

## PMO – Optimización de Mantenimiento

### El Análisis de Mantenimiento del Futuro

NOTA: Para leer las referencias que se encuentran en paréntesis, favor de dar clic sobre el numero de referencia, para volver al texto anterior, haga clic en back de su barra de navegación.

### Introducción

El Mantenimiento tiene uno de los mayores costos operativos controlables, en la industria intensiva en capital. Es a su vez, una función crítica del negocio que impacta sobre el riesgo comercial, volumen de producción, calidad de producción, costos operacionales, seguridad y riesgo medioambiental. Por ello el Mantenimiento, es visto, en organizaciones líder, no sólo como un costo que debe ser evitado, sino en conjunto con la Ingeniería de Confiabilidad, como una función impulsora de los negocios. Está considerado como un aporte valioso asociado al negocio, que contribuye a la productividad de los activos y al mejoramiento continuo del desempeño de los mismos.

El dilema que la mayoría de nosotros encaramos (y normalmente, no es de nuestro entorno de responsabilidades); consiste en que somos gestores, que aisladamente debemos mejorar la confiabilidad, dentro de organizaciones que escasamente disponen de recursos suficientes para mantener las plantas en funcionamiento.

En este caso, los escasos recursos de mantenimiento son racionados y las fallas los consumen. El mantenimiento preventivo se lesiona, resultando inevitablemente en una mayor frecuencia de fallas, generando un círculo vicioso (Ver Figura 1).

Adicionalmente, a la pérdida de productividad debido a un mantenimiento no planificado, la mentalidad de reparar rápidamente promueve un “mantenimiento apaga incendios”, o mantenimiento temporal, que comúnmente agrava la situación. Las reparaciones temporales requieren trabajo adicional para su corrección definitiva, o en el peor de los casos, fallan antes de ser corregidas.

A menudo en el esfuerzo de bajar costos, se recurre a reducciones de personal, con lo que declina la moral, el personal restante se deja consumir por la desesperación y tensión, conduciendo a una baja de los estándares del trabajo.

El círculo vicioso gradualmente se alimenta a si mismo llevando a las organizaciones a ser casi totalmente reactivas.



Figura 1. Círculo Vicioso del Mantenimiento

En ese tipo de organizaciones, pareciera que la disponibilidad de planta cae y se estabiliza al más bajo nivel; un nivel tal en el que ya no se producen nuevas fallas, porque la planta prácticamente no opera; en otras palabras, está siendo reparada!

Para muchos, la solución más obvia es incrementar el personal. Sin embargo este enfoque no siempre es el mejor. En el escenario económico actual, la cultura empresarial está enfocada a la reducción de costos y aquellos gerentes empeñados en los aumentos de personal raramente tendrán éxito.

Hoy en día, los Gerentes de Activos exitosos, son aquellos que rompen el círculo vicioso, logrando mejorar el proceso de mantenimiento e incrementando la productividad de los activos y del recurso humano.

Mejorar los procesos de mantenimiento implica la reingeniería de los mismos y un incremento en la eficacia de los recursos, para ello se debe:

- Eliminar todas las tareas de mantenimiento sin propósito o que no sean costo efectivas
- Eliminar todos los esfuerzos duplicados en que diferentes grupos están ejecutando igual **PM** (Mantenimiento Preventivo) sobre el mismo equipo
- Dirigir la filosofía de mantenimiento al mantenimiento basado en condición
- Agregar tareas de mantenimiento orientadas a prevenir los Modo de Falla (1), que históricamente han derivado en fallas, con criterio y priorización económica
- Distribuir la carga de trabajo hacia los operadores y toda la organización

La visión a largo plazo deberá promover un proceso tal que, logre sus metas en forma sistemática y permanece como "programa dinámico", generando un mejoramiento continuo alimentado por el aprendizaje de nuevas experiencias y avances tecnológicos.

La metodología para enfrentar el círculo vicioso de mantenimiento reactivo se ha estado desarrollando durante los últimos cinco años con la cooperación de compañías Australianas muy notables e intensivas en Activos.

El programa es patrocinado por SIRFrt (2) y es el método de análisis preferido por una de las empresas de minería más grandes del mundo. La metodología, programas de entrenamiento y el software se conocen como PMO2000TM. Para mas información visite [www.pmooptimisation.com](http://www.pmooptimisation.com)

Este documento esta dividido en tres secciones

## **Sección 1. Planned Maintenance Optimisation (PMO) – Análisis de Mantenimiento del**

### **Futuro**

El objetivo de esta sección es describir el proceso de PMOptimisation, usando la metodología de PMO2000TM. Esta sección también busca mostrar como enfrentar aquellos problemas que tienen los gerentes de activos y como PMOptimisation puede ayudar a resolver estos problemas.

## **Sección 2. Comparación de los métodos de análisis de mantenimiento**

### **PMOptimisation y RCM (3)**

Esta sección busca explicar las diferencias entre los procesos de PMO y RCM. El RCM es

un proceso desarrollado por Nowlan and Heap (1978) para aplicar en la fase de diseño del ciclo de vida de los activos (4) y PMO es un proceso desarrollado para activos en funcionamiento. El documento demuestra como PMO genera el mismo programa de mantenimiento que RCM, seis veces mas rápido y seis veces más económico (Jonson, 1995).

Esta sección también expone una defensa contra aquellos documentos, tal vez algo emotivo, que tienen como objetivo desacreditar todo proceso de análisis de mantenimiento que no cumple con la SAE JA1011, titulada "Criterio de Evaluación para los procesos de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad".

## **Sección 3. Métodos estadísticos de análisis de mantenimiento**

Esta sección presenta una breve visión de las ventajas y desventajas del uso de métodos estadísticos en los análisis de mantenimiento.

### **El Origen de los Problemas de Mantenimiento**

#### ***Fase de diseño y Comisionamiento***

Por lo general los ingenieros de mantenimiento tienen que encargarse de los diseños de alguien más, ya sean buenos o malos. Cuando el diseño ha finalizado, se inicia la construcción y se completa, aquí la planta inicia su comisionamiento. El ingeniero de mantenimiento se involucra (si tiene suerte) durante el desarrollo de alguna de las fases. Muy pronto se encuentra con que el presupuesto de mantenimiento debe ser usado para finalizar la construcción y cubrir gastos extras, se debe encargar del arribo desordenado de repuestos y básicamente tiene poca o ninguna información sobre los modos y efectos de falla de la planta. Muy pocas veces se entrega al departamento de mantenimiento la documentación sobre los requerimientos de mantenimiento y mucho menos, un plan de mantenimiento de una planta nueva.

Las organizaciones que aplican las mejores prácticas desarrollan un plan de mantenimiento basado en RCM durante la fase de diseño. Desafortunadamente para la mayoría de las organizaciones, cualquier tipo de ingeniería de confiabilidad o análisis de fallas se realiza de manera muy informal y no se involucra al departamento de mantenimiento para que diseñe políticas y estrategias de gestión de activos.

#### ***Post Comisionamiento***

Después del Comisionamiento (o a veces antes) el equipo de diseño se separa y sus integrantes inician nuevos proyectos. El ingeniero de confiabilidad es abandonado y debe descubrir por si mismo las intenciones de diseño de la planta, los modos de falla y sus consecuencias, mientras, el personal de operaciones esta aprendiendo como operar la planta, experimenta con ella, llevándola a límites operacionales, ocasionalmente límites para los que la planta no fue diseñada. Se suma a lo anterior, el tiempo y el presupuesto limitado para hacer cambios obvios en el diseño o en problemas de mantenibilidad de la nueva planta.

La tarea de definir la política de mantenimiento (5) de la planta es una prioridad, pero por lo general es una tarea desalentadora. La política se define de forma rápida y por lo general por personas no idóneas para ello. Los problemas que se presentan desde el principio son:

- No hay coherencia entre la filosofía de análisis y las políticas que se implementan.

El personal de mantenimiento, por su resistencia al cambio, define por lo general

- políticas de mantenimiento basadas en mantenimiento intrusivo, overhauls y/o exceso de mantenimiento con el objetivo de prevenir fallas, creando más perjuicio que bien a la confiabilidad de la planta (6).
- No hay pautas para auditar el programa o plan, sólo quienes establecieron las políticas conocen su fundamento (si lo hubiere). Resulta prácticamente imposible controlar el plan y medir sus resultados de forma objetiva.

### ***Planta en Operación***

Una vez la planta esta en operación y falla, se crean más tareas de mantenimiento, se incrementan las frecuencias de las existentes y se inicia la duplicación de tareas, adicionalmente el personal de mantenimiento para demostrar que hace algo, crea y ejecuta tareas que supuestamente van a prevenir fallas, pero que en realidad no tienen ningún propósito.

Los requerimientos del Mantenimiento Preventivo (PM) exceden los recursos disponibles, se disminuyen las tareas preventivas, aparecen fallas prevenibles y el mantenimiento no planeado consume mas horas hombre de las necesarias. El número de reparaciones temporales se sale de control, se generan costos extra relacionados con la conversión de estas reparaciones temporales a definitivas y/o se desperdician más recursos como consecuencia del olvido de los trabajos temporales que se han desarrollado.

El círculo vicioso de fallas, reparaciones temporales y disminución de PM gana protagonismo y se consolida.

Aparecen consultores de Gestión que proponen un enfoque de reducción de costos y recomiendan recortes de personal y presupuesto, lo cual sólo sirve para fortalecer el círculo vicioso e incrementar las rpm del mantenimiento. El resultado final es un problema moral para mantenimiento y un bajo desempeño de la planta.

Muchas organizaciones recurren a RCM para desarrollar un programa de mantenimiento con el objetivo de recuperar el control. En el panorama del círculo vicioso al que se ha llegado utilizar RCM como herramienta de análisis es altamente ineficiente, ya que consume cantidades excesivas de recursos valiosos y escasos para mantenimiento y operaciones.

