de preguntas intuitivas, seleccionar tareas aplicables y efectivas para prevenir o predecir la falla, justificar el rediseño del equipo o no hacer mantenimiento. Toda decisión tomada durante el desarrollo de los diagramas de decisión para la selección de tareas debe documentarse en la hoja de decisión *RCM*, la cual muestra un encabezado igual al de la hoja de información *RCM* para identificar el sistema y subsistema que se está analizando, además de una serie de columnas donde se consigna la respuesta a las preguntas del diagrama, el código del modo de falla, la tarea seleccionada la frecuencia a ejecutar dicha tarea y el responsable de su ejecución.

**4.3.7.2 Tareas aplicables y efectivas.** De acuerdo a los diagramas de decisión de selección de tareas es posible seleccionar, no hacer nada o escoger alguno de los seis tipos de tareas:

- **Lubricación:** Las tareas de lubricación son requeridas por el diseño del equipo.
- **Por condición:** Las tareas por condición detectan fallas potenciales antes de que puedan causar un fallo funcional. Estas incluyen inspecciones por síntomas de falla para todos los tipos de equipos. Tareas de calibración para respaldar los equipos son consideradas también (MIL2173, 1986, 46).
- **Tareas por vida límite:** Las tareas por vida límite son evaluadas para activos los cuales no es posible encontrar una tarea de mantenimiento que sea aplicable y efectiva. Una tarea de este tipo es simplemente una remoción programada de un ítem o una remoción por cumplimiento de ciclo de vida límite seguro (Sierra, 1999, 110).
- **Combinaciones:** Por condición y vida límite son combinadas cuando las consecuencias de seguridad son un efecto de falla.

- Búsqueda de falla: Son inspecciones de chequeos funcionales para prevenir múltiples fallas o para detectar fallas ocultas.

- Rediseño del equipo.

La efectividad significa que la tarea no cuesta más que prevenir la falla. Esta es una tarea de mantenimiento que indica que tan bien ésta cumple el propósito y si es meritorio hacerla. Claramente, cuando se está evaluando la rentabilidad de una tarea, se está haciendo un balance del costo de realizar el mantenimiento contra el costo de no realizarlo (Sierra, 1999, 101).

La aplicabilidad significa que las tareas son aplicables en relación con nuestro conocimiento de confiabilidad, y en relación a las consecuencias de la falla. Si los fundamentos de una tarea se basan en análisis anteriores, éstos satisfacen el criterio de aplicabilidad. Una tarea de mantenimiento será aplicable si ésta puede eliminar una falla, o por lo menos reducir la probabilidad de que ocurra hasta un nivel aceptable o reducir su impacto (Posada y otros, 2003, 82).

La principal entrada para éste proceso es el análisis del sistema en el que se evaluaron funciones, fallas funcionales, modos de falla, efectos de la falla y posteriormente consecuencias. La idea principal es decidir qué tarea puede ser aplicable a cada modo de falla o bien decidir si es conveniente no intervenir el equipo y usar un correctivo.

Hay tres razones fundamentales para realizar mantenimiento preventivo: (Rausand, 1998, 16).

- Para prevenir una falla.
- Para detectar el ataque de una falla.
- Para descubrir una falla oculta.

Las fallas principales son objeto del mantenimiento preventivo para obtener las tareas preventivas apropiadas, las causas de falla y los mecanismos de falla son considerados. La idea de realizar un mantenimiento preventivo, es detener el mecanismo que causa la falla. Por esto los modos de falla dominantes entran en un proceso lógico para decidir cuál de las tareas de mantenimiento le es aplicable (16).

**4.3.7.3 Intervalos.** La selección de la frecuencia a realizar la tarea escogida depende del tipo de tarea propuesta, de tal manera que para las técnicas de tareas por condición son una buena forma de prevenir los fallos funcionales si se usan en forma adecuada, pero también pueden ser una pérdida de tiempo. El *RCM* permite tomar decisiones acerca de esto con gran confianza (Moubray, 2000, 154).

**4.3.7.4 Tareas por condición.** Cualquier tarea por condición que es seleccionada debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Debe existir una clara definición de falla potencial.
- Debe existir un intervalo P-F identificable.
- El intervalos de la tarea debe ser menor que el intervalo P-F.
- Debe existir viabilidad técnica de las tareas.
- La categoría da las técnicas a condición (JA1011, 1999, 8).

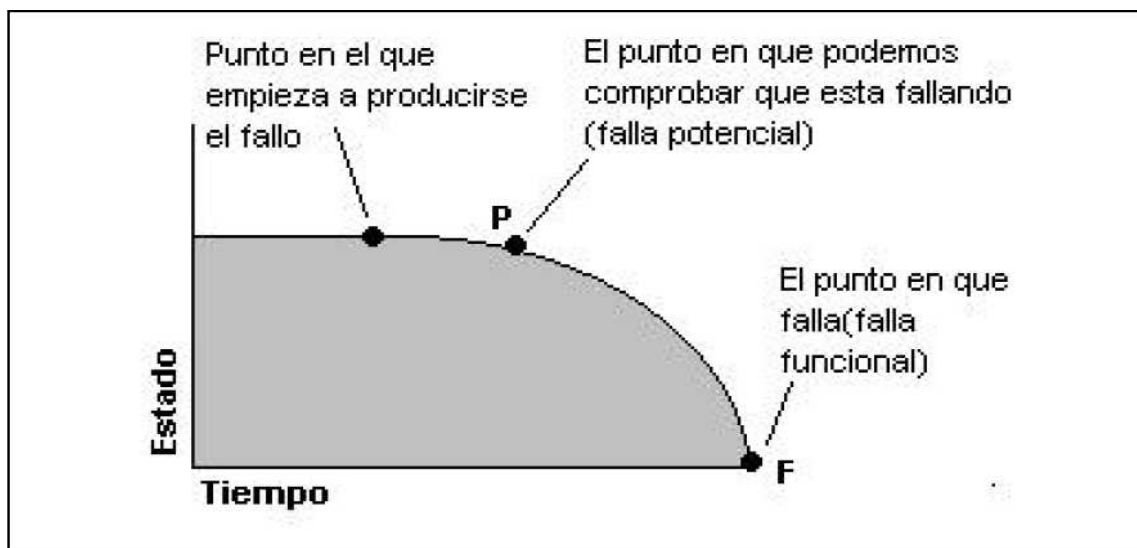
El intervalo P-F indica que tan frecuentemente las tareas por condición deben ser realizadas. Para lograr que la potencial falla no se convierta en una falla funcional, el intervalo entre los chequeos debe ser inferior al intervalo P-F (JA1012, 2001, 30).

