



## OPTIMIZACION DEL MANTENIMIENTO

Por: Ing. Guillermo Sigüenza Glez., CMRP

### **Objetivo de este documento:**

Presentar las bases teóricas del área de oportunidad conocida como “optimización del mantenimiento” de una manera lógica y fácil de comprender para así simplificar la identificación de las variable que afectan el desempeño de los procesos de mantenimiento y posibilitar la selección de las estrategias más efectivas para la optimización en cada caso específico.

### **Definición de Optimización de Mantenimiento:**

La serie de acciones que se toman, después de efectuar algún tipo de análisis, para redireccionar el proceso de mantenimiento actual de una planta hacia la obtención de resultados económicos más positivos que los que se están dando en ese momento.

Esto significa que las nuevas estrategias de mantenimiento que se implementen o las modificaciones que se hagan a las estrategias existentes estarán dirigidas para que eventualmente tengan un impacto positivo en la rentabilidad de la planta.

### **Objetivo primordial de una optimización:**

El objetivo primordial de una iniciativa para optimizar el mantenimiento debe ser el de generar mayor ganancia para la compañía. Para lograr este objetivo primario se requiere de enfocar nuestros esfuerzos a alcanzar objetivos secundarios que impulsen consecuentemente al objetivo primordial de mejorar la rentabilidad.

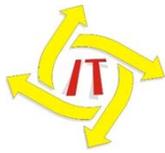
### **Objetivos secundarios de la optimización:**

Los objetivos secundarios de una optimización son una o varias metas particulares que se deben alcanzar para llegar al objetivo primordial, dependiendo de las condiciones propias de una planta industrial en cuanto a; mercado del producto, contexto operacional, cultura operacional, posición financiera, etc.

Los objetivos secundarios más comunes son:

1. Incrementar la disponibilidad de sistemas y equipos.
2. Incrementar la confiabilidad de sistemas y equipos.
3. Mantener la capacidad productiva de los equipos.
4. Mantener o mejorar la eficiencia energética de los equipos.
5. Incrementar los niveles de seguridad personal y al ambiente.
6. Reducir los costos asociados con el mantenimiento.

El cumplir con los objetivos secundarios eventualmente conlleva a lograr los resultados económicos deseados, Como se aprecia en la figura 1 la inversión que se haga en tareas de mantenimiento preventivo, mantenimiento basado en condición (predictivo), mantenimiento autónomo e inspecciones incrementara la confiabilidad lo que significa que ocurrirán menos fallas funcionales por unidad de tiempo y por lo tanto se generará menor tiempo muerto asociado a estas fallas, lo cual a su vez mejorará la disponibilidad del equipo para producir. Al tener mayor tiempo disponible para producir se producen mayor numero de unidades de producto lo cual a su vez generan mayores ingresos y por lo tanto mayor ganancia para la empresa.



También se puede apreciar que si se invierte en entrenamiento y capacitación del personal manual de mantenimiento y en personal de planeación y programación se puede también reducir el tiempo muerto asociado con la restauración de los equipos a condición operativa ocasionado por las fallas que lleguen a ocurrir.