Una característica clave que hace a RCM ineficiente es que no reconoce la experiencia y el valor del programa actual de mantenimiento. RCM inicia los análisis desde cero, desarrollando un programad de mantenimiento desde las funciones hacia abajo.

El gran fracaso de aplicar RCM en organizaciones maduras no es sorprendente cuando se entiende que RCM es un proceso desarrollado por Nowlan and Heap (1978) para aplicar en la fase del diseño del ciclo de vida de los activos (Moubray 1997). RCM no fue creado para aplicar como herramienta de análisis en organizaciones maduras.

### **Tácticas de Mejoramiento**

#### ***La experiencia de Dupont – Cuatro estrategias***

Existen estudios que dan recomendaciones para resolver el conflicto, aparte de buscar formas para realizar cambios culturales, los gerentes de activos deben enfocarse en áreas claves, como:

- Desarrollar políticas de mantenimiento reales y bien enfocadas
- Mejorar la planeación y la programación del mantenimiento bajo políticas revisadas
- Enfocar los esfuerzos en la eliminación de las fallas

El modelo de DuPont aparece en el Manufacturing Game (7) que ilustra los puntos anteriores.

La siguiente tabla muestra como DuPont ha modelado el efecto de varias estrategias de mantenimiento a la disponibilidad de una planta en operación. **Estrategia de Mantenimiento % Cambio en**

Estrategia de Mantenimiento	% Cambio en Disponibilidad	Disponibilidad %
Reactivo		83,5%
Sólo Planeación	+ 0,5%	
Sólo Programación	+ 0,8%	
Sólo Preventivo / Predictivo	- 2,4%	
Las tres estrategias	+ 5,1%	88,6%
<b>Mas eliminación de fallas (RCA)</b>	<b>+ 14,8%</b>	<b>93,3%</b>

Tabla 1. La tabla muestra diferentes estrategias de mantenimiento y sus efectos en la disponibilidad de una planta. Tomado de Manufacturing Game – (Ledet 1994) [www.manufacturinggame.com](http://www.manufacturinggame.com)

El análisis de DuPont muestra que una empresa enfocada únicamente en mejorar la planeación, su disponibilidad mejorara en un 0,5%. Si sólo se enfoca en la programación de mantenimiento, la disponibilidad mejorara en un 0,8%. Si sólo se orienta hacia el mantenimiento preventivo y predictivo, la disponibilidad disminuirá 2,4% debido a exceso de mantenimiento. Sí la organización trabaja en los tres aspectos, habrá una mejora del 5.1% en la disponibilidad.

Estos resultados son bastante atractivos, sin embargo DuPont (Ledet 1994) encontró que añadiendo un proceso de eliminación de fallas a las estrategias ya mencionadas lograría un incremento del 14,8% en la disponibilidad de la planta (ver Tabla 1).

### **Problemas con la mayoría de los programas de Mantenimiento Preventivo**

El problema más común con los programas de mantenimiento de las plantas maduras que no fueron diseñados solidamente desde un principio, es que entre el 40% y 60% de las tareas de Mantenimiento Preventivo hacen muy poco por el desempeño de la planta (Moubray 1997). Las conclusiones de varios estudios de PMO son:

- Existen tareas duplicadas.
- Algunas tareas se hacen muy frecuentemente y otras muy tarde.
- Algunas tareas no generan beneficios.

- Algunas tareas son intrusivas o basadas en overhauls, cuando deberían ser basadas en condición.
- Se presentan muchas fallas que son costosas y fácilmente prevenibles.

Esto genera un dilema para el mejoramiento de la productividad, ya que por más que la planeación y la programación sean perfectas no ayudaran a mejorar un programa de mantenimiento que por si mismo es ineficiente. Trabajar con un programa 50% útil y 50% inútil con la esperanza de alcanzar el 100% de cumplimiento no puede considerarse buen gerenciamiento de activos!

El análisis de DuPont indica que se debe implementar un proceso que:

- Pueda definir la mezcla apropiada entre mantenimiento preventivo y predictivo.
- Pueda generar un programa de mantenimiento en donde las tareas y sus frecuencias sean sólidas y aporten valor agregado.
- Ofrezca diferentes opciones para la minimización o eliminación de fallas.

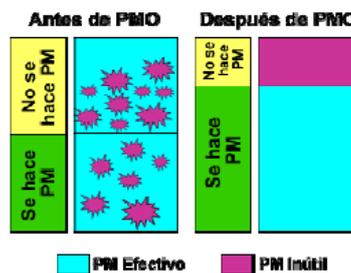


Figura 2. Como trabaja PMO

La recomendación, para implementar todas las estrategias es asegurar que las decisiones se toman basadas en un análisis de RCM, realizado en la fase de diseño de una planta nueva y para la planta en funcionamiento, PMO es el medio para racionalizar todo el Mantenimiento Preventivo (PM) y así asegurar que existe valor agregado y que no hay duplicación de tareas (ver Figura 2).

## PMO2000 de la A a la Z

### Visión General

El proceso de PMO2000 consta de nueve pasos. Estos pasos se listan a continuación y se discuten en las siguientes páginas.

#### Paso 1 Recopilación de Tareas

#### Paso 2 Análisis de Modos de Falla (FMA)

#### Paso 3 Racionalización y Revisión del FMA

#### **Paso 4 Análisis Funcional (Opcional)**

#### **Paso 5 Evaluación de Consecuencias**

#### **Paso 6 Definición de la Política de Mantenimiento**

#### **Paso 7 Agrupación y Revisión**

#### **Paso 8 Aprobación e Implementación**

#### **Paso 9 Programa Dinámico**

#### ***Ranking del Proyecto***

Se debe anotar que un proceso de PMO2000, deberá basarse en la criticidad o ranking de los sistemas de la planta. Dicha criticidad se puede obtener revisando la jerarquización de equipos o su priorización en la programación de trabajos (8) y subdividiendo o filtrando la información por sistemas y/o equipos para su análisis. Una vez se identifica y mide la criticidad de los sistemas, el proyecto se enfoca en el cumplimiento de los objetivos estratégicos de la organización. Los sistemas críticos tienden a ser los que impactan la organización de la siguiente manera:

- Presentan riesgos altos para la seguridad y el medio ambiente.
- Presentan un impacto significativo en términos de costos y producción de la planta.
- Consumen mano de obra en exceso para ser operados y mantenidos.

Una vez se ha realizado el estudio de criticidad, esta es la base para determinar la prioridad en la que se analizaran los sistemas y el rigor de cada uno de los análisis.

#### **PASO 1 – Recopilación de Tareas**

PMOptimisation inicia recopilando o documentando el programa de mantenimiento existente (formal o informal) y subiéndolo a una base de datos. Es importante entender que el mantenimiento lo realiza un grupo amplio de personas, incluyendo los operadores. También es muy importante entender que en la mayoría de organizaciones el PM se hace por iniciativa propia de los técnicos o de los operadores y no existe documentación formal; cuando esta situación se presenta simplemente se debe documentar lo que el personal ya ha estado haciendo.

Es muy común que las organizaciones de mantenimiento tengan algún tipo de PM, ya sea formal o informal; es raro encontrar organizaciones que no tengan ningún tipo de PM. La Figura 3, ilustra las fuentes de PM.

### Fuentes del Mantenimiento Preventivo (PM)

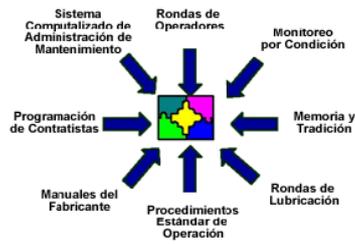


Figura 3

## PASO 2 – Análisis de Modos de Falla (FMA)

En el Paso 2 se debe involucrar a todo el personal de la planta, se trabajará en equipos multidisciplinarios quienes se encargaran de identificar para qué modos de falla están enfocadas las tareas de mantenimiento. La Tabla 2 ilustra un ejemplo del resultado del Paso 2.

Tarea	Frecuencia	Responsable	Falla
Tarea 1	Diario	Operador	Falla A
Tarea 2	Diario	Operador	Falla B
Tarea 3	6 meses	Instalador	Falla C
Tarea 4	6 meses	Instalador	Falla A
Tarea 5	Anual	Electricista	Falla B
Tarea 6	Semanal	Operador	Falla C

Tabla 2. Ilustración Paso 2

## PASO 3 – Racionalización y revisión del FMA

Ordenando la información por Modos de Falla hace más fácil la identificación de duplicación de tareas. La duplicación de tareas se presenta cuando al mismo Modo de Falla se le aplican varias rutinas de PM por parte de las diferentes especialidades, por parte de los operadores y por parte de los especialistas de monitoreo.

En este paso el equipo de trabajo revisa los modos de falla resultado del FMA y agrega aquellos modos de falla faltantes. La lista de los modos se elabora con base en el historial de fallas, documentación técnica (usualmente diagramas de tubería e instrumentación (P&IDs)) o simplemente con la experiencia del equipo de trabajo. La Tabla 3 ilustra el resultado del Paso 3. Nótese la adición de la Falla "D", la cual fue identificada durante el desarrollo de este Paso. La adición de la Falla D puede haber sido resultado de la revisión del historial de fallas y/o de la documentación técnica.

Tarea	Responsable	Falla
Tarea 1	Operador	Falla A
Tarea 4	Instalador	Falla A
Tarea 7	Mecánico	Falla A
Tarea 2	Operador	Falla B
Tarea 5	Electricista	Falla B
Tarea 3	Instalador	Falla C
Tarea 6	Operador	Falla C
		Falla D

Tabla 3. Ilustración Paso 3

## PASO 4 – Análisis Funcional

La función que se pierde con cada falla se puede determinar en este Paso. Este Paso es opcional y se justifica en caso de que se deban realizar análisis a equipos bastante críticos o muy complejos, en donde es esencial el entendimiento detallado de todas las funciones del equipo para el aseguramiento de un programa de mantenimiento sólido. Para aquellos equipos poco críticos o sistemas simples, la identificación de las funciones agrega tiempo y costo, más

no beneficios tangibles. La Tabla 4 ilustra el Paso 4.