La acción correctora es planificada de manera que se pueda llevar a cabo sin afectar la producción y sin estorbar las otras actividades de mantenimiento.

El mantenimiento por condición está basado en el hecho de que un gran número de fallos no ocurren instantáneamente, sino que se desarrollan a través de un período de tiempo. Como veremos, si se puede encontrar evidencia de que este proceso de falla ha comenzado se dispone de la posibilidad de tomar medidas para prevenir la falla y evitar las consecuencias (Aladon, 1998).

La anterior figura ilustra que pasa en la etapa final de un proceso de falla. Este es llamado la curva P-F porque muestra como la falla comienza, su deterioro hasta el punto en el que es detectado y luego si no es detectado y corregido se continua deteriorando, usualmente en un modo acelerado.

**Figura 15. Intervalo PF**



Fuente: JA1012, 2002, 31

Si un fallo potencial es detectado entre el punto P y el punto F, éste es el punto en que es posible tomar una acción para prevenir una falla funcional y eliminar sus consecuencias (JA1012, 2002, 32).

**4.3.7.5 Tareas por búsqueda de fallas.** Las tareas por búsqueda de fallas, son usadas para detectar fallas que ya han ocurrido. Sólo se evalúan combinaciones de fallas para el caso de fallas no evidentes que afectan la seguridad operacional.

Las tareas por búsqueda de fallas, son chequeos operacionales o funcionales para verificar la operación correcta del equipo de emergencia, de apoyo o sistemas de indicación. Si la falla no es evidente puede ser descubierta a través de una tarea de búsqueda de fallas y, además, ser corregida antes de que una falla adicional pueda ocurrir, entonces se previenen las consecuencias de una combinación de fallas (Sierra, 1999, 113).

La búsqueda de fallos que involucra este tipo de tareas, no es en realidad preventiva porque trata de buscar fallos después de que se han producido. No obstante, se consideran como preventivas porque su objeto es evitar los fallos múltiples que podrían ocurrir si el fallo oculto permanece inadvertido (Aladon, 1998).

El intervalo de aplicación de tareas de mantenimiento por el método de búsqueda de fallas, debe ser el intervalo más largo posible que reduzca la probabilidad actual de ocurrencia de fallas no evidentes y la falla por condición que hace que ésta falla se vuelva evidente.

Las variables de disponibilidad y confiabilidad son usadas para determinar los intervalos de búsqueda de fallas. La relación lineal que existe entre estos tres aspectos de una función de protección por MTBF<sup>22</sup> se muestra en la ecuación:

Ecuacion 3. Cálculo de indisponibilidad

$$\text{Indisponibilidad} = 0.5 \times \frac{\text{Intervalo tarea búsqueda de falla}}{\text{MTBF de la función}}$$

Fuente: JA1012, 2002, 38

<sup>22</sup> MTBF- Middle Time Betwin Failure – Tiempo Medio entre Fallas

### Cuadro 9. Intervalos de búsqueda de fallo

Disponibilidad de la función de protección	99.99%	99.95%	99.9%	99.5%	99%	98%	95%
Intervalos de la búsqueda de fallo (como % de MTBF)	0.02%	0.1%	0.2%	1%	2%	4%	10%

Fuente: JA1012, 2002, 39

**4.3.7.6 Tareas por vida límite.** Las tareas por vida límite, son evaluadas para todos los modos de fallo a los cuales no es posible encontrar una tarea de mantenimiento por condición que sea aplicable y efectiva. Una tarea por vida límite es simplemente una remoción programada de un ítem o una remoción por cumplimiento de ciclo de vida límite seguro (Sierra, 1999, 110).

El reacondicionado es la aplicación de un grupo de tareas de mantenimiento consideradas suficiente para restaurar la resistencia a la falla que tenía la pieza originalmente. El reacondicionamiento de un ítem específico puede variar desde el reemplazo de un solo componente hasta una completa re manufacturación (111).

Para considerar este tipo de tareas es necesario cumplir los siguientes criterios:

- Debe existir una edad definida en que hay un considerable incremento en la probabilidad condicional de un modo de falla.
- Una gran proporción de los modos de falla, debieron haber ocurrido después de la vida límite para evitar la probabilidad de falla prematura.
- La tarea debe restituir la resistencia a la falla del componente al nivel tolerable (JA1012, 2002, 36).

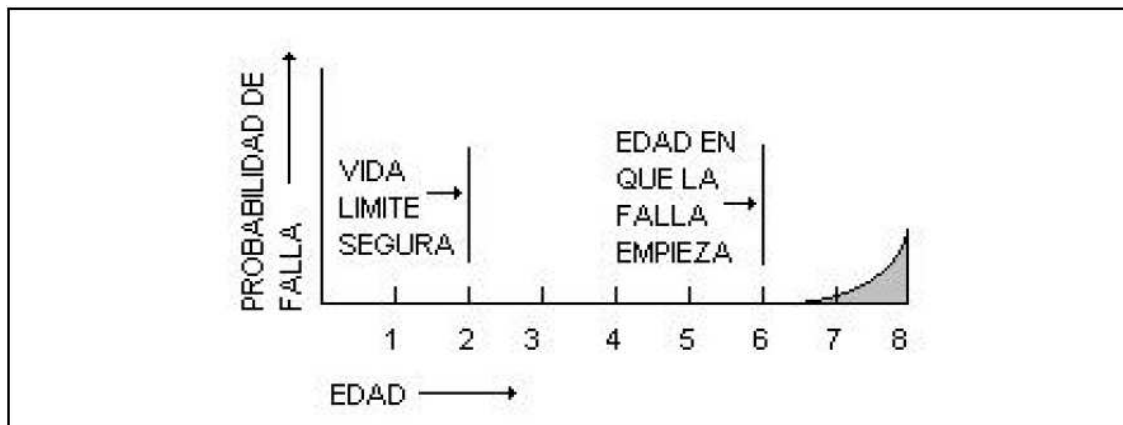
El límite de vida útil es solo aplicada a modos de falla que tengan consecuencias en la seguridad y el medio ambiente, así que las tareas asociadas reducen la probabilidad de que el modo de falla ocurra antes de un nivel tolerable. Este requerimiento significa que la vida límite no puede ser aplicada a un modo de falla que tenga una probabilidad grande de ocurrir cuando el ítem entre en servicio.

Los límites de vida útil, son determinados antes de que un nuevo ítem sea puesto en servicio, y a su vez establecidos probando con un método estadístico adecuado

simulando su ambiente operacional. Algunas industrias aplican solo una fracción de la vida útil como en la figura 25 (JA1012, 2002, 37).