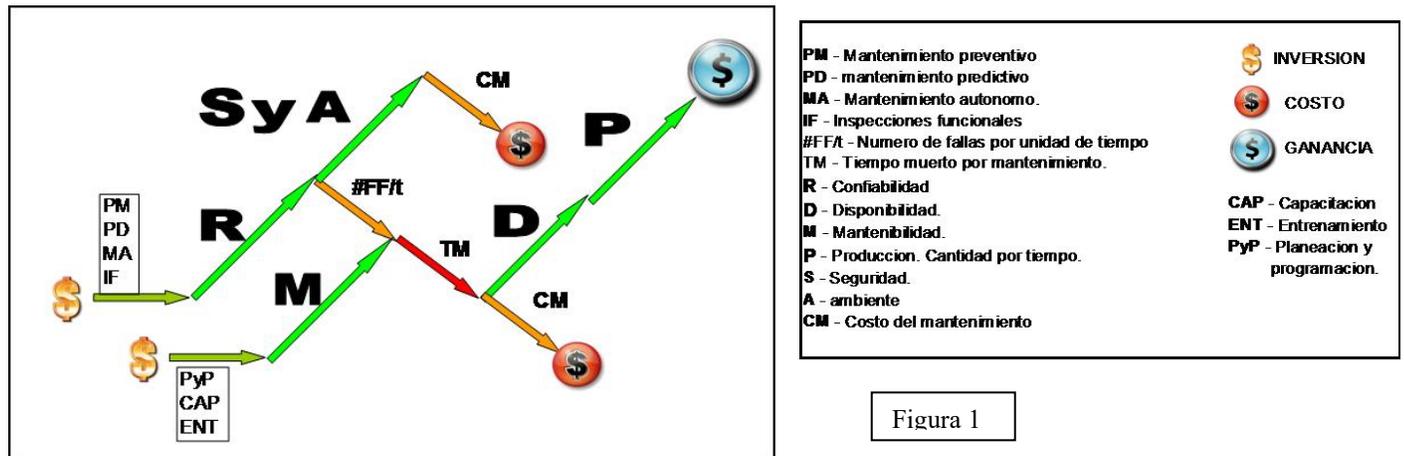


Figura 1

## OBJETIVOS PRIORITARIOS SEGÚN CONDICIONES DE MERCADO Y CONTEXTO OPERACIONAL.

La prioridad de los objetivos secundarios puede cambiar o variar según el plan estratégico de la planta en ese momento que ha su vez depende de las condiciones del mercado y situación financiera.

- a. Alta demanda de producto en el mercado. Todo lo que se produce se vende.  
Los objetivos prioritarios deben ser:
  - 1. Incrementar la disponibilidad de sistemas y equipos.
  - 2. Incrementar la confiabilidad de sistemas y equipos.
  - 3. Mantener la capacidad productiva de los equipos.
- b. Baja demanda de producto en el mercado. Capacidad de planta ociosa. Alto inventario de producto.  
Los objetivos prioritarios deben ser:
  - 1. Mantener la eficiencia energética de los equipos.
  - 2. Reducción de costos asociados con el mantenimiento.
- c. Alta competitividad en precios. Guerra de precios. Muchos competidores  
Los objetivos prioritarios deben ser:
  - 1. Incrementar la confiabilidad de sistemas y equipos.
  - 2. Mantener la capacidad productiva de los equipos.
  - 3. Mantener la eficiencia energética de los equipos.
  - 4. Reducción de costos asociados con el mantenimiento.
- d. Alta incidencia de eventos negativos relacionados con la seguridad o salud del personal.  
Los objetivos prioritarios deben ser:
  - 1. Incrementar los niveles de seguridad personal.



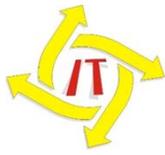
- e. Nuevas reglamentaciones ambientales altas multas o indemnizaciones.  
Los objetivos prioritarios deben ser:
  - 1. Incrementar los niveles de seguridad al ambiente.
- f. Incrementos en precios de los energéticos.  
Los objetivos prioritarios deben ser:
  - 1. Mantener o incrementar la eficiencia energética de los equipos.

¿Como se logran los objetivos de la optimización?

Para alcanzar los objetivos secundarios se requiere jugar con las variables que los mueven. A continuación, se da una lista de variables que afectan cada objetivo:

Objetivos de la optimización y sus variables:

- 1. Incremento de disponibilidad de sistemas y equipos.
  - 1.1 Incrementar el MTBF
  - 1.2 Mejorar la mantenibilidad. Reducir el MTTRt
  - 1.3 Reducir los tiempos llave de tareas de mantenimiento. Reducir el MTTRr
- 2. Incremento en confiabilidad de sistemas y equipos.
  - 2.1 Incrementar el MTBF
  - 2.2 Incrementar la vida útil de componentes.
  - 2.3 Reducir número de ocurrencia de fallas.
  - 2.4 Eliminar fallas.
- 3. Mantener la capacidad productiva de equipos
  - 3.1 Reducir o eliminar defectos del equipo.
  - 3.2 Mantener en condición tan bueno como nuevo.
- 4. Mantener la eficiencia energética de los equipos.
  - 4.1 Reducir o eliminar defectos del equipo.
  - 4.2 Mantener las condiciones originales.
- 5. Incremento en niveles de seguridad personal y al ambiente.
  - 5.1 Reducción del riesgo.
    - 5.1.1 Reducción de la probabilidad de ocurrencia de eventos negativos.
    - 5.1.2 Reducción o mitigación de las consecuencias en caso de ocurrencia de los eventos negativos.
- 6. Reducción de costos asociados con el mantenimiento.
  - 6.1 Reducción de mano de obra.
  - 6.2 Reducción de inventario de refacciones.
  - 6.3 Reducción de utilización de refacciones por reemplazo.
  - 6.4 Optimizar las frecuencias de tareas de mantenimiento preventivo y predictivo, en base a costo-riesgo.



## COMPORTAMIENTO DE LAS VARIABLES.

A continuación, se describirá en detalle cómo se puede jugar con las variables más importantes para alcanzar cada objetivo secundario específico.

### 1. INCREMENTO DE LA DISPONIBILIDAD

Definición: Disponibilidad (D) es la relación del tiempo que realmente opera el equipo o que está listo para operar (TO) entre el tiempo programado para operar (TPPO) o que debe estar listo para operar.

Figura 2

$$D = \frac{TO}{TPPO}$$

Cuando se tienen interrupciones en la operación por fallas inesperadas o por intervenciones de mantenimiento preventivo (PM) o de correctivo planeado (MCP), la suma de todos los tiempos entre las intervenciones de mantenimiento que realmente el equipo está en condiciones operativas (operando o listo para operar) es el TBM tiempo entre mantenimientos.

Estas intervenciones de mantenimiento tienen una duración durante la cual el equipo no opera o no está listo para operar y por lo que a este tiempo se le llama tiempo muerto (DI). Entonces la disponibilidad es igual a:

Figura 3

$$D = \frac{TO}{TO + DT} \quad \text{donde:} \quad TPPO = TO + DT$$

La disponibilidad depende de 2 variables:

1. El tiempo que opera el equipo (TBM) entre cualquier intervención de mantenimiento de cualquier tipo, ya sea por; por mantenimiento preventivo (PM), por mantenimiento correctivo reactivo (MCR) o por mantenimiento correctivo planeado (MCP).

Al valor medio del tiempo que opera le llamaremos MTBM tiempo medio entre mantenimientos.

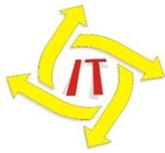
2. El tiempo que dura la intervención de mantenimiento (TTM) de cualquier tipo que tenga que hacerse con el equipo fuera de operación o sea el tiempo puerto. Al valor medio le llamaremos MTTM tiempo medio para mantener. Este es un indicador de la mantenibilidad del equipo.

El TTM es un tiempo con el equipo parado y sin producir por lo que se le llama comúnmente el tiempo muerto (DT) y el valor medio es el MDT o sea tiempo muerto medio.

La definición clásica del tiempo muerto es que es el tiempo que el equipo está fuera de operación sin producir, pero cuando tenemos equipos redundantes es necesario ampliar la definición a que incluya el tiempo que el equipo no está en condiciones operativas. Ya sea que no está operando o que no está listo para entrar en operación en cualquier momento, como en el caso de los equipos redundantes (relevos, standby)

La relación matemática básica que describe la relación entre la disponibilidad y las 2 variables es:

$$D = \frac{MTBM}{MTBM + MTTM} \quad \text{o} \quad D = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad \text{Figura 4}$$