Tarea	Responsable	Falla	Función
Tarea 1	Operador	Falla A	Función 1
Tarea 4	Instalador	Falla A	
Tarea 7	Mecánico	Falla A	
Tarea 2	Operador	Falla B	Función 1
Tarea 5	Electricista	Falla B	
Tarea 3	Instalador	Falla C	Función 2
Tarea 6	Operador	Falla C	
		Falla D	Función 1

Tabla 4. Ilustración Paso 4

## PASO 5 – Evaluación de Consecuencias

En este Paso cada modo de falla es analizado para determinar si las fallas son ocultas o evidentes. Para aquellas fallas evidentes se realiza un análisis de riesgos y consecuencias operacionales. La Tabla 5 ilustra el Paso 5.

Tarea	Responsable	Falla	Función	Consecuencia
Tarea 1	Operador	Falla A	Función 1	Operacional
Tarea 4	Instalador	Falla A		
Tarea 7	Mecánico	Falla A		
Tarea 2	Operador	Falla B	Función 1	Operacional
Tarea 5	Electricista	Falla B		
Tarea 3	Instalador	Falla C	Función 2	Oculto
Tarea 6	Operador	Falla C		
		Falla D	Función 1	Operacional

Tabla 5. Ilustración Paso 5

## PASO 6 – Definición de la Política de Mantenimiento

La filosofía moderna de mantenimiento se basa en la premisa que los programas de mantenimiento exitosos se enfocan más en las consecuencias de las fallas que en los activos en si.

En este Paso, cada modo de falla es analizado bajo los principios del Mantenimiento

Centrado en Confiabilidad (RCM) y se establecen las políticas nuevas o revisadas de mantenimiento haciendo evidente lo siguiente:

- Los elementos del programa actual de mantenimiento que son costo efectivos y los que no lo son, estos últimos deben eliminarse,
- Que tareas serían más efectivas y menos costosas si fueran basadas en condición, en lugar de llevarlas a falla y viceversa,
- Que tareas no aportan beneficios y deben ser eliminadas del programa,
- Que tareas serían más efectivas si se realizaran bajo diferentes rutinas,
- Que fallas se manejarían mejor por medio del uso de tecnología avanzada o simple,
- Que tipo de información se debe recolectar para predecir mejor el comportamiento del equipo durante su ciclo de vida, y

- Que fallas se deben eliminar con la ayuda de un Análisis de Causa Raíz (RCA)

La Tabla 6 ilustra el Paso 6.

Falla	Función	Consecuencia	Política	Rutina
Falla A	Función 1	Operacional	Inspección	Diaria
Falla A				
Falla B	Función 1	Operacional	No PM	
Falla B				
Falla C	Función 2	Oculto	Pruebas	Annual
Falla C				
Falla D	Función 1	Operacional	Inspección	Semanal

Tabla 6. Ilustra Paso 6

### PASO 7 – Agrupación y Revisión

Una vez el análisis de las tareas haya finalizado, el equipo de trabajo establece el método mas eficiente y efectivo para administrar el mantenimiento de los activos teniendo en cuenta limitantes de producción y otros. En este paso es posible que haya transferencia de responsabilidades en la ejecución de las tareas de PM entre los especialistas de mantenimiento y los operadores para lograr eficiencia y ganancias en producción.

### PASO 8 – Aprobación e Implementación

En este Paso, el resultado del análisis se presenta a la alta dirección para su revisión y comentarios. El equipo de trabajo realiza la presentación usando el reporte automático generado por el software de PMO2000, dicho software muestra de forma detallada los cambios a implementar y su justificación.

Una vez se ha aprobado el programa, inicia la etapa más importante de PMO2000, su implementación. La implementación es la etapa que consume más tiempo y en que se pueden presentar más dificultades. Es importante ejercer liderazgo y estar atento a los detalles para hacer de la implementación un éxito.

Las dificultades en la implementación se incrementan considerablemente en organizaciones que cuentan con muchos turnos y en aquellas organizaciones conservadoras.

### PASO 9 – Programa Dinámico

Durante el desarrollo de los Pasos 1 al 9, el proceso de PMOptimisation ha establecido una estructura racional y costo efectiva de PM. En el “Programa Dinámico”, el plan de PM se consolida y se toma control de la planta, cuando se reemplaza el mantenimiento reactivo por uno planeado. De este punto en adelante el mejoramiento puede acelerarse fácilmente y los recursos que se liberan pueden enfocarse a corregir defectos de diseño o limitaciones inherentes a la operación.

Durante este paso, varios de los procesos vitales de la Gestión de los Activos pueden afinarse mientras la rata de mejoramiento se acelera. Estos procesos son:

- Estrategia de Producción y Mantenimiento
- Medición de Desempeño

- Reportes y Eliminación de Fallas
- Planeación y Programación
- Gestión de Inventarios
- Workshops y Prácticas de Mantenimiento

La intención final de este Paso es la de crear una organización que busca continuamente su mejoramiento, para ello hay que crear conciencia de que es importante evaluar las garantías de todas las tareas y cada falla no planeada que se presente.

Para lograr las metas es importante contar con personal capacitado en técnicas de análisis e igualmente contar con la motivación al personal por parte de la dirección para crear en el trabajador un sentido de pertenecía, de compromiso y de creatividad para mejorar su trabajo y optimizar costos de producción.

### **Implementando un Programa de PMOptimisation Exitoso**

#### ***Vendiendo Mantenimiento como un Proceso no como un Departamento***

Los programas de cambio no son fáciles de implementar en las organizaciones y menos cuando estas ya han iniciado el círculo vicioso de mantenimiento.

La experiencia del autor demuestra que en la mayoría de los casos es necesario un cambio fundamental en el comportamiento y la motivación a todos los niveles de la organización. Esto significa que el comportamiento y las prioridades de toma de decisiones de los coordinadores también deben ser modificados. Por encima de todo debe haber un compromiso a largo plazo y es posible que se presenten pérdidas a corto plazo, sin embargo estas valdrán la pena, ya que el retorno a la inversión se generará en el futuro próximo.

Los aspectos más importantes de la buena gestión de un programa de PMOptimisation para lograr la rotura del círculo vicioso, se describen en los siguientes párrafos:

#### ***Se deben escoger proyectos que no se enfocan sólo en un aspecto***

Es necesaria una combinación de proyectos para obtener resultados en:

- Incremento de la disponibilidad
- Reducción de los requerimientos de horas hombre

En muchos casos significa que se deben afrontar aquellos problemas de confiabilidad del proceso, cuello de botella, e igualmente analizar componentes que requieren mantenimiento intensivo (9) y son prolíferos en la planta.

Las razones para emprender proyectos que generan productividad laboral en cambio de disponibilidad de la maquinaria son:

- Los supervisores serán los primeros en colaborar con el programa si ven que existe beneficio en invertir su trabajo. La meta mínima de retorno laboral debe ser de cinco días al año por cada día invertido.
- El retorno en la productividad laboral es incremental (se puede reinvertir para obtener más productividad) mientras las mejoras en disponibilidad son finitas.

### ***Recolección de información del antes y el después***

La toma de datos acerca de la confiabilidad de la planta trae muchos beneficios. Los dos más importantes son:

- Direccionar el análisis hacia el área de oportunidad y
- Proveer las bases para los equipos de trabajo en los proyectos y así demostrar el valor del trabajo realizado.

### ***Crear equipos multifuncionales desde el taller***

PMOptimisation no es un proceso de perfección estadística, ni de trabajo de oficina, es un proceso empírico que se basa en el mantenimiento preventivo y en análisis racional de las tareas. PMOptimisation considera que el involucramiento del personal es bastante constructivo y crea sentido de pertenencia y compromiso importante para lograr cambios. No involucrar al personal que ejecutará los cambios creará barreras en la implementación de los mismos.

### ***Integración de los sistemas de administración de información de operaciones y***

#### ***Mantenimiento***

Para lograr que la redistribución de la carga de trabajo sea efectiva, es importante que si existen varios sistemas de programación de mantenimiento, la información venga de una sola base de datos o del mismo origen. En la mayoría de organizaciones no se presenta este caso, ya que el departamento de operaciones maneja un sistema separado del sistema que manejan los especialistas de mantenimiento.

### ***Implementar los resultados lo más pronto posible***

Existe una tendencia a celebrar el éxito de un proyecto cuando se ha terminado con el análisis, se inician nuevos proyectos y la implementación de los resultados queda olvidada y se realiza pobremente. Esto es bastante malo, ya que se han usado recursos escasos y se han desperdiciado. Sin una implementación exitosa, el trabajo invertido en el análisis generará costos sin retorno y no cumplirá con las expectativas del personal. El personal culpara a la dirección y será muy difícil obtener la participación de la gente en proyectos futuros.

### ***Estructuras disfuncionales de la organización***

La estructura organizacional de las industrias intensivas en capital se puede describir como departamental, es decir, mantenimiento y operaciones cuentan con presupuestos, indicadores de gestión y estructuras administrativas separadas. Existen ventajas en las estructuras departamentales, sin embargo, dichas estructuras por lo general pierden eficiencia así:

- Conflicto entre las metas y/u objetivos de cada departamento, lo cual lleva a las directivas a tomar decisiones que no son congruentes con las metas globales del negocio. Las más comunes son las metas a corto plazo de producción que por lo general chocan con los objetivos de mantenimiento de reducir sus costos.