El intervalo de aplicación de las tareas por vida útil se basa en el período de desgaste. Cuando la seguridad operacional es relevante, éste intervalo de aplicación debe ser menor al período de desgaste con el fin de asegurar que ninguno de los ítems puedan fallar en servicio (La probabilidad actual de falla, debe ser menor o equivalente a la aceptabilidad de falla). Para modos de fallos que no afectan la seguridad, el análisis de rentabilidad es realizado para determinar un intervalo óptimo. El análisis de costo-beneficio se usa para determinar si la aplicación de una tarea de mantenimiento es rentable.

**Figura 16. Vida límite segura**



Fuente: JA1012, 2002, 37

Los intervalos de aplicación de las tareas por vida útil, son usualmente calculados por medio de análisis estadísticos de las fallas o datos recolectados. Las técnicas estadísticas como por ejemplo Weibull<sup>23</sup> o análisis actuarial son muy útiles para hallar los intervalos de aplicación para estas tareas (Sierra, 1999, 113).

**4.3.7.7 Rediseño.** El paso a seguir cuando no se puede encontrar una tarea que reduzca el riesgo de fallo a un nivel aceptable (Moubray, 1997, 188).

En casos donde se requiere rediseñar y este cambio no se puede realizar inmediatamente se deben implementar tareas de mantenimiento preventivo temporalmente bajo la modalidad de no prácticas hasta que se pueda hacer un cambio en el diseño del ítem analizado. En otros casos donde se identifica una posible tarea de mantenimiento aplicable y efectiva, un rediseño puede ser aún

<sup>23</sup> weibull: método estadístico de cálculo de probabilidad

beneficioso económica u operacionalmente, por lo cual, ésta se debería evaluar siempre que sea posible (MIL2173, 1986).

**4.3.8 Aproximación del modelo *RCM* al *HC5*.** La aplicación de los conceptos antes expuestos genera una serie de decisiones e información que debe ser documentada adecuadamente, tal información se muestra a continuación:

**Cuadro 10. Hoja de información**

SISTEMA HORNO DE CLINKER 5			FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBON		FECHA 15\01\2008		HOJA ____ DE ____					
SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN			AUDITOR: ALBERTANO JIMÉNEZ		FECHA 25\02\2008							
Código	Descripción de la función	Ítem falla funcional	Código de falla funcional	Descripción de la falla funcional	Ítem del modo de falla	Código del modo de falla	Descripción del modo de falla					
0	Pulverizar carbón bituminoso con una granulometría de entrada de 1/4 de pul y una granulometría de salida promedio de 80% pasa malla 170 con un rango de +/- 5%	A	0-A	Incapaz de pulverizar carbón	1	0-A-1	Atascamiento en la válvula de alimentación					
					2	0-A-2	Frenado de los rodillos pulverizadores por agarrotamiento de rodamientos					
					3	0-A-3	Cese de entrada de aire de recuperación de calor del horno					
					4	0-A-4	Agarrotamiento de rodamientos en la transmisión					
					5	0-A-5	Fractura del sinfín o corona de la transmisión					
					6	0-A-6	Ausencia de fluido eléctrico de alimentación del sistema					
					7	0-A-7	Rotura de la banda dosificadora					
		B	0-B	Entrega una granulometría promedio de salida inferior al 80% pasa malla 170	1	1-B-1	Descalibrados los rodillos pulverizadores					
					2	1-B-2	Desgaste de los segmentos de mortero					
					3	1-B-3	Desgaste en los rodillos pulverizadores					
					4	1-B-4	Granulometría promedio de alimentación superior a 1/4 in					
					1	Pulverizar carbón bituminoso según la Demanda de 0-10 tph con un error máximo de +/- 5%	A	1-A	Incapaz de regular la demanda de Carbón pulverizado	1	1-A-1	Obstrucción de la tolva de alimentación
										2	1-A-2	Atascamiento en la válvula de alimentación
										3	1-A-3	Agarrotamiento de rodamientos en la caja reductora, motor o válvula

SISTEMA HORNO DE CLINKER 5			FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBON			FECHA 15\01\2008		HOJA ___ DE ___
SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN			AUDITOR: ALBERTANO JIMÉNEZ			FECHA 25\02\2008		
Código	Descripción de la función	Ítem falla funcional	Código de falla funcional	Descripción de la falla funcional	Ítem del modo de falla	Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	
					4	1-A-4	Descalibración de la celdas de peso	
					5	1-A-5	Agarrotamiento de rodamientos en tambor motriz o de cola	
					6	1-A-6	Desconfiguración del sistema de control alimentación	
					7	1-A-7	Interrupción de la comunicación de los sistemas de control	
					8	1-A-8	Error en el variador de velocidad en banda dosificadora	
					9	1-A-9	Agarrotamiento de rodamientos en caja reductora y motor de la transmisión de potencia de la banda dosificadora	
					10	1-A-10	Destrucción de piñonaría de caja reductora de la banda dosificadora	
					11	1-A-11	Destencionamiento o pérdida de paso de la cadena de la transmisión de potencia de la banda dosificadora	
2	Pulverizar carbón bituminoso con un rechazo inferior al 5%	A	2-A	Incapaz de producir un rechazo inferior al 5%	1	2-A-1	Carbón con mucha impureza	
3	Ser capaz de girar la mesa a una velocidad de 30 rpm	A	3-A	Incapacidad de girar la mesa	1	3-A-1	Agarrotamiento de rodamientos de la transmisión	
					2	3-A-2	Fractura del sinfín o corona de la transmisión	
					3	3-A-3	Soltura del acople entre el motor y la transmisión	

SISTEMA HORNO DE CLINKER 5			FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBON			FECHA 15\01\2008		HOJA ___ DE ___
SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN			AUDITOR: ALBERTANO JIMÉNEZ			FECHA 25\02\2008		
Código	Descripción de la función	Ítem falla funcional	Código de falla funcional	Descripción de la falla funcional	Ítem del modo de falla	Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	
					4	3-A-4	Soltura entre la mesa y el eje de transmisión	
4	Los rodillos pulverizadores deben girar libremente	A	4-A	Incapacidad de girar libremente los rodillos	1	4-A-1	Agarrotamiento de rodamientos de rodillos pulverizadores	
5	Los rodillos pulverizadores deben contener el aceite de lubricación	A	5-A	Rodillos incapaces de contener aceite de lubricación	1	5-A-1	Pérdida de estanqueidad de retenedores o elevadas temperaturas de operación evaporan el aceite	
6	La transmisión debe contener el aceite de lubricación	A	6-A	Transmisión incapaz de contener aceite	1	6-A-1	Pérdida de estanqueidad de retenedores o elevadas temperaturas de operación evaporan el aceite	
7	El molino debe operar con un nivel de vibración inferior a 15 unidades	A	7-A	Vibración superior a 15 unidades	1	7-A-1	Desalineación de motor y eje transmisión	
					2	7-A-2	Soltura o desgaste de acople transmisión	
					3	7-A-3	Juego excesivo de rodamientos transmisión	
8	El molino debe contener el carbón pulverizado	A	8-A	El molino es incapaz de contener el carbón pulverizado	1	8-A-1	Rotura de el cuerpo del molino	
9	El molino debe parar inmediatamente se oprime el botón de paro de emergencia	A	9-A	El molino es incapaz de parar cuando se oprime el botón de paro de emergencia	1	9-A-1	Daño de los componentes del botón de emergencia	
					2	9-A-2	Perdida de continuidad del circuito del paro	
					3	9-A-3	Daño de contactar del circuito de control	
10	El molino debe parar cuando se dispara un	A	10-A	El molino es incapaz de parar	1	10-A-1	Daño en el software de control	