Por lo anterior se presentan 2 opciones para mejorar la disponibilidad; incrementar el MTBM o reducir el MTTM, como se puede apreciar en la grafica escala logarítmica de la fig. 5, en que proporciona la relación entre la disponibilidad el MTBM y el MTTM que es equivalente al tiempo muerto medio MDT

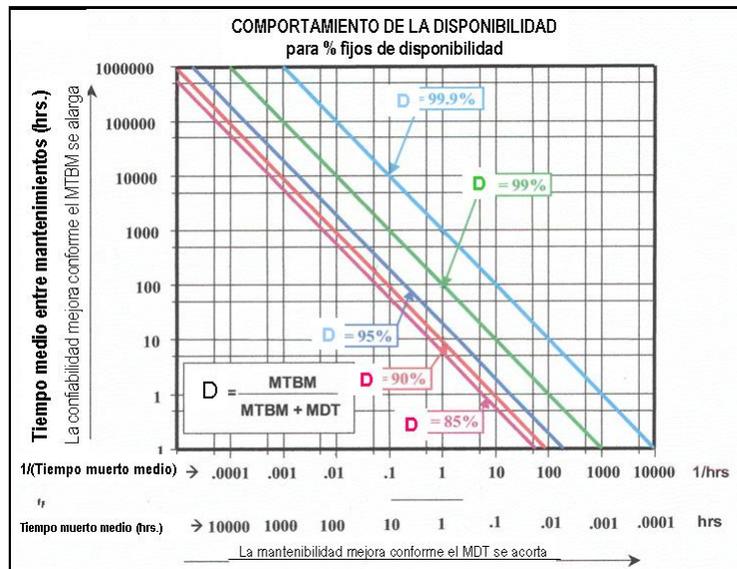


Figura 5

Observaciones a la grafica.

1. El incremento de disponibilidad (D) puede tomar 2 caminos. El primero reducir el MTTM y el segundo incrementar el MTBM.
2. Conforme el valor de la disponibilidad sea más alto, mayor es el esfuerzo que se requiere para lograr un incremento.

Ahora el MTTM tiene tres componentes:

$$MTTM = MTTRt + MTTM_{pm} + MTTM_{mcp} \quad \text{Figura 6}$$

1. El MTTRt tiempo medio de restauración de condiciones operativas que es el tiempo muerto medio que el equipo esta fuera de operación para realizar intervenciones de mantenimiento correctivo reactivo (MCR) por fallas inesperadas.
2. El MTTM<sub>pm</sub> es el tiempo muerto medio que el equipo esta fuera de operación por ejecución de tareas de mantenimiento preventivo (PM) incluyendo inspecciones preventivas.
3. El MTTM<sub>mcp</sub> es el tiempo muerto medio que el equipo esta fuera de operación por ejecución de intervenciones de mantenimiento correctivo planeado (MCP)

Y el MTBM tiene tres componentes:

$$MTBM = MTBF + MTBM_{pm} + MTBM_{mcp} \quad \text{Figura 7}$$

1. El MTBF tiempo medio que el equipo opera entre fallas y es indicativo de la confiabilidad del equipo.
2. El MTBM<sub>pm</sub> es el tiempo medio que el equipo opera entre intervenciones de mantenimiento preventivo (PM) incluyendo inspecciones preventivas y paros mayores preventivos.
3. El MTBM<sub>mcp</sub> es el tiempo medio que el equipo opera entre intervenciones de mantenimiento correctivo planeado (MCP).



Como se puede deducir de la ecuación de la figura 7, tan importante es para alargar el MTBM tanto el valor del MTTRt correspondiente a fallas como el valor del MTBMpm correspondientes a mantenimientos preventivos y paros mayores preventivos. La grafica de la figura 8 muestra este comportamiento.