- Duplicación de esfuerzos por parte de los departamentos en alcanzar las mismas metas independientemente. La programación de PM de los mecánicos, los electricistas y de los operadores caen en este vicio, ya que cada equipo de trabajo revisa la misma maquina por los mismos modos de falla.
- Excesiva burocracia a todos los niveles en el proceso de toma de decisiones y aprobación. Esto se debe a que los jefes de los diferentes departamentos o áreas tienen diferentes objetivos.
- Demarcación excesiva en la definición de roles y responsabilidades. La facilidad de tomar decisiones se complica debido a las tradiciones de la organización, lo cual previene el uso eficiente de los recursos
- Proliferación de sistemas de información y bases de datos independientes. En el escenario más común, operaciones y mantenimiento manejan la información sobre sus actividades independientemente del Sistema de Administración de Información de Mantenimiento (CMMS).
- El proceso de eliminación de fallas es visto como una responsabilidad de ingeniería, en donde los problemas son generados por muchos factores y deben ser resueltos por equipos de trabajo multidisciplinarios. Muchos de estos factores son obvios y pueden ser resueltos por parte de los técnicos, quienes gracias a la práctica y la experiencia pueden resolver problemas con consecuencias secundarias.

## **Conclusión**

Existen varios factores que contribuyen a las dificultades que debe enfrentar el Gerente de Activos actual. Para lograr la implementación de cambios en el desempeño de la función de mantenimiento el gerente de activos debe empezar por entender donde nacen esos factores, como impactan el desempeño del negocio y como se deben enfrentar efectivamente. Hay una forma de evitar el círculo vicioso de mantenimiento y la Optimización o Racionalización de las Tareas de Mantenimiento es la estrategia fundamental en este proceso.

Para lograr el rompimiento del círculo vicioso de mantenimiento, los gerentes de activos deben enfocarse en las áreas del mantenimiento preventivo y la eliminación de fallas. Para mejorar el mantenimiento preventivo, debe existir un cambio radical de las organizaciones, a un ambiente en donde no exista la duplicación del esfuerzo en el plan de PM, donde toda tarea de PM tenga un propósito específico, en donde todas las tareas de PM se cumplan en las frecuencias adecuadas y que exista un balance adecuado entre mantenimiento basado en condición y overhaul.

Existen muchas herramientas de análisis estadístico de mantenimiento en el mercado, sin embargo, los usuarios deben tener mucho cuidado en su escogencia. Se debe tener en mente que se puede gastar mucho dinero en paquetes de software y tiempo en la recolección de información, que después de años de esfuerzo produce resultados poco significativos.

## **Comparación de los métodos de análisis de mantenimiento PMO y RCM**

### ***Métodos de definición de los Requerimientos Iniciales de Mantenimiento***

Los métodos más comunes para definir los requerimientos iniciales de la planta y los equipos son los siguientes:

- RCM,
- Streamline RCM,

- Métodos estadísticos ó
- Experiencia, prueba y error.

El origen de estos procesos se discute a continuación.

## RCM

Nowlan y Heap (1978) usaron el término de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y desarrollaron el método original. RCM no fue desarrollado para su aplicación en activos “en servicio”, sin embargo, en ausencia de mejores metodologías desde 1978, RCM se ha venido implementando en las plantas después de su comisionamiento. Después de más de 20 años desde su desarrollo, RCM no ha logrado convertirse en una actividad del día a día en las organizaciones. Pocas organizaciones han aplicado RCM a algo diferente que a sus activos más críticos, lo que indica serias dificultades asociadas a la aplicación de RCM en organizaciones con plantas maduras.

## Streamlined RCM

Debido a la percepción general de que RCM es un proceso largo y complicado, un número de versiones cortas de RCM invadieron el mercado con la intención de acelerar el análisis e incrementar el valor del esfuerzo invertido. Muchos de los métodos nuevos usan las iniciales RCM, sin embargo no cumplen con el trabajo desarrollado por Nowlan y Heap y menos con el estándar SAE. Estos enfoques se conocen como Streamlined RCM techniques.

## Métodos Estadísticos

Hay tres tipos de análisis estadísticos principales conocidos por el autor.

1. Uno de ellos se basa en MIL-STD 2173 (10) y trabaja bajo la premisa de que no existe tarea de inspección 100% efectiva. Los algoritmos ajustan el intervalo de tareas a condición para justificar los métodos de inspección no perfectos.

2. Otro de los métodos se basa en la noción que entre más frecuentes son las inspecciones, mas costoso es el mantenimiento, pero hay menos riesgos de falla. El objetivo de mantenimiento bajo este algoritmo es determinar el menor costo de mantenimiento. Este algoritmo no funciona si las inspecciones son casi 100% fiables o si se presentan fallas controladas (11), si vemos las inspecciones dentro de un intervalo PF (12) se nota que entre más inspecciones se realicen se incrementa el costo de mantenimiento y no se logran reducir las probabilidades de falla.

3. El tercer método se basa en los análisis Weibull, este método tiene el problema de que por lo general se cuenta con baja integridad de la información.

El gran problema con los métodos estadísticos es que en la mayoría de las industrias el histórico de fallas no es confiable e incompleto por ello las inferencias estadísticas tomadas de estos datos son altamente inexactas y no son confiables. La información de contabilidad, de los costos de PM, reparaciones y fallas, también son entradas para los algoritmos, estas entradas están sujetas a los caprichos de los sistemas de información y de los administradores lo cual no asegura la confiabilidad de la misma.

Otro problema que se presenta es que los métodos estadísticos son usados por ingenieros o contratistas que no están lo suficientemente familiarizados con los equipos de la planta ni con la forma en que se operan. Por lo general el resultado es un programa que no se ajusta a la

realidad y es desaprobado por los especialistas y operadores, debido a la baja calidad de los resultados y a que no se les involucro en el proceso.

Algunas explicaciones de los dos primeros métodos se encontrará en la Sección 3 de este documento.

### Experiencia, Prueba y Error

En muchos casos los programas de adquisición de capital fallan en reconocer la necesidad de definir un programa de mantenimiento antes de la etapa de "Operación" del ciclo de vida. Por lo general las plantas se instalan e inician operación sin un plan formal de mantenimiento y con el tiempo el personal de operaciones y mantenimiento por iniciativa propia empieza a ejecutar actividades de inspección una vez se presentan las fallas se agregan actividades a este programa no formal y una vez se incrementan las tareas, algunas organizaciones deciden formalizar el trabajo en papel o en forma digital, mientras otras organizaciones continúan ejecutando el trabajo informalmente. En la mayoría de organizaciones se ejecuta algún tipo de mantenimiento preventivo, el problema es que no se encuentra documentado, por lo tanto no esta formalizado.

### ***Métodos de Revisión de los Requerimientos de Mantenimiento***

#### PMOptimisation

Independientemente de la forma en que se desarrolle el programa de mantenimiento siempre existirá la necesidad de su revisión y actualización basada en el historial de fallas, en los cambios operacionales y la aparición de nuevas tecnologías de mantenimiento predictivo. El proceso genérico para realizar dichos análisis se conoce como Planned Maintenance Optimisation (PMO). PMO se ha usado, desde que el mundo se industrializó y la humanidad entendió los beneficios de la ejecución de mantenimiento preventivo. PMO como metodología de análisis se ha mejorado con el objetivo de reflejar la lógica de decisión de RCM, desde su formulación en 1978.

Hay varios métodos creados bajo las iniciales de PMO y uno de estos ha sido implementado por la industria Nuclear de los Estados Unidos por más de 8 años y ha sido reconocido como un gran beneficio por la Comisión Reguladora Nuclear Norteamericana – North American Nuclear Regulatory Commission (Jonson 1995).

Todos los métodos de PMO tienen sus diferencias y no hay un estándar diseñado para PMO. Las discusiones referenciadas en este documento se basan en el método de PMO conocido como PMO2000. Algunos de los comentarios y comparaciones hechas entre PMO y otras metodologías podrán no aplicar para todos los métodos de PMO.

PMO2000 se ha estado desarrollando durante los últimos cinco años por OMCS con la cooperación de varias compañías Australianas. Existen 12 usuarios de PMO2000 en la región del Pacífico y Australia. El proceso de PMO es patrocinado por SIRF Roundtables Ltd y es la herramienta de elección por una de las empresas mineras más grandes del mundo. PMO2000 es propiedad intelectual de OMCS y se describe en la Sección 1 de este documento.

### **Comparando RCM y PMO**

#### ***Que es RCM***

De acuerdo con el estándar SAEJA1011 un programa de RCM debe asegurar que las siguientes siete preguntas sean contestadas satisfactoriamente y en la secuencia en que aparecen:

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño deseados del equipo en su contexto

operacional (funciones)?

2. ¿De que forma puede fallar y no cumplir con sus funciones (fallas funcionales)?
3. ¿Qué causa cada falla funcional (modos de falla)?
4. ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla (efectos de falla)?
5. ¿En que forma afecta cada falla (consecuencia de falla)?
6. ¿Qué se debe hacer para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas y sus intervalos)?
7. ¿Qué se debe hacer si una tarea proactiva no previene la falla (acciones por omisión)?

### **Que es PMOptimisation**

Las preguntas que se responden una vez un análisis de PMO2000 ha terminado son:

1. ¿Qué tareas de mantenimiento se llevan a cabo por parte del personal de mantenimiento y operaciones (recopilación de tareas)?
2. ¿Cuáles son los modos de falla asociados a una inspección de la planta (análisis de modos de falla)?
  - a. Cuál es el modo de falla que cada tarea en el plan actual de mantenimiento esta programada a atacar
  - b. Qué otras fallas se han presentado en el pasado que no se han listado o que no han ocurrido, pero en caso de ocurrir pueden tener consecuencias peligrosas
3. ¿Qué funciones se perderían si cada modo de falla se presentara de forma inesperada (funciones)? [Pregunta opcional]
4. ¿Qué pasa cuando ocurre cada falla (efectos de falla)?
5. ¿En que forma afecta cada falla (consecuencia de falla)?
6. ¿Qué se debe hacer para predecir o prevenir cada falla (tareas proactivas y sus intervalos)?
7. ¿Qué se debe hacer si una tarea proactiva no previene la falla (acciones por omisión)?