SISTEMA HORNO DE CLINKER 5			FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBON			FECHA 15\01\2008		HOJA ___ DE ___
SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN			AUDITOR: ALBERTANO JIMÉNEZ			FECHA 25\02\2008		
Código	Descripción de la función	Ítem falla funcional	Código de falla funcional	Descripción de la falla funcional	Ítem del modo de falla	Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	
	alarma de emergencia en sala de control			cuando se dispara una alarma de emergencia en sala de control	2	10-A-2	Daño del hardware	
					3	10-A-3	Daño en comunicaciones	
11	El molino debe parar o arrancar cuando se da la señal desde sala de control	A	11-A	El molino es incapaz de parar o arrancar cuando se da la señal desde sala de control	1	11-A-1	Daño en el software de control	
					2	11-A-2	Daño del hardware	
					3	11-A-3	Daño en comunicaciones	
12	El molino debe ser capaz de llevar el carbón pulverizado hasta el ventilador de aire primario	A	12-A	El molino es incapaz de llevar el carbón pulverizado hasta el ventilador de aire primario	1	12-A-1	Atascamiento de carbón pulverizado	
					2	12-A-2	Pérdida de la succión del ventilador de aire primario	
					3	12-A-3	Damper cerrado	
13	Los rodillos pulverizadores deben permitir calibración	A	13-A	Incapacidad para calibrar rodillos pulverizadores	1	13-A-1	Rotura de tornillos de precarga de troques	
					2	13-A-2	Desgaste de los segmentos de mortero	
					3	13-A-3	Desgaste de rodillos pulverizadores	

Fuente: Mora 2006, 220

**Cuadro 11. Hoja de cálculo del RPN**

HOJA DE CÁLCULO DE RPN	SISTEMA HORNO DE CLINKER 5	FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBÓN						FECHA: 15\01\2008			HOJA DE
	SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN	AUDITOR : ALBERTANO JIMÉNEZ						FECHA:25\02\2008			-
Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación S						RPN			
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D	valor RPN
0-A-1	Atascamiento en la válvula de alimentación	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	4	1	1,4
0-A-2	Frenado de los rodillos pulverizadores por agarrotamiento de rodamientos	0,10	0	0,1	0	0,3	0	0,50	3	3	4,5
0-A-3	Cese de entrada de aire de recuperación de calor del horno	0,05	0	0	0	0	0	0,05	3	1	0,15
0-A-4	Agarrotamiento de rodamientos en la transmisión	0,05	0	0,1	0	0,6	0	0,75	2	3	4,5
0-A-5	Fractura del sinfín o corona de la transmisión	0,15	0	0	0	0,6	0	0,75	2	4	6
0-A-6	Ausencia de fluido eléctrico de alimentación del sistema	0,10	0	0	0	0,9	0	1,10	2	1	2,2
0-A-7	Rotura de la banda dosificadora	0,05	0	0,1	0	0,6	0	0,85	2	1	1,7
1-B-1	Descalibrados los rodillos pulverizadores	0,05	0	0	0	0	0	0,05	3	1	0,15
1-B-2	Desgaste de los segmentos de mortero	0,10	0	0	0	0,6	0	0,70	3	2	4,2
1-B-3	Desgaste en los rodillos pulverizadores	0,10	0	0	0	0,9	0	1,00	3	2	6
1-B-4	Granulometría promedio de alimentación superior a 1/4 in	0,05	0	0	0	0	0	0,05	2	1	0,1
1-A-1	Obstrucción de la tolva de alimentación	0,05	0	0	0	0	0	0,05	3	1	0,15
1-A-2	Atascamiento en la válvula de alimentación	0,05	0	0	0	0	0	0,05	3	1	0,15

HOJA DE CÁLCULO DE RPN	SISTEMA HORNO DE CLINKER 5	FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBÓN						FECHA: 15\01\2008			HOJA DE
	SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN	AUDITOR : ALBERTANO JIMÉNEZ						FECHA:25\02\2008			
Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación S						RPN			
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D	valor RPN
1-A-3	Agarrotamiento de rodamientos en la caja reductora, motor o válvula	0,10	0	0	0	0,6	0	0,70	2	3	4,2
1-A-4	Descalibración de la celdas de peso	0,10	0	0	0	0,6	0	0,70	3	2	4,2
1-A-5	Agarrotamiento de rodamientos en tambor motriz o de cola	0,10	0	0	0	0,3	0	0,40	2	3	2,4
1-A-6	Desconfiguración del sistema de control alimentación	0,20	0	0	0	0,6	0	0,80	2	4	6,4
1-A-7	Interrupción de la comunicación de los sistemas de control	0,20	0	0	0	0,6	0	0,80	2	4	6,4
1-A-8	Error en el variador de velocidad en banda dosificadora	0,20	0	0	0	0,6	0	0,80	2	1	1,6
1-A-9	Agarrotamiento de rodamientos en caja reductora y motor de la transmisión de potencia de la banda dosificadora	0,05	0	0,1	0	0,3	0	0,45	2	3	2,7
1-A-10	Dstrucción de piñonaría de caja reductora de la banda dosificadora	0,05	0	0,1	0	0,6	0	0,75	2	2	3
1-A-11	Destencionamiento o perdida de paso de la cadena de la transmisión de potencia de la banda dosificadora	0,05	0	0,1	0	0,3	0	0,45	3	1	1,35
2-A-1	Carbón con mucha impureza	0,05	0	0	0	0,6	0	0,65	3	1	1,95
3-A-1	Agarrotamiento de rodamientos de la	0,10	0	0,1	0	0,6	0	0,80	2	4	6,4