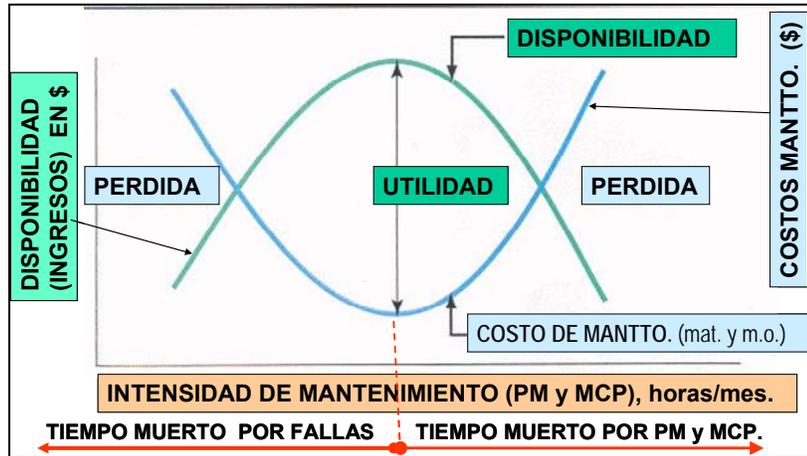


Figura 8

## ESTRATEGIAS PARA INCREMENTAR LA DISPONIBILIDAD:

Las estrategias más efectivas para incrementar la disponibilidad se presentan a continuación.

Estrategias para incrementar el MTBF son:

1. Implementar tareas de mantenimiento predictivo (PD) y/o inspecciones funcionales para detectar fallas incipientes y corregirlas.
2. Implementar tareas de mantenimiento preventivo (PM) efectivas.
3. Efectuar análisis de causa raíz de cada falla ocurrida; descubrir y eliminar la causa.
4. Análisis de confiabilidad de modos de falla para definir las mejores estrategias de mantenimiento que apliquen según la distribución estadística.

Estrategias para incrementar el MTBMpm son:

1. Análisis de optimización de frecuencia de mantenimientos preventivos en base costo- riesgo.
2. Análisis de optimización de frecuencia de paros mayores preventivos en base costo- riesgo.
3. Analizar por presencia de mortalidad infantil.

Estrategias para incrementar el MTBMmcp son:

1. Programación de mantenimientos correctivos planeados en base a análisis de vida útil remante y probabilidad de falla de equipos y componentes, utilizando el diagnostico integrado.
2. Usar mantenimiento oportunisto.

Estrategias para disminuir el MTTM (MDT) son:

1. Mejor planeación y programación de los trabajos de mantenimiento.
2. Hacer más eficientes las cuadrillas de mantenimiento mediante entrenamiento para convertirlas en equipos SWAT que reduzcan los tiempos de ejecución de los trabajos de mantenimiento.
3. Inversión en mejores herramientas y equipos de trabajo para que las cuadrillas de mantenimiento reduzcan los tiempos de ejecución de los trabajos.



4. Tener procedimientos o estándares detallados para cada tarea de mantenimiento que estandaricen los tiempos de ejecución y uniformicen la calidad.
5. Mayor y mejor supervisión, control y verificación de los trabajos de mantenimiento para evitar retrabajos y defectos de mortalidad infantil.
6. Procedimientos de compra que agilicen el suministro de refacciones justo a tiempo.
7. Contar con inventario de refacciones críticas y de largo tiempo de entrega en almacén.
8. Substituir tareas de PM por tareas de PD para minimizar el MTBMpm.
9. Eliminar tareas de PM que no aporten a la confiabilidad de los equipos.
10. Utilizar la estrategia RTF “operar hasta que falle” en equipos no críticos.
11. Implementar mantenimiento autónomo.
12. Tener en inventario refacciones con largo tiempo de entrega de equipos críticos para reducir el MTTRt.