La metodología de PMO2000 consta de nueve pasos. Las preguntas anteriores son parte de la metodología de PMO2000. Los pasos adicionales son:

- Agrupación y Revisión
- Aprobación e Implementación
- Programa Dinámico

Estos tres últimos pasos son necesarios para asegurar que la implementación de los resultados del análisis de PMO no se olvidan después de la primera revisión. Estos pasos no son

considerados como relevantes en este documento, ya que se asume que un análisis de RCM también los ejecuta para asegurar la implementación. RCM y PMO son considerados idénticos en este aspecto.

### **Diferencias Funcionales entre RCM y PMO**

RCM y PMO son dos productos completamente diferentes con el mismo objetivo; definir los requerimientos de mantenimiento de los activos. Sin embargo los Gerentes de Activos deben entender que están diseñados para ser usados en situaciones totalmente diferentes. RCM fue diseñado para desarrollar el programa inicial de mantenimiento durante la etapa de diseño del ciclo de vida de los activos (Moubray 1997) mientras que PMO ha sido diseñado para usarlo una vez los activos están en uso.

Como resultado PMO es un método de revisión mientras que RCM es un proceso de fundación. A pesar de que los dos generan como resultado el mismo programa de mantenimiento, PMO es un análisis mucho más efectivo y flexible que RCM, ya que inicia el trabajo desde un programa de mantenimiento razonablemente bueno y toma en cuenta la experiencia de operación y las características de falla de la planta.

### **Diferencias Metodológicas entre RCM y PMO**

La diferencia central entre RCM y PMO radica en la forma en que se generan los modos de Falla

- RCM genera una lista de los modos de falla desde un riguroso análisis de todas las funciones, después de considerar todas las posibles fallas funcionales y de una valoración de los modos de falla que se relacionan a cada falla funcional. RCM busca analizar todos los modos de falla en cada equipo del sistema a analizar.
- PMO genera una lista de modos de falla desde el plan de mantenimiento actual, de una evaluación del historial de fallas y de la revisión de la documentación técnica (usualmente diagramas de tubería e instrumentación (P&IDs))

Las diferencias entre los dos enfoques son que PMO maneja una cantidad mucho menor de modos de falla que RCM y llega a los modos de falla de manera más rápida. La experiencia en la Industria de Energía Nuclear de los Estados Unidos ha demostrado que en promedio PMO es seis veces más rápido que RCM en generar resultados (Jonson 1995). Las diferencias metodológicas entre PMO y RCM se ilustran en la Figura 4

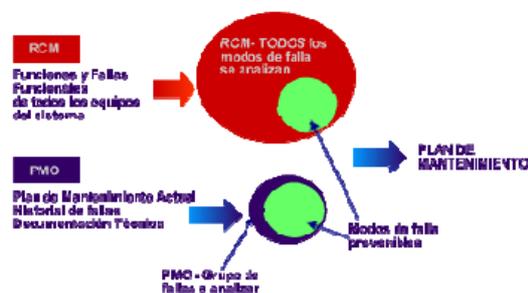


Figura 4. Comparación entre RCM y PMO

### **Como y porque es PMO más rápido que RCM**

Las razones principales porque PMO es más rápido que RCM son mencionadas a

continuación, y se detallan más adelante en este documento.

1. Los modos de falla insignificantes no son analizados por PMO mientras que RCM analiza todos los modos de falla posibles

2. Usando la metodología de PMO varios modos de falla se unen y se analizan en conjunto, mientras que RCM analiza cada modo de falla por separado

3. Con PMO el análisis detallado de las funciones es un paso opcional. La función del equipo se determina en el análisis de consecuencias de falla, ya que en definitiva la pérdida de la función es la consecuencia de cualquier falla.

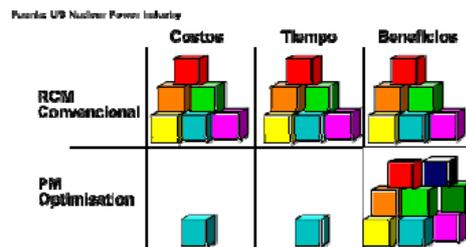


Figura 6. Comparación de costos, tiempo y beneficios de RCM y PMO

### Como y porque los modos de falla insignificantes son omitidos por PMO

El diseño del equipo y la forma en que es operado determina el tipo y la probabilidad de los modos de falla. En el contexto del análisis de mantenimiento los modos de falla se pueden dividir en las siguientes categorías:

- Su probabilidad
- Sus consecuencias y
- Lo práctico y viable que sea prevenirlos. (Ver Figura 6)

Probabilidad	Consecuencias	PM Viable
Alta	Peligrosas	Viable
Media	Costo alto	No viable
Baja	Bajo costo	

*Un plan de PM se enfoca a las condiciones de las áreas grises de la tabla. Esto representa la minoría de fallas, ya que la intención de diseño de los equipos es de tratar de eliminar o minimizar las fallas peligrosas y costosas especialmente cuando estas son de alta probabilidad de ocurrencia.*

Figura 6. Consideraciones requeridas para el análisis de mantenimiento

El enfoque en el buen diseño de los equipos asegura altos niveles de confiabilidad, mantenibilidad y operatividad. Esto significa que se eliminan las altas probabilidades y consecuencias de las fallas. Por ello no es extraño que al estudiar varios modos de fallas usando RCM, las conclusiones y/o recomendaciones son el Mantenimiento no Programado para solucionarlos, esto explica que los modos de falla que quedan en el diseño son:

- De probabilidad muy baja
- No hay tarea de mantenimiento predictivo o preventivo técnicamente viable para controlarlos, o
- La tarea de mantenimiento es más costosa que el costo de una falla inesperada.

Entre menos crítico es el equipo en los procesos productivos es más probable que el costo de mantenimiento supere los costos de la reparación de una falla inesperada. De acuerdo a la experiencia del autor un análisis completo de RCM en un sistema concluye que en promedio el 80% de los modos de falla se manejan bajo el mantenimiento no programado (13) (Ver figura 7). Este número aumenta en equipos electrónicos como los Programmable Logic Controllers (PLC) y disminuye en equipos que cuentan con partes en movimiento como un conveyor.

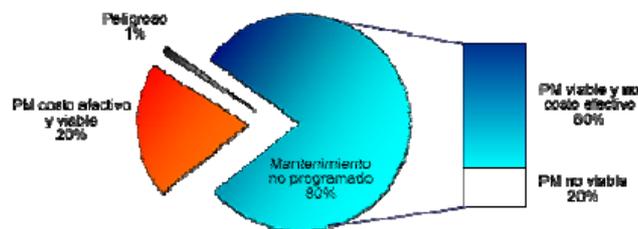


Figura 7. Resultados aproximados de mantenimiento para los modos de falla analizados

En otras palabras, si el objetivo de un workshop de análisis de mantenimiento es el de definir el plan de mantenimiento y todos los posibles modos de falla se analizaron, la conclusión es que alrededor del 80% del análisis es de poco valor agregado (o una pérdida de tiempo). Esto es porque el análisis encuentra que no hay solución por parte de mantenimiento para el 80% de los modos de falla, estos modos de falla habrían podido ser filtrados al inicio del análisis para no perder la calidad del mismo.

Con ese mismo objetivo en mente, es lógico buscar un proceso de análisis que se limite al 20% que tiene una posible solución por parte de mantenimiento. En la práctica esto no es en realidad viable hasta que los modos de falla a los que se les aplica algún tipo de PM son analizados.

Si los modos de falla son poco frecuentes y presentan pocas consecuencias entonces es poco probable que haya algún tipo de modificación costo efectiva. Los elementos faltantes aquí son aquellos modos de falla peligrosos que no han ocurrido anteriormente. Es claro que el inconveniente de este enfoque es que aquellos modos de falla que pueden resultar peligrosos pueden ser omitidos, por ello es importante la realización de un FMECA de “escritorio (14)” para encontrar aquellos peligros. PMO2000 peca por prudente y lista los modos de falla que tienen los siguientes atributos:

- Se les realiza algún tipo de PM
- Han ocurrido anteriormente, o

- Tienen alta probabilidad de ocurrencia y pueden tener consecuencias peligrosas

### **Como y porque usando PMO se pueden analizar varios modos de falla al mismo**

#### **Tiempo**

RCM toma cada modo de falla independientemente dando como resultado el mismo análisis con la repetición de tareas. PMO inicia con las tareas de mantenimiento lo que lleva a que varios modos de falla pueden ser solucionados por una sola tarea. Esto reduce significativamente el tiempo del análisis ya que se reducen los ítems a analizar. El siguiente ejemplo describe el concepto:

#### Usando PMO

Tarea	Modo de Falla analizado (en grupo)
Realización de análisis de vibración en la Caja de Engranaje	Desgaste o vencimiento del engranaje. Falla de rodamientos debido a desgaste. Afloje de pernos de ensamble por vibración. Falla de acople de la caja de engranaje por desgaste.

El análisis de vibración es una tarea de mantenimiento viable que previene que todos los modos de falla listados ocurran inesperadamente, PMO considera los modos de falla como un grupo y asigna una tarea y la programa al intervalo mínimo de inspección común.

#### Usando RCM

Función	Falla Funcional	Modos de Falla
Proveer 20hp al ventilador para que el ventilador corra a 200rpm	No hay poder	Desgaste del engranaje.
	No hay poder	Vencimiento del engranaje por fatiga
	No hay poder	Falla de acople por desgaste.
	No hay poder	Falla de rodamientos debido a desgaste.
Asegurar la caja de engranaje a la cimentación	Afloje de la caja de engranaje	Afloje de pernos de ensamble por vibración.