HOJA DE CÁLCULO DE RPN	SISTEMA HORNO DE CLINKER 5	FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBÓN					FECHA: 15\01\2008			HOJA DE	
	SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN	AUDITOR : ALBERTANO JIMÉNEZ					FECHA:25\02\2008			-	
Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación S						RPN			
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D	valor RPN
	transmisión										
3-A-2	Fractura del sinfín o corona de la transmisión	0,20	0	0,1	0	0,6	0	0,90	2	4	7,2
3-A-3	Soltura del acople entre el motor y la transmisión	0,05	0	0,1	0	0,6	0	0,75	2	2	3
3-A-4	Soltura entre la mesa y el eje de transmisión	0,10	0	0,1	0	0,6	0	0,80	1	2	1,6
4-A-1	Agarrotamiento de rodamientos de rodillos pulverizadores	0,10	0	0,1	0	0,3	0	0,50	3	3	4,5
5-A-1	Pérdida de estanqueidad de retenedores o elevadas temperaturas de operación evaporan el aceite	0,05	0	0,1	0	0,3	0	0,45	2	2	1,8
6-A-1	Pérdida de estanqueidad de retenedores o elevadas temperaturas de operación evaporan el aceite	0,05	0	0,1	0	0,3	0	0,45	2	2	1,8
7-A-1	Desalineación de motor y eje transmisión	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	2	2	1,4
7-A-2	Soltura o desgaste de acople transmisión	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	2	2	1,4
7-A-3	Juego excesivo de rodamientos transmisión	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	2	2	2,4
8-A-1	Rotura de el cuerpo del molino	0,05	0	0,1	0	0,3	0	0,45	1	1	0,45
9-A-1	Daño de los componentes del botón de emergencia	0,05	0,6	0,1	0	0,3	0	1,05	3	2	6,3
9-A-2	Pérdida de continuidad del circuito del paro	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	2	2	2,4
9-A-3	Daño de contacto del circuito de control	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	2	2	2,4

HOJA DE CÁLCULO DE RPN	SISTEMA HORNO DE CLINKER 5	FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBÓN						FECHA: 15\01\2008			HOJA DE
	SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN	AUDITOR : ALBERTANO JIMÉNEZ						FECHA:25\02\2008			
Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación S						RPN			
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D	valor RPN
10-A-1	Daño en el software de control	0,20	0	0	0	0,6	0	0,80	2	3	4,8
10-A-2	Daño del hardware	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	2	3	3,6
10-A-3	Daño en comunicaciones	0,20	0	0	0	0,3	0	0,50	2	3	3
11-A-1	Daño en el software de control	0,20	0	0	0	0,6	0	0,80	2	3	4,8
11-A-2	Daño del hardware	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	2	3	3,6
11-A-3	Daño en comunicaciones	0,20	0	0	0	0,3	0	0,50	2	3	3
12-A-1	Atascamiento de carbón pulverizado	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	3	1	1,05
12-A-2	Pérdida de la succión del ventilador de aire primario	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	2	1	0,7
12-A-3	Damper cerrado	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	2	1	0,7
13-A-1	Rotura de tornillos de precarga de troques	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	3	2	3,6
13-A-2	Desgaste de los segmentos de mortero	0,05	0	0,1	0	0,6	0	0,75	3	2	4,5
13-A-3	Desgaste de rodillos pulverizadores	0,10	0	0,1	0	0,9	0	1,10	3	2	6,6

Fuente: Mora 2006, 222

**Cuadro 12. Listado de modos de fallo por RPN**

Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Valor rpn	Prioridad de ejecución
3-A-2	Fractura del sinfín y corona de transmisión	7.2	1
13-A-3	Desgaste de rodillos pulverizadores	6.6	2
1-A-7	Interrupción de comunicaciones sistema de control	6.4	3
1-A-6	Desconfiguración del sistema de control	6.4	4
3-A-1	Agarrotamiento de rodamientos de la transmisión	6.4	5
9-A-1	Daño de los componentes del botón de paro de emergencia	6.3	6
0-A-5	Fractura del sinfín o corona de la transmisión	6.0	7
1-B-3	Desgaste de rodillos pulverizadores	6.0	8
10-A-1	Daño del software de control	4.8	9

Fuente: Creación propia

**Cuadro 13. Hoja de decisión RCM**

HOJA DE DECISIÓN RCM			SISTEMA	PREPARACIÓN COMBUSTIBLE										FACILITADOR	FECHA	HOJA 1 DE 1	
			SUBSISTEMA	MOLIENDA CARBÓN 5										AUDITOR			
REFERENCIA DE INFORMACIÓN			EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS				H1	H2	H3	ACCIÓN A FALTA DE				TAREA PROPUESTA	PERIODO INICIAL	TIPO TAREA	EJECUTOR
F	FF	FM	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4					
3	A	2	N	N	N	N	S						REALIZAR ANÁLISIS DE ACEITE EN LA TRANSMISIÓN REALIZAR ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN TRANSMISIÓN	Mensual	Preventiva	subcontrata	
13	A	3	S				N	N	S				CAMBIO PROGRAMADO DE RODILLOS PULVERIZADORES	Trimestral	sustitución	Interno	
1	A	7	S				N	N	N				NO HACER MANTENIMIENTO	--	--	--	

Fuente: Jhon Moubray, 2006, 203

La información consignada en la hoja de cálculo del *RPN*, se clasifica de mayor a menor, permitiendo identificar los modos de falla críticos. Una vez jerarquizados los modos de falla, se procede a realizar el análisis de *RCM* en donde se determinan las tareas a realizar para eliminar o mitigar los efectos de los modos de falla y la información generada de éste análisis es asentada en la hoja de decisión *RCM* para planear dichas actividades y ejecutarlas. Para efectos de este trabajo sólo se seleccionan los tres modos de falla con más alto *RPN*.

Una vez ejecutadas las actividades establecidas en la hoja de decisión de *RCM*, se continúa con el cálculo de la confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad para evaluar las acciones realizadas sobre los equipos. Sin embargo, dicho cálculo no hace parte del alcance de este trabajo.

El análisis de *RCM* debe ser dinámico, es decir, no termina aquí. Después de un tiempo prudencial que no debe ser mayor a seis meses, se debe repetir el proceso, se debe verificar si existen nuevos modos de falla y se incluyen en el análisis, se recalcula el *RPN* y se jerarquizan nuevamente los modos de falla, ya que al realizar las tareas de mantenimiento definidas en la hoja de decisión de *RCM* el riesgo de cada modo de falla cambia debido a que dichas tareas tienen como objetivo eliminar o disminuir el efecto del modo de falla (Mora,2005,225).