## ESTRATEGIAS PARA INCREMENTAR LA CONFIABILIDAD.

Incrementar el MTBF mediante:

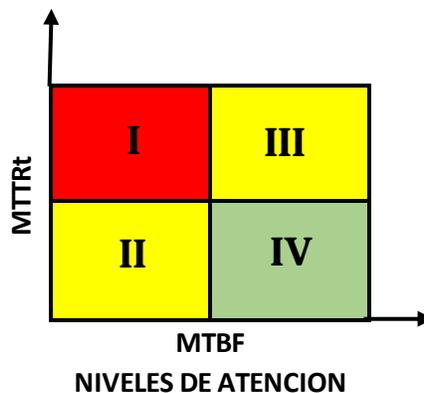
1. Implementar tareas de mantenimiento predictivo (PD) y/o inspecciones funcionales para detectar fallas incipientes y corregirlas.
2. Implementar tareas de mantenimiento preventivo (PM) efectivas.
3. Efectuar análisis de causa raíz de cada falla ocurrida; descubrir y eliminar la causa.
4. Realizar Análisis de confiabilidad de modos de falla para definir las mejores estrategias de mantenimiento que apliquen según la distribución estadística que se ajuste al comportamiento de cada modo de falla..

## ESTRATEGIAS PARA REDUCIR LOS COSTOS DEL MANTENIMIENTO.

1. Eliminar tareas innecesarias de PM, que no aportan ningún valor a la confiabilidad.
2. Reducir el inventario de refacciones no críticas o con tiempos de entrega cortos.
3. Trasladar costo de inventario a los proveedores.
4. Análisis de frecuencia de tareas de PM de acuerdo a costo-riesgo-beneficio.
5. Análisis de frecuencia de paros mayores de acuerdo a costo-riesgo-beneficio.

## COMO SELECCIONAR LOS MALOS ACTORES EN BASE AL MTBF Y MTTRt.

Si nosotros elaboramos una grafica de dispersión con valores de MTBF en el eje X y de valores de MTTRt en el eje Y y luego la dividimos en 4 cuadrantes iguales como se muestra a continuación en la fig. 9



Veremos que los niveles de atención requerida por mal desempeño son en orden, cuadrantes; I, II, III, IV



## **OPERATIONAL READINESS**

Las baterías de equipos redundantes donde se requiere q equipos operando de n totales con r equipos quedando en relevo (standby) es importante que los equipos r estén en estado operativo listos para entrar en operación en cualquier momento. (Operation Readiness en términos militares) por la que se debe considerar como tiempo el TTRt tiempo para restauración su condición operativa ya que en ese momento la batería funcional (o sea la función esta vulnerable y comprometida).

## **OPTIMIZACION DEL MANTENIMIENTO EN EPOCA DE CRISIS.**

En épocas de baja demanda de nuestros productos la prioridad que fija el plan estratégico de la planta es el de

1. Reducir los costos de mantenimiento, pero sin comprometer la confiabilidad de los equipos y la seguridad de la planta.

2. Mantener la eficiencia energética de los equipos. Ya que la disminución de la misma impactara directamente el costo unitario del producto. Ejemplo Kw's/ton, M3gas/ton, etc.)

Se analizan todos los factores asociados sobresaliendo los siguientes resultados.

1. Como hay poca demanda de producto nuestra planta trabaja a niveles bajos de producción y por lo tanto hay capacidad de sobra en nuestros equipos. En este contexto la disponibilidad de los equipos no es prioritaria por lo que puede relajarse.

La disponibilidad depende tanto de la confiabilidad como de la mantenibilidad:

$$D = \text{MTBF}/(\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

Reducir la confiabilidad no es recomendable ya que esto implica dejar que los equipos fallen y tener mayor numero de fallas. Además, implica un cambio hacia una cultura regresiva lo cual no es recomendable.

2. Vale la pena evaluar la utilización de la estrategia RTF “operar hasta que falle” en equipos con redundancia.

Cuando se habla de optimizar el proceso de mantenimiento de una planta normalmente se refiere a una planta en operación, con pocos o muchos años de funcionamiento, independientemente del proceso o estrategias de mantenimiento que se estén llevando.

Todas las plantas en operación cuentan con un proceso de mantenimiento ya sea formal o informal, estructurado o no estructurado, planeado o empírico, eficiente o deficiente, con puntos fuertes y puntos débiles, etc. Por lo que tenemos que definir cuales son los objetivos que queremos lograr con esa optimización.