Las tablas anteriores muestran como desde su inicio RCM desarrolla un análisis bastante largo comparado con PMO. El resultado, el plan de mantenimiento es el mismo para los dos, un análisis de vibración ya que es la mejor forma de controlar todos los modos de falla. La única diferencia es que RCM ha analizado cinco modos de falla por separado, mientras PMO los ha analizado en grupo.

### **Como y porque usando PMO el análisis funcional riguroso es opcional**

RCM inicia con un completo análisis funcional del equipo, mientras que con PMO2000 (15) el esfuerzo del análisis funcional es opcional y a discreción del equipo de trabajo. Las razones por las cuales PMO2000 permite esta opción son:

- La evaluación de las consecuencias de las fallas se realiza en la quinta pregunta de PMO2000. La evaluación de consecuencias implícitamente incluye la valoración funcional, lo cual se realiza en este paso. La realización de un análisis funcional por aparte se considera como la duplicación (16) de esfuerzo.
- En algunos casos la funcionalidad exacta de los equipos es imposible de determinar y/o prácticamente insignificante. Un caso puntual es la funcionalidad de un ventilador en un sistema de enfriamiento. Su funcionalidad sería la de proveer cierta capacidad

de aire para enfriamiento, medido en BTU (British Thermal Unit) por hora o su equivalente, esto se convierte en una ecuación basada en la temperatura ambiente y tasas de flujo, el lograr el análisis de esta información se puede convertir en una actividad bastante larga. En la práctica el valor de utilidad de la ecuación es muy bajo ya que por lo general no existe un monitor en el ventilador que mida las BTU/hr para evaluar si el ventilador cumple a cabalidad con su función. Para los operadores el concepto de desempeño del ventilador en BTU es un concepto completamente desconocido.

- Experiencia y parámetros económicos determinan la selección y tipo de tareas a realizar, en la práctica no tiene nada que ver con la funcionalidad del activo. Asumiendo que las consecuencias de las fallas han sido analizadas correctamente hay algunas circunstancias en donde la variación de las funciones puede afectar los intervalos de el Monitoreo por Condición y las Tareas de Recuperación y la Baja Programada. Para el monitoreo por condición se presentan variaciones porque el intervalo PF (17) puede ser mas corto en activos que se espera que operen lo mas cercano a su capacidad inherente. Para las Tareas de Recuperación y la Baja Programada en donde se presenta una rata constante de deterioro la vida del activo se acorta de nuevo por la diferencia entre el diseño y las expectativas funcionales. En la práctica estos problemas se resuelven en su mayoría con sólo hacerle a las personas indicadas las preguntas correctas sobre los datos de las fallas en el contexto operacional de los activos. La evaluación del ciclo de vida del activo y el intervalo PF toman en cuenta la funcionalidad del activo analizado.

El análisis funcional usando RCM bajo los estándares dictaminados consume el 30% del tiempo dedicado al análisis. Si el objetivo de un workshop de análisis de mantenimiento es el de definir las políticas de mantenimiento apropiado para los equipos, entonces no es necesario un análisis funcional completo, ya que este consume mucho tiempo y aporta poco valor.

## **Fortalezas y Beneficios de PMO comparado con RCM**

### ***PMO es una metodología de gran flexibilidad***

RCM no puede controlar o filtrar en que momento son analizados los modos de falla, estos son analizado al azar, por ello un análisis de RCM requiere de la presencia de todos los especialistas durante su desarrollo. Con PMO es posible analizar las actividades de una especialidad en particular realizadas en un equipo o planta ya que PMO inicia su análisis desde las tareas actuales de mantenimiento, las cuales pueden ser filtradas por especialidad. Esto es bastante beneficioso cuando se considera que algunas actividades realizadas por alguna especialidad son ineficientes o inefectivas.

Se han realizado análisis de PMO muy exitosos exclusivamente en las rondas de los operadores, rondas de instrumentación, rondas de lubricación, análisis de vibración etc. Este tipo de enfoque no es posible usando RCM.

### ***PMO se regula a si mismo en términos de inversión y retorno***

PMO es altamente efectivo cuando los equipos tienen numerosos modos de falla pero donde la gran mayoría de estos suceden al azar, son instantáneos o no tienen consecuencias altas. Un ejemplo simple es el teléfono celular, los celulares tienen cientos de funciones, definir las puede tomar hasta un día, dependiendo de la rigurosidad del equipo de trabajo.

Otro punto es que RCM requeriría del aporte de los especialistas en electrónica para definir apropiadamente los modos de falla, mientras PMO sólo necesita de los operadores. PMO no tomaría más de 20 minutos en completar todo el análisis y determinar que el único mantenimiento requerido es el que tiene que ver con las consecuencias por el desgaste de la batería.

## **PMO es seis veces más rápido que RCM**

Los beneficios positivos de iniciar un proceso de análisis de mantenimiento que es seis veces más rápido que RCM y que genera el mismo resultado no se exageran. Los beneficios se listan a continuación:

- Los recursos para la realización de análisis generalmente son los más escasos en las organizaciones. PMO permitirá al equipo de trabajo cubrir el área de análisis seis veces más rápido con el recurso asignado, lo cual se reflejará en un menor impacto en la operación y las actividades del día a día de la planta. PMO permitirá que la organización se dedique más a la implementación que al análisis.
- El análisis de mantenimiento como muchas otras inversiones esta sujeto a rendimientos decrecientes, por ello el uso de RCM resulta inconveniente, ya que su costo sólo permite un análisis limitado a las áreas cuello de botella de la planta. Debido a que PMO es mucho más económico que RCM, se pueden analizar muchos más equipos en la planta, incluyendo aquellos que representan ganancias pequeñas pero no insignificantes.
- En aquellas áreas en donde los modos de falla representan consecuencias (18) de seguridad y al medio ambiente, el uso de PMO permitirá que estos se manejen mucho más rápido que usando RCM.

## **Debilidades de PMO**

La única debilidad valida de PMO comparado con RCM, para una planta que ya esta en operación es que PMO no lista absolutamente todos los modos de falla. Esto puede ser muy importante desde la perspectiva del manejo de inventarios, sin embargo sí el objetivo y la motivación de la realización de un análisis de mantenimiento es el de generar un plan de mantenimiento efectivo y con enfoque claro, esta debilidad es irrelevante.

## **Discusión sobre ideas equivocadas comunes acerca de PMO**

Hace poco tiempo ha habido algunos ataques en contra de cualquier proceso que no cumpla con los estándares de la SAEJA1011. El más destacado fue escrito por Moubray (Moubray

2001). Esto se discute en los siguientes párrafos de esta sección.

Debido a que el estándar ha sido asignado para RCM, los gerentes de activos deben implementar el proceso en toda la planta para evitar repercusiones	Falso
--	-------

En agosto de 1999, la SAEJA1011 titulada “Criterio de Evaluación para los procesos de

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad” fue publicada. El propósito de este estándar fue el de proveer un criterio para que los ingenieros de confiabilidad determinaran que es RCM y que no lo es. Esto se hace evidente en la primera página del estándar, dice:

“Este documento describe el criterio mínimo con el que cualquier proceso debe cumplir para llamarse “RCM.” Su intención no es la de definir un proceso específico”

El primer punto es que muchos de los ataques a PMO están basados en ideas erróneas sobre el funcionamiento del proceso, información incorrecta y sin fundamentos. Las preguntas que hacen parte de este documento aclaran estas ideas erróneas.

El segundo punto es que la lógica usada no pasa la revisión cuidadosa. Por ejemplo la lógica usada por Moubray (Moubray 2001) es:

1. La sociedad ha reaccionado a la ocurrencia de fallas y accidentes que tienen consecuencias serias por medio de la promulgación de leyes para buscar los responsables dentro de las compañías. **[Sin Objeción]**

2. Todo el personal involucrado en la Gestión de Activos debe ser más cuidadoso que nunca. **[Sin Objeción]**

3. RCM es el método más riguroso para definir los requerimientos de los activos. **[Sin**

**Objeción]** Cualquier metodología que intente hacer de RCM un proceso más eficiente, ya por definición le falta algo y por ello expone a los usuarios a un riesgo muy alto. **[Incorrecto y no hay evidencia para soportar esta afirmación]**

4. Existe un estándar que ayuda a los compradores de equipos a escribir contratos que especifican el uso de RCM y así se aseguran de que lo que compran esta sujeto a un estándar. **[Irrelevante]**

5. Ahora que existe un estándar para RCM, todos los gerentes de activos deben implementar dicho estándar a toda la planta sí quieren evitar cargos judiciales en caso de que ocurra un accidente. **[Basado en una afirmación irrelevante, incorrecta y sin ningún soporte]**

<b>PMO no es seguro, ya que no investiga adecuadamente todos los modos de falla que pueden tener consecuencias peligrosas en la planta</b>	<b>Falso</b>
--	--------------

Hay muchos puntos importantes sobre el uso de PMO y RCM que se ocupan de las consecuencias de seguridad y medio ambiente de las fallas. El punto más importante que se debe mencionar es que ni PMO, ni RCM ofrecen la protección adecuada contra las consecuencias de la ocurrencia de múltiples fallas evidentes simultáneamente, por ello los gerentes de activos deben considerar el uso de HAZOP u otras técnicas para el manejo de riesgos.

### **Punto 1**

A excepción de las funciones ocultas, la técnica de análisis de RCM toma en cuenta sólo los efectos de primer orden de la falla. Esto es consecuencia de que se realiza el análisis de los modos de falla “independientemente”, no se analizan las consecuencias de la ocurrencia de dos o más modos de falla simultáneamente.