La realización del ejercicio da como resultado nuevas hojas de información de *RCM*, hoja de cálculo del *RPN* y hoja de decisión *RCM*. A continuación se muestra una hoja de cálculo del *RPN* después de aplicar las actividades de mantenimiento resultantes del primer análisis generado por la hoja de decisión *RCM*, una reclasificación de modos de falla de acuerdo con el nuevo cálculo del *RPN*:

**Cuadro 14. Recálculo del RPN después de ejecutar las tareas seleccionadas**

HOJA DE CÁLCULO DE RPN	SISTEMA HORNO DE CLINKER 5	FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBÓN						FECHA: 15\01\2008			HOJA DE
	SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN	AUDITOR : ALBERTANO JIMÉNEZ						FECHA:25\02\2008			
Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación S						RPN			
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D	valor RPN
0-A-1	Atascamiento en la válvula de alimentación	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	4	1	1,4
0-A-2	Frenado de los rodillos pulverizadores por agarrotamiento de rodamientos	0,10	0	0,1	0	0,3	0	0,50	3	3	4,5
0-A-3	Cese de entrada de aire de recuperación de calor del horno	0,05	0	0	0	0	0	0,05	3	1	0,15
0-A-4	Agarrotamiento de rodamientos en la transmisión	0,05	0	0,1	0	0,6	0	0,75	2	3	4,5
0-A-5	Fractura del sinfín o corona de la transmisión	0,15	0	0	0	0,6	0	0,75	2	4	6
0-A-6	Ausencia de fluido eléctrico de alimentación del sistema	0,10	0	0	0	0,9	0	1,10	2	1	2,2
0-A-7	Rotura de la banda dosificadora	0,05	0	0,1	0	0,6	0	0,85	2	1	1,7
1-B-1	Descalibrados los rodillos pulverizadores	0,05	0	0	0	0	0	0,05	3	1	0,15
1-B-2	Desgaste de los segmentos de mortero	0,10	0	0	0	0,6	0	0,70	3	2	4,2
1-B-3	Desgaste en los rodillos pulverizadores	0,10	0	0	0	0,9	0	1,00	3	2	6
1-B-4	Granulometría promedio de alimentación superior a 1/4 in	0,05	0	0	0	0	0	0,05	2	1	0,1
1-A-1	Obstrucción de la tolva de alimentación	0,05	0	0	0	0	0	0,05	3	1	0,15
1-A-2	Atascamiento en la válvula de alimentación	0,05	0	0	0	0	0	0,05	3	1	0,15
1-A-3	Agarrotamiento de rodamientos en la caja reductora, motor o válvula	0,10	0	0	0	0,6	0	0,70	2	3	4,2
1-A-4	Descalibración de la celdas de peso	0,10	0	0	0	0,6	0	0,70	3	2	4,2

HOJA DE CÁLCULO DE RPN	SISTEMA HORNO DE CLINKER 5	FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBÓN						FECHA: 15\01\2008			HOJA DE
	SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN	AUDITOR : ALBERTANO JIMÉNEZ						FECHA: 25\02\2008			
Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación S						RPN			
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D	valor RPN
1-A-5	Agarrotamiento de rodamientos en tambor motriz o de cola	0,10	0	0	0	0,3	0	0,40	2	3	2,4
1-A-6	Desconfiguración del sistema de control alimentación	0,20	0	0	0	0,6	0	0,80	2	4	6,4
1-A-7	Interrupción de la comunicación de los sistemas de control	0,20	0	0	0	0,6	0	0,80	2	4	6,4
1-A-8	Error en el variador de velocidad en banda dosificadora		0	0	0	0,6	0	0,80	2	1	1,6
1-A-9	Agarrotamiento de rodamientos en caja reductora y motor de la transmisión de potencia de la banda dosificadora	0,05	0	0,1	0	0,3	0	0,45	2	3	2,7
1-A-10	Destrucción de piñonaría de caja reductora de la banda dosificadora	0,05	0	0,1	0	0,6	0	0,75	2	2	3
1-A-11	Destacionamiento o pérdida de paso de la cadena de la transmisión de potencia de la banda dosificadora	0,05	0	0,1	0	0,3	0	0,45	3	1	1,35
2-A-1	Carbón con mucha impureza	0,05	0	0	0	0,6	0	0,65	3	1	1,95
3-A-1	Agarrotamiento de rodamientos de la transmisión	0,10	0	0,1	0	0,6	0	0,80	2	4	6,4
3-A-2	Fractura del sinfín o corona de la transmisión	0,20	0	0,1	0	0,6	0	0,90	2	2	3,6
3-A-3	Soltura del acople entre el motor y la transmisión	0,05	0	0,1	0	0,6	0	0,75	2	2	3
3-A-4	Soltura entre la mesa y el eje de transmisión	0,10	0	0,1	0	0,6	0	0,80	1	2	1,6
4-A-1	Agarrotamiento de rodamientos de rodillos pulverizadores	0,10	0	0,1	0	0,3	0	0,50	3	3	4,5
5-A-1	Pérdida de estanqueidad de retenedores o elevadas temperaturas de operación evaporan el aceite	0,05	0	0,1	0	0,3	0	0,45	2	2	1,8

HOJA DE CÁLCULO DE RPN	SISTEMA HORNO DE CLINKER 5	FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBÓN						FECHA: 15\01\2008			HOJA DE
	SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN	AUDITOR : ALBERTANO JIMÉNEZ						FECHA: 25\02\2008			
Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación S						RPN			
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D	valor RPN
6-A-1	Pérdida de estanqueidad de retenedores o elevadas temperaturas de operación evaporan el aceite	0,05	0	0,1	0	0,3	0	0,45	2	2	1,8
7-A-1	Desalineación de motor y eje transmisión	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	2	2	1,4
7-A-2	Soltura o desgaste de acople transmisión	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	2	2	1,4
7-A-3	Juego excesivo de rodamientos transmisión	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	2	2	2,4
8-A-1	Rotura de el cuerpo del molino	0,05	0	0,1	0	0,3	0	0,45	1	1	0,45
9-A-1	Daño de los componentes del botón de emergencia	0,05	0,6	0,1	0	0,3	0	1,05	3	2	6,3
9-A-2	Pérdida de continuidad del circuito del paro	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	2	2	2,4
9-A-3	Daño de contacto del circuito de control	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	2	2	2,4
10-A-1	Daño en el software de control	0,20	0	0	0	0,6	0	0,80	2	3	4,8
10-A-2	Daño del hardware	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	2	3	3,6
10-A-3	Daño en comunicaciones	0,20	0	0	0	0,3	0	0,50	2	3	3
11-A-1	Daño en el software de control	0,20	0	0	0	0,6	0	0,80	2	3	4,8
11-A-2	Daño del hardware	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	2	3	3,6
11-A-3	Daño en comunicaciones	0,20	0	0	0	0,3	0	0,50	2	3	3
12-A-1	Atascamiento de carbón pulverizado	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	3	1	1,05