Para optimizar el proceso del mantenimiento se requiere de un método de análisis simple y sencillo, fácil de comprender por todos los integrantes del equipo de operación y mantenimiento, que parta del proceso de mantenimiento existente de la planta para enfocarse en optimizar los puntos débiles y dejar tal y como están los puntos fuertes, que posiblemente constituyan el 60% o más del total.

Se recomienda el Análisis RCM Express desarrollado por el suscrito para hacer la optimización del mantenimiento más expedita.



## OPTIMIZACION DEL MANTENIMIENTO MEDIANTE UN ANALISIS EXPRESS

El Análisis RCM Express desarrollado en base a principios fundamentales de:

1. Teoría de confiabilidad estadística-matemática.
2. Análisis RCM según Norma SAE JA 1011.
3. Análisis FMEA.
4. Análisis de Riesgo.

Esta diseñado precisamente para cumplir con esos requisitos básicos y para desarrollar las siguientes actividades propias de un proceso de optimización:

1. Identificar y eliminar tareas innecesarias que no agregan valor.
2. Identificar duplicidad de tareas de mantenimiento y eliminarla.
3. Eliminar tareas preventivas de reposición o servicio que puedan ser reemplazadas con tareas predictivas.
4. Eliminar tareas que tienen poco impacto en los objetivos.
5. Agregar tareas que tienen mayor impacto en los objetivos.
6. Encontrar la mezcla apropiada entre las tareas proactivas.
7. Incrementar o acortar intervalos entre tareas periódicas preventivas. (Frecuencias).
8. Incorporar herramientas de análisis que reduzcan o eliminen las fallas.
9. Generar un plan de mantenimiento donde las tareas proactivas y sus frecuencias aporten valor agregado a cumplir con los objetivos.
10. Incorporar herramientas administrativas que reduzcan los tiempos para restablecer la funcionalidad operativa a los equipos en mantenimientos correctivos o preventivos.

Las ventajas del Análisis RCM Express son;

1. El análisis Express esta enfocado a analizar el mantenimiento de sistemas existentes operando con cierto grado de mantenimiento. No parte de base Cero. Sino del mantenimiento actual que obviamente tiene puntos buenos ya que esta basado en experiencia operativa de varios años.
2. Reconoce y aprovecha la experiencia y el valor del programa actual de mantenimiento de una planta.
3. Al analizar el programa actual del mantenimiento se pueden discernir fácilmente las tareas actuales que son efectivas de las que no administran alguna falla significativa y de la que son duplicadas.
4. Toma en consideración y analiza el inventario de refacciones actual de una planta.
5. Toma en consideración la probabilidad de ocurrencia de una falla que ha sido sometida a alguna acción proactiva.
6. Efectúa un análisis secundario basado en los componentes principales de un sistema y como pueden fallar incorporando el criterio de ingeniería del sistema.
7. Se basa en la regla 80-20 o sea que analizando el 20% de las fallas que causan el 80% de las consecuencias negativas operacionales (tiempo muerto, pérdida de producción, mano de obra adicional, tiempo extra, etc.), estamos en posibilidades de reducir el 80% de las consecuencias.
8. En promedio se realiza con el 25% del tiempo requerido para hacer un análisis RCM riguroso.



OPTIMIZACION DEL MANTENIMIENTO MEDIANTE UN ANALISIS EXPRESS

9. El RCM clásico aplica la metodología a todos los modos de fallas sin importar su criticidad de de los beneficios potenciales. El análisis Express se enfoca únicamente a los modos de fallas con consecuencias críticas que impactan seguridad, ambiente o producción.
10. La información generada por el análisis Express se puede, en un tiempo posterior a la terminación del análisis, pasar a un formato según la norma SAE JA 1011 para cumplir con la misma.
11. El análisis Express que se hace en Excel posteriormente puede migrarse al software PMO2000 mas avanzado de optimización del mantenimiento. (anexamos información al respecto).