Como sabemos las catástrofes involucran la ocurrencia de más de un modo de falla al mismo tiempo, dicho esto, es claro que RCM no garantiza una defensa judicial en caso de que se presente una catástrofe en la planta, los Gerentes de Activos no deben iniciar una implementación de RCM bajo la creencia que se les dará algún tipo de inmunidad. Se puede afirmar que RCM es una versión corta de un programa completo de análisis de riesgo por lo tanto cuenta con falencias para visualizar todos ellos.

### **Punto 2**

La evidencia referente a desastres recientes señala algunas observaciones. Primero, entre más grande es el desastre, más fueron los factores que contribuyeron al mismo.

Segundo, pocos y tal vez ningún desastre ha sido causado por la falta de un plan de mantenimiento preventivo. En las plantas en donde se han presentado desastres las fallas causantes de este han sido ignoradas por la compañía y no se han corregido a tiempo. Este escenario es muy común en la industria del mantenimiento actual. Este fue el caso puntual del reciente desastre de ESSO en la planta de Longford, lo que en el momento se considero anormal se normalizo con el tiempo (Hopkins, 2000). En la planta existían muchos equipos

considerados inservibles pero nada se hizo para mejorar su condición, se ignoraron y esto tuvo consecuencias graves.

Muchos gerentes de activos logran convivir con un alto nivel de equipos dañados o que operan en malas condiciones, incluso lo más increíble es que consideran el mantenimiento preventivo como una actividad opcional, el PM es simplemente ignorado sin ni siquiera evaluar los riesgos que se pueden prevenir con su aplicación. La gran amenaza a la seguridad de la planta no es la falta de un plan de PM, si no la falta de recursos para la implementación del plan y llevar a la planta a condiciones operacionales aceptables. Esto representa un dilema, ya que un gerente de activos responsable no debería invertir una gran cantidad de recursos en desarrollo de un programa largo y complejo de RCM que le generará un mejor plan de PM, cuando puede implementar un programa más corto que le dará los mismos resultados sin impactar la operación diaria en la misma escala y generará ganancias tangibles en la recuperación del backlog del mantenimiento correctivo y la implementación de un plan de PM.

### Punto 3

Los modos de falla que presentan consecuencias peligrosas ocurren aproximadamente (19) una vez en cada doscientas, después de facilitar mas de 15.000 modos de falla en un periodo de ocho años, sólo una vez se ha encontrado un modo de falla con consecuencias potencialmente peligrosas que no estaba sujeto a PM. Muy probablemente durante el análisis de PMO este modo de falla hubiera sido descubierto durante la revisión de la documentación técnica, esto significa que PMO provee una defensa contra las fallas de los equipos muy cercana a la de RCM.

El otro asunto es el tiempo que puede tomar el detectar aquellos modos de falla poco comunes y aquí es donde se presenta la diferencia entre usar RCM o PMO. Encontrar un modo de falla entre 15.000 tiene un costo de 15.000 horas hombre (20) o 8.5 años de trabajo. Pocos gerentes consideraran este, buen retorno de un programa enfocado a la mejora de la seguridad.

PMO asume que todos los modos de falla asociados con un equipo son considerados en el plan de mantenimiento existente	Falso
---	-------

PMO reconoce que no todos los modos de falla son considerados en el plan de mantenimiento actual y por ello incluye un paso para agregar a la lista de modos de falla generada en el análisis del plan de PM, aquellos modos de falla que han ocurrido en el pasado o que en caso de que ocurran pueden tener consecuencias graves. Es muy usual que un análisis de PMO que se incremente entre un 10% y 30% debido al análisis de fallas prevenibles que se han manejado como no planeadas en el pasado.

PMO es un método que analiza el 20% de las fallas y genera el sólo el 80% de resultados comparado con RCM	Falso
---	-------

PMO2000 analiza en 40% de los modos de falla que analiza RCM, sin embargo el resultado es exactamente el mismo si se usa RCM o PMO2000. El objetivo de PMO2000 es el de generar un plan de mantenimiento completo que cubra todos los modos de falla que tienen una solución técnicamente viable y costo efectiva para mantenimiento.

Cuando se implementa PMO por lo general es muy difícil identificar que fallas son atacadas por las tareas de mantenimiento, tanto así que grandes cantidades de tiempo son desperdiciadas tratando de identificar que tareas atacan que fallas, por ello se realizan afirmaciones que en su mayoría son erróneas	Falso
--	-------

Esta idea equivocada se explica mejor con un ejemplo. Considere las siguientes tareas y activos para identificar los modos de falla. Luego tome el plan de mantenimiento de su carro e

intente identificar otros modos de falla.

Lista de Tareas	Modo de falla Analizado
Inspeccionar por signos de desgaste de las correas del ventilador	Desgaste de las correas del ventilador
Inspeccionar por desgaste las pastillas de frenos	Desgaste de las pastillas de los frenos
Cambio de bujías	Desgaste de bujías
Cambio de aceite	Deterioro del aceite por su uso y edad

<p>Cuando se analizan las consecuencias de cada modo de falla, es necesario preguntarse “la pérdida de función causada por la falla será evidente para el personal de operaciones bajo circunstancias normales”. Esta pregunta sólo se puede contestar cuando se establece que función se pierde en el momento que ocurre la falla. Esto significa que el equipo de trabajo debe empezar a definir las funciones de todas maneras, lo que lleva a iniciar este paso en medio del análisis por grupos especializados.</p>	<p>Verdadero, pero irrelevante</p>
--	------------------------------------

Esto es correcto, pero no hace el análisis más complicado, problemático ni más largo. El punto aquí es que 30% del análisis no se gasta en la definición de funciones cuando no es requerido

<p>PMO es débil en definir el mantenimiento apropiado a los equipos de protección. Esto se debe a que sólo un tercio del plan de mantenimiento actual se enfoca a los equipos de protección, un tercio de los equipos se han identificado pero no reciben ningún tipo de mantenimiento y el último tercio no se han identificado aún</p>	<p>Falso</p>
--	--------------

### Punto 1

PMO2000 no es más débil que RCM en este aspecto. Usando PMO2000 aquellos equipos que no reciben PM son identificados en el momento que se revisa la documentación técnica, de la misma forma que lo haría RCM. Lo más común es seguir diagramas de tubería e instrumentación para encontrar las fallas ocultas.

### Punto 2

Las estadísticas presentadas para soportar esta afirmación son totalmente opuestas a la experiencia del autor. Es cierto que algunas organizaciones de mantenimiento no han identificado algunos de sus equipos de protección y que han identificado algunos, pero no se les hace ningún tipo de pruebas. Sin embargo la observación del autor es: Primero, el número de equipos de protección sin ningún tipo de mantenimiento es más parecido al 10% que al 66% y segundo, de ese 10% la probabilidad de múltiples fallas no justifica la realización de pruebas frecuentes.

<p>PMO se enfoca en la reducción de la cantidad de trabajo (workload) y no en la mejora del desempeño de la planta. Ya que los beneficios generados por el uso de RCM sólo como herramienta para la reducción de costos son menores que los generados si se usa para mejorar la confiabilidad, el uso de PMO no es económicamente viable ya que garantiza menos beneficios que RCM.</p>	<p>Verdadero y Falso</p>
---	--------------------------

PMO2000 se enfoca en varios frentes, uno es la confiabilidad de los equipos y otro es la productividad del personal. La experiencia demuestra que la ocurrencia de catástrofes en la planta esta directamente relacionada a el backlog de mantenimiento correctivo (21) y mantenimiento preventivo que llevan a cuestras muchas organizaciones de mantenimiento. Es

correcto afirmar que muchas de las catástrofes recientes han sido causadas o han sido parte de ellas, las fallas de los equipos que se conocen, pero se han ignorado y no se han corregido.

El segundo punto es que muchas organizaciones han entrado en el círculo vicioso de mantenimiento. Aquí es donde el PM es ignorado y las fallas que se presentan por falta de este consumen muchos más recursos que si la falla se hubiera reparado a tiempo y de forma planeada, se reducen los recursos para la realización de PM y el círculo vicioso de mantenimiento se fortalece. Por todo lo anterior es estratégicamente necesario enfocarse en la eliminación de trabajo innecesario y redireccionar estos recursos hacia labores que generen beneficio. Esta estrategia tiene un efecto integral al largo plazo, y es que los beneficios en confiabilidad empiezan a verse y mejorar continuamente, no son finitos.

El punto final es que el análisis de mantenimiento consume recursos importantes, la gente que conoce mejor los equipos. Los supervisores que permiten que estas personas sean parte del análisis entran en un dilema, ya que el backlog en el corto plazo se incrementará. A menos que los supervisores se sientan confiados que la inversión de las horas hombre en los análisis se recuperará a corto plazo, pueden no cooperar con el desarrollo del análisis lo que puede hacer del mismo un fracaso total. En pocas palabras el enfoque en la productividad del personal es un ingrediente esencial en el desarrollo exitoso de un análisis de mantenimiento. Con esto en mente es imperativo que durante el desarrollo del análisis no se pierda tiempo en actividades de poco valor como el análisis de modos de falla que como resultado se llevan a falla y un exhaustivo análisis funcional.

### Entendiendo métodos estadísticos de análisis de mantenimiento

Hay dos grupos de enfoques para determinar las frecuencias de las tareas. Uno de ellos es de naturaleza estadística y el otro es empírico. Hay diferencias importantes entre los dos enfoques y algunas de ellas se discuten en los siguientes párrafos.

#### Mil STD 2173 (AS)

Mil STD 2173 (AS) dice que para fallas al azar (22), la frecuencia optima para el Monitoreo por Condición se representa en la siguiente formula:

$$n = 1n \left[ \frac{\frac{-MTBF}{T} C_i}{(C_{npm} - C_{pf}) 1n(1-S)} \right]$$

$$1n(1-S)$$

Donde

- T = Edad (tiempo) entre el punto en el que la falla es detectada por primera vez y la ocurrencia de la misma – se conoce como el intervalo PF
- n = Número de inspecciones durante el intervalo PF – T.
- MTBF = Mean Time Between Failure – Tiempo Medio Entre Fallas.
- Ci = Costo de una tarea de inspección.
- Cpf = Costo de la corrección de una falla potencial.