HOJA DE CÁLCULO DE RPN	SISTEMA HORNO DE CLINKER 5	FACILITADOR: JUAN ALFONSO TOBÓN						FECHA: 15\01\2008			HOJA DE
	SUBSISTEMA MOLIENDA DE CARBÓN	AUDITOR : ALBERTANO JIMÉNEZ						FECHA:25\02\2008			
Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Calificación S						RPN			
		FO	SF	MA	IC	OR	OC	S	O	D	valor RPN
12-A-2	Pérdida de la succión del ventilador de aire primario	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	2	1	0,7
12-A-3	Damper cerrado	0,05	0	0	0	0,3	0	0,35	2	1	0,7
13-A-1	Rotura de tornillos de precarga de troques	0,20	0	0,1	0	0,3	0	0,60	3	2	3,6
13-A-2	Desgaste de los segmentos de mortero	0,05	0	0,1	0	0,6	0	0,75	3	2	4,5
13-A-3	Desgaste de rodillos pulverizadores	0,10	0	0,1	0	0,9	0	1,10	2	1	2,2

Fuente: Creación propia

**Cuadro 15. Reclasificación de tareas después del recalcu­lo del RPN**

Código del modo de falla	Descripción del modo de falla	Valor rpn	Prioridad de ejecución
1-A-7	Interrupción de comunicaciones sistema de control	6.4	1
1-A-6	Desconfiguración del sistema de control	6.4	2
3-A-1	Agarrotamiento de rodamientos de rodamientos de la transmisión	6.4	3
9-A-1	Daño de los componentes del botón de paro de emergencia	6.3	4
0-A-5	Fractura del sinfín o corona de la transmisión	6.0	5
1-B-3	Desgaste de rodillos pulverizadores	6.0	6
10-A-1	Daño del software de control	4.8	7
11-A-1	Daño del software de control	4.8	8
0-A-2	Frenado de rodillos pulverizadores por agarrotamiento de rodamientos	4.5	9

Fuente: Creación propia

**4.3.9 Cementos Argos S.A. y el RCM.** El área de confiabilidad es una figura nueva dentro de la cultura empresarial de la empresa y factores como la productividad a bajos costos de operación, la complejidad de los equipos y el deseo de conseguir desempeños y estándares de clase mundial, propician en Cementos Argos S.A. la interiorización de filosofías y técnicas de mantenimiento que permiten alcanzar tales resultados. Por tal motivo trabajos como este tienen parte del terreno abonado para su acogida, sin embargo la complejidad, el tamaño de la organización y los costos e inversiones asociados a la implementación y puesta en marcha de una nueva filosofía tales como capacitaciones, cambios en estructura, adquisición de nuevas tecnologías y herramientas hacen que la empresa prefiera tener asesores internacionales con experiencia comprobada en implementación de modelos de gestión de mantenimiento exitosos en los cuales la filosofía RCM hace parte de ellos.

La posibilidad de implementar una filosofía de mantenimiento como RCM es alta ya que esta filosofía permite al departamento de mantenimiento alinearse con la política y los objetivos de la compañía.

#### **4.4 CONCLUSIONES**

El desarrollo de este capítulo ilustra la metodología RCM escogida para ser aplicada en el HO5 en una función crítica con dos fallas y tres modos de falla.

Además se analiza la ilustración y se presenta una tabla organizada de las diferentes tareas, organizadas de la más crítica a la menos crítica. Se hace el ejercicio mental de la ejecución de las tareas propuestas en el análisis, para luego analizar nuevamente y mostrar el cambio en las tareas, evidenciando el carácter dinámico de la metodología.

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1 CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo general de este trabajo se cumple al ilustrar la metodología *RCM* en el horno 5 de clinker de la planta Cairo de Cementos Argos S.A. por medio del seguimiento de la metodología internacional unificada para la implementación de la filosofía *RCM* dando como resultado una serie de hojas de información, hojas de decisión, hojas de cálculo de *RPN* y tablas de jerarquización de tareas de mantenimiento que permiten organizar las tareas planeadas o no con el propósito de mejorar la disponibilidad.

### 5.2 CONCLUSIONES TÉCNICAS

El análisis de los datos de los paros y sus causas del HC5, muestran que al mejorar la disponibilidad del proceso molienda de carbón, repercute directamente sobre la disponibilidad del HC5, ya que los paros de dicho proceso representan el 29.5% del tiempo de paro no programado del HC5.

El análisis de los datos también muestra que existe otra causa de tiempo de paro no programado llamada salón de *clinker* lleno y que corresponde al 32.83% del tiempo de paro no programado. Esta causa es ajena a mantenimiento sin embargo, puede solucionarse habilitando una bodega de producto ensacado para evitar que pare la molienda de cemento por silos llenos y como consecuencia de esto, evitar el paro de hornos por salón de clinker lleno.

La información que se muestra en la hoja de información *RCM* del sistema molienda de carbón del proceso preparación de combustible da cuenta de la existencia de 14 funciones, 15 fallas funcionales y 49 modos de falla. Esto es consecuencia de los niveles de jerarquía de descripción de equipos, establecidos por la compañía y del grado de detalle que se quiere analizar, por consiguiente se puede decir que a mayor grado de detalle mayor puede ser el número de modos de falla, sin embargo esto no necesariamente es bueno para el análisis, porque con menos detalle puede llegarse a los mismos resultados.

El cálculo del *RPN* de los modos de falla que se muestra en la hoja de cálculo del *RPN*, permite identificar los modos de falla más críticos del total de 49 modos de falla. Esto permite priorizar la atención y los recursos necesarios para eliminar o reducir las consecuencias de las fallas potenciales.

El cálculo del *RPN* muestra que el modo de falla más crítico, es la fractura del sinfín y corona de la transmisión del molino de carbón identificado con el código 3-A-2. Este modo de falla no es frecuente ni común pero si llegase a ocurrir, se genera un paro en el HC5 por varios días mientras se remplazan las piezas

dañadas. Por lo tanto, es deseable seleccionar una tarea que permita identificar la falla con tiempo de anticipación suficiente que permita prepararse y planear la parada para reducir el tiempo de reparación.

La selección de tareas que se realiza en la hoja de decisión *RCM*, permite escoger tareas aplicables y efectivas que permiten eliminar o reducir las consecuencias de las fallas, mejorando la disponibilidad y confiabilidad de los equipos. La selección de los intervalos de aplicación de dichas tareas, depende del tipo de tarea a aplicar.