- $C_{npm}$  = Costo de no hacer mantenimiento preventivo, incluye los costos operacionales de la falla.
- $S$  = Probabilidad de detectar la falla en una inspección (efectividad de la tarea)

### **Algoritmos de Optimización de Costos**

Otro algoritmo común es el que busca el intervalo óptimo de tareas determinando el costo mínimo de mantenimiento. Usa la siguiente fórmula:

$$C_t = C_f + C_{pa} + C_{sa}$$

Donde

- $C_t$  es el producto del costo actual de la falla y el de la probabilidad de la falla
- $C_{pa}$  es el costo de la acción primaria de mantenimiento multiplicada por el periodo de análisis dividido por la frecuencia de la acción primaria de mantenimiento
- $C_{sa}$  es el costo de la acción secundaria de mantenimiento multiplicada por el periodo de análisis dividido por la frecuencia de la acción primaria de mantenimiento multiplicada por la probabilidad de falla dividida por el periodo de análisis

### ***Lo que hace poco prácticos a los métodos estadísticos***

La cantidad de información para lograr generar resultados confiables en las ecuaciones anteriores raramente existe en la industria. Por ejemplo:

- El valor de  $T$  en sí mismo sólo se puede determinar llevando el equipo a falla varias veces para lograr la recopilación de suficiente información para la estadística – una práctica no justificable.
- Determinar la probabilidad de falla o el MTBF se descarta por las mismas razones que para determinar  $T$ .
- No hay métodos simples ni confiables para determinar la efectividad de la tarea  $S$ .
- Todos los datos de costos dependen de la información dada por los contadores y los métodos de asignación de costos usados.

Así las fórmulas para la optimización sean matemáticamente correctas son útiles para la minoría de situaciones en donde las variables se pueden determinar con alguna seguridad. Para lograr su óptima aplicación la organización debe iniciar un programa de implementación estadística y contratar personal especializado en análisis matemático y estadística, pero una vez aplicado en la industria se convierte en un trabajo de oficina totalmente alejado de la realidad.

Estos programas para lograr determinar los intervalos (23) de las tareas de mantenimiento son responsables de una rigurosa persecución de datos confiables para lograr generar datos que se acerquen a la realidad y obtener una herramienta realista toma décadas de operación

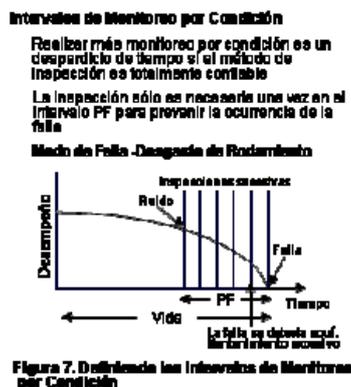
conciente.

### **Métodos empíricos**

Los métodos empíricos se basan en el concepto de que para prevenir la ocurrencia inesperada de una falla el equipo se debe inspeccionar a un intervalo menor que el periodo de decadencia del mismo (intervalo PF). En la práctica los analistas estiman el intervalo PF basados en el comportamiento del equipo o equipos similares por experiencia. El intervalo de las tareas se determina aplicando factores de seguridad de nivel dos o tal vez 3, dependiendo de la criticidad de consecuencias de las fallas. Las razones porque los métodos empíricos son muy usados y son altamente efectivos son:

Es mucho más simple y práctico preguntarle al técnico de mantenimiento “¿Cuánto tiempo dura un rodamiento después que empieza a hacer ruido?” y con esta información inspeccionar el rodamiento dentro del intervalo, que recolectar años de historial de fallas del rodamiento para determinar costos, la forma y el patrón de la falla.

- El personal del taller de mantenimiento por lo general no ha sido entrenado en complejos métodos estadísticos o matemáticos y los expertos en estos temas no conocen la planta. La experiencia muestra que se ven mejores resultados cuando el personal que trabaja día a día en el mantenimiento se entrena en métodos sencillos que cuando se trata de entrenar al experto en estadística en los asuntos de la planta.
- Los métodos empíricos generan resultados más rápido que los métodos estadísticos.
- Los métodos empíricos pueden aplicarse fácilmente sin el uso de computadores mientras que la mayoría de los métodos estadísticos necesitan paquetes de software para su aplicación.
- Los métodos estadísticos generan resultados ridículos, especialmente cuando los datos de entrada son poco confiables.
- En conclusión, todavía hay que preguntarse por qué los ingenieros insisten en implementar métodos estadísticos cuando los enfoques empíricos son más rápidos y mucho más confiables.



OMCS LatinAmerica

[Http://www.OMCSinternational.com](http://www.OMCSinternational.com)

- 1 *Se debe tener cuidado, pues para algunos Modos de Falla, es mayor el costo de prevenir que la falla en si misma.*
- 2 *SIRF Roundtables Ltd. Se conformo en Julio 1 del 2000 como fruto de la Fundación para la Investigación Estratégica Industrial (Strategic Industry Research Foundation Ltd) después del retiro de la fundación de la red industrial de aprendizaje (incluye la IMRt)*
- 3 *De este punto en adelante todas las referencias de RCM hechas en este documento se refieren a un programa de RCM que cumple con la SAE JA1011*
- 4 *RCM fue desarrollado por Nowlan and Heap (1978) con el propósito de definir los requerimientos iniciales de mantenimiento en la industria de la aeronáutica comercial (Moubray, 1997). Ya que cada aeronave debe tener un plan de mantenimiento definido antes de entrar en servicio, se puede decir que RCM fue desarrollado para definir dicho plan en la fase de diseño del ciclo de vida de los activos.*
- 5 *La política de mantenimiento es la definición de lo que se debe hacer, con que frecuencia y quien lo hace.*
- 6 *Especialmente con aplicación de mantenimiento intrusivo.*
- 7 *Manufacturing Game es un proceso práctico de aprendizaje, en donde los participantes aprenden en un ambiente dinámico, que estrategias implementar para mejorar el desempeño de la planta. El juego esta disponible por medio de SIRF Roundtable. Visite [www.manufacturinggame.com](http://www.manufacturinggame.com) para más información.*
- 8 *PMO puede trabajar con cualquier programación, rutinas de cambio de aceite, rondas de los operadores y puede ser una herramienta para la revisión de las necesidades de Mantenimiento Preventivo (PM) en una parada mayor.*
- 9 *Por ejemplo; ventiladores, gearboxes, transportadores, bombas, motores eléctricos, instrumentación – en donde pueden existir cientos de los mismos componentes. El ahorro de horas hombre en un componente se multiplicará por toda la planta.*
- 10 *Requerimientos de RCM para la Aeronáutica Naval, Sistemas de Armamento y Equipos de Soporte.*
- 11 *Cualquier muestra incorrecta sugiere que hay una falla cuando en realidad no es así. Pruebas de aceite o análisis de vibraciones son ejemplos de que la mayoría de los problemas son fallas controladas.*
- 12 *Periodo entre el punto en que la falla es inicialmente detectada y el punto en el que se considera falla funcional*
- 13 *Este concepto puede tener variaciones con equipos que representan un 50% de retorno. Otra variable es la tendencia de los grupos de trabajo a ignorar ciertos componentes en el análisis por que la experiencia muestra que tienen pocos o no modos de falla prevenibles, predecibles o son ocultos, lo cual genera la reducción de recomendaciones de mantenimiento no programado, sin embargo el by pasear estos modos de falla no cumple con los estándares de RCM. RCM debe analizar todos y cada uno de los modos de falla.*
- 14 *Revisión y valoración de la documentación técnica en busca de consecuencias que lleven a situaciones peligrosas de los modos de falla*
- 15 *No es una característica de otros procesos de PMO.*
- 16 *Este punto es igualmente relevante para cuando las funciones son ocultas, ya que la pérdida de funciones ocultas resulta en consecuencias condicionadas a la ocurrencia de fallas.*
- 17 *El intervalo entre el tiempo en que por primera vez se detectan los síntomas de la falla y el punto en el que ocurre la falla funcional.*
- 18 *Se debe anotar que ni PMO, ni RCM pueden proveer la protección adecuada contra las consecuencias de las fallas de los equipos cuando dos fallas evidentes ocurren al mismo tiempo. Esto es un factor significativo en una gran parte de recientes desastres en el mundo, particularmente cuando se presenta una combinación de acciones humanas inadecuadas y fallas en planta.*
- 19 *La fuente de esta afirmación es la experiencia del autor. Se debe tener en cuenta que existen muchos factores que pueden influenciar este ratio, depende del tipo de equipos estudiados y de la guía del facilitador. El punto es que la mayoría de las fallas pueden tener consecuencias peligrosas sí el equipo de trabajo analiza un amplio grupo de fallas evidentes como los errores humanos que pueden ser el problema original. También hay que tener en cuenta la idea de que cualquier equipo no se debe poner a funcionar si presenta alto riesgo que no se pueda corregir en el diseño. Se*

*espera que los diseñadores hicieran un buen trabajo si el 5% o más de los modos de falla pueden causar algún peligro si ocurren inesperadamente.*

*20 Asumiendo que el equipo de trabajo es de 3 personas y un facilitador analizando un modo de falla cada 15 minutos.*

*21 Mantenimiento correctivo es definido por la falla que se conoce y se reporta y se corrige de forma planeada y no de manera reactiva*

*22 Una formula similar pero más compleja puede aplicarse cuando la falla no es al azar*

*23 El autor entiende que el historial de las fallas es esencial para la eliminación de fallas, sin embargo su uso para determinar los intervalos de las tareas de mantenimiento es altamente exagerado en la industria.*