El modo de falla identificado con el código 1-A-7 interrupción de comunicaciones sistema de control, es el tercer modo más crítico de falla. Sin embargo, la tarea que se selecciona es la de no hacer mantenimiento ya que no se encuentra una actividad aplicable y efectiva que permita detectar la falla o prevenirla antes que ocurra. Esto no es positivo ni negativo, depende del grado de tolerancia de las consecuencias al que se esté dispuesto, si la tolerancia es baja se puede revisar la opción de rediseñar.

Al terminar la ejecución de las tareas propuestas en la hoja de decisión de *RCM* se debe evaluar nuevamente la confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad del HC5, para evidenciar la mejora de estos indicadores. Luego se debe recalcular el *RPN* de los modos de falla para redefinir las prioridades. Esto permite concluir que la filosofía *RCM* es de carácter dinámico, que es un proceso de mejora continua.

### **5.3 CONCLUSIONES TEMÁTICAS**

La literatura muestra que existen diferentes casas comerciales, autores, grupos de investigación y normas relacionadas con la filosofía *RCM*, las cuales tienen puntos en común y algunas diferencias entre sí, mayor profundidad en otros puntos, lo cual puede generar confusión en el lector.

La existencia de diferentes casas comerciales, grupos de investigación y normas relacionadas con la filosofía *RCM* muestra los diferentes puntos de vista para implementar esta filosofía en un proceso de mantenimiento. Sin embargo, no importa cuál de ellos se utilice como guía, solo se considerará que se está realizando *RCM* si se cumple con los lineamientos de la norma *SAE JA 1012*.

La metodología *FMECA* imprime el carácter proactivo de la filosofía *RCM*, permitiendo determinar acciones para eliminar o reducir las consecuencias que las fallas generan en la operación del HC5.

El análisis *RCM* permite incrementar el conocimiento sobre los equipos en los cuales se aplica y también permite difundirlos en la organización al documentar la información generada por el análisis.

## BIBLIOGRAFÍA

ALADON. Curso de formación de tres días en mantenimiento centrado en confiabilidad: Introducción al mantenimiento centrado en confiabilidad. En: Curso público. Versión 2. (Agosto 1998); p. 1-25.

CONTAINA N. y otros. Estudio de las aproximaciones usadas en diferentes industrias del mantenimiento centrado en confiabilidad. Madrid: Universidad politécnica de Madrid, 2002. p. 5-56.

ESREDA WORKING group report. *Handbook on maintenance management. Statistical series* No, Hovick Noruega: DNV, 2001. 4-52p. ISBN 82 515 02705.

KELLY, Anthony y Harris, M.J. Gestión del mantenimiento industrial. Fundación Repsol. Madrid, 1998.

MARKS, John. *Combining TPM and RCM, electric maintenance & repair*. Journal ISSN 0013-4457. Vol 211. Estados Unidos, Junio 1997. p. 49-52.

MIL. STD 2173(AS): Mantenimiento centrado en confiabilidad, Requisitos de Mantenimiento para aviones, sistemas de armas y equipos de Apoyo: Norma militar departamento de defensa. Washington, 1980. p. 3-214.

MORA GUTIÉRREZ, Luis Alberto. Selección y Jerarquización de las variables importantes para la gestión de mantenimiento en las empresas usuarias o generadoras de tecnologías. Valencia España: Universidad Politécnica de Valencia, 1999. p. 7-15.

MOUBRAY, John. *Reability centered maintenance*. Ed. 1. New York, : Industrial press, 1992. p. 2-70.

-----, -----, Ed. 2. 1997. p. 5-65.

MURILLO ROCHA, Gerardo. Plan de implantación general del RCM. Quito, 2002. p. 5.

NOWLAND, Stanley F. Heap, Howard F. *Reliability centered maintenance. Nacional technical information service*. Springfield, 1978. p. 7.

PARRA M., Carlos. Optimización de la producción a partir de la implementación del mcc. Medellín: Centro de Educación Continua. Universidad EAFIT, 1999.

RAUSAND M. y VATN J. *Reliability Centered Maintenance. En: Risk and Reliability in marine Technology*, Balkema, Holanda: Soares editor, 1998. p. 5-27.

ROJAS ARIAS, Jaime. Introducción a la confiabilidad, Universidad de los Andes. Bogotá, 1975, cap. 1, 5, 6, 7, 8.

SAE. JA1011: Evaluación de criterios del proceso de mantenimiento centrado en confiabilidad, agosto 1999. p. 2-13.

SAE. JA1012: Guía para el mantenimiento centrado en confiabilidad, enero 2002. p. 4-50.

ULLMANN, Enrique P. Pensando en voz alta. En: Mantenimiento centro de beneficios. Madrid, 2002.

## CIBERGRAFÍA

*Aladon@*

Artículos de página oficial Aladon Ltda. [en línea]. Disponible en Internet: <<http://www.aladon.com/>> [consulta: 1 marzo 2008]

*Argos@*

Página oficial de Argos S.A. [en línea]. Disponible en Internet: <<http://www.argos.com.co>> [consulta: 5 marzo 2008]

*ESReDA@*

Página oficial de European safety, Reliability and data association (ESReDA). [en línea]. Disponible en Internet: <<http://www.esreda.org>> [consulta: 1 marzo 2008]

*Historia@*

<http://www.mtc.com.my/publication/library/drying/ch22.htm>

*Johan @*

<http://johan.jmc.utfsm.cl/pi/Cementodoc1.PDF>

*kiln@*

<http://www.mtc.com.my/publication/library/drying/ch22.htm>

*maintenance technology@*

Maintenance technology. Reliability centered Maintenance (RCM) and maintenance steering grup 3 (MSG3). [en línea]. Disponible en Internet: <<http://www.staff.city.ac.uk/~bonds/technology.htm#FOUNDATION%20OF>> [consulta: 5 marzo 2008 ]

ntu@

RAUSAND, Marvin. System analysis failure modes effects and criticality analysis. chap 3. En: system reliability theory. [en línea]. 2th ed. Wiley 2004 [slides]. Disponible en Internet: <<http://frigg.ivt.ntnu.no/ross/slides/fmeca.pdf>> [consulta: 20 ene. 2008]

*Sintef@*

Página oficial de offshore Reliability data (OREDA). [en línea]. Disponible en Internet: <<http://www.sintef.no/static/tl/projects/oreda/>> [consulta: 10marzo 2008 ]

Tijuana@

Industrial Tijuana. capacitación. Introducción al mantenimiento centrado en la confiabilidad. [en línea]. Disponible en Internet: <<http://www.industrialtijuana.com/pdf/B-5.pdf>> [consulta: 20 marzo 2008 ]