



TOOLBOX



DECISIONES CUANTIFICADAS EN ESTRATEGIAS DE CONFIABILIDAD

Optimización Costo-Beneficio

Ing. Ind. Santiago Sotuyo Blanco, CMRP, CRL, AMP-S

Ingeniero Principal de Confiabilidad – Latino América

ARMS Reliability



1

PRESENTACIÓN

ING. IND. SANTIAGO SOTUYO BLANCO, CMRP, CRL, AMP-S



Santiago Sotuyo Blanco

Ingeniero Principal de Confiabilidad – Latino América, ARMS RELIABILITY

- Supervisa el desarrollo de proyectos de ARMS Reliability en Latino América, los cuales se centran en ayudar a sus clientes a ser seguros y exitosos, al hacer realidad la confiabilidad.
- Es líder en Latino América en la difusión de la Gestión de Estrategias de Activos, un proceso habilitado por personas, tecnología y datos para mantener un enfoque basado en la confiabilidad para mejorar el rendimiento de los activos.
- Es Ingeniero Industrial Mecánico (Uruguay)
- Es Profesional Certificado CMRP, CRL y AMP-S.
- Es Instructor Certificado de ASM, RAMS, RCM, FMECA, LCC, Weibull, RCA.
- Especializado en Ingeniería de Mantenimiento (Suecia) e Ingeniería de Confiabilidad (Inglaterra).



2

PRESENTACIÓN ING. IND. SANTIAGO SOTUYO BLANCO, CMRP, CRL, AMP-S



Reconocimientos y Premios:

- “**Ingeniero Destacado 2021**”, por la AIU – Asociación de Ingenieros del Uruguay. Diciembre 2021.
- “**WFEO Distinguished Fellow**”, por la WFEO/FMOI – Federación Mundial de Organizaciones de Ingeniería. Marzo 2022.
- “**Contribución al Mundo del Mantenimiento**”, por el COPIMAN, AMGA y CMC-Latam México. Setiembre 2022.
 - Reconocimientos a sus 37+ años de experiencia laboral y 33+ años como profesional de la ingeniería a nivel internacional.



3

Introducción al RCM

*Análisis de
Decisiones Cuantificadas en Estrategias
de Confiabilidad
Optimización Costo-Beneficio*

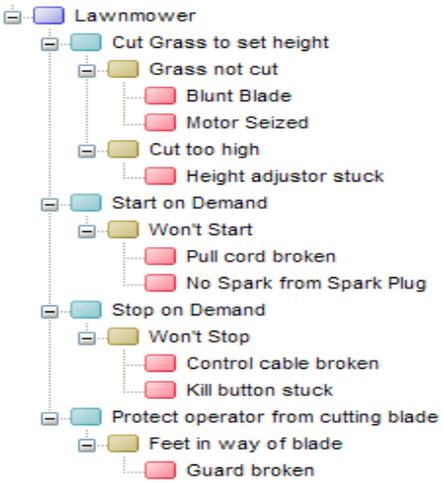


4



RCM

- 1er Paso de RCM: Análisis de Modos de Falla y Efectos (FMECA) para identificar modos de fallo críticos de la planta.

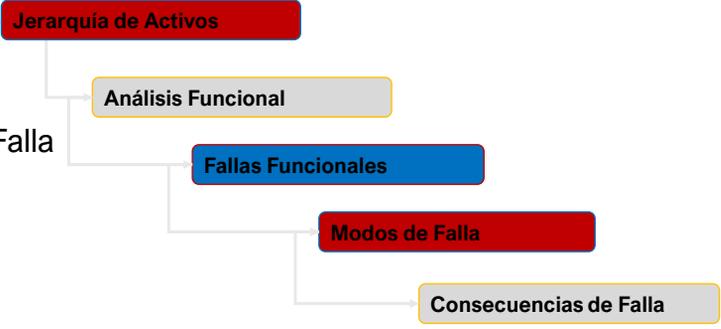


5



FMECA

- El primer paso para preparar una Estrategia consiste en Identificar los Activos y su Contexto de Operación actual
- Análisis Funcional
- Fallas Funcionales
- Modos de Falla
- Efectos y Consecuencias de Falla



6

Falla vs Tarea



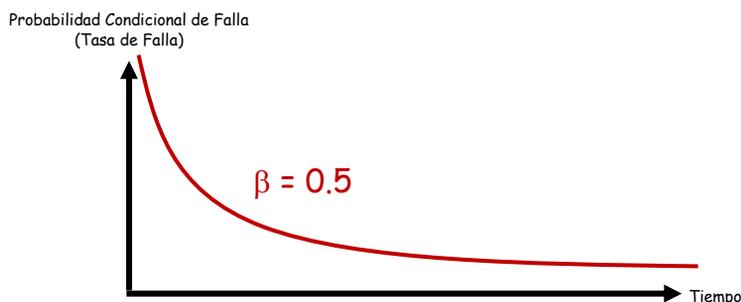
Entender el **comportamiento de falla** es importante para determinar el **tipo de tareas de mantenimiento** que son aplicables



7

Mortalidad Infantil

Típica de los equipos electrónicos y los activos mantenidos de forma incorrecta u operados bien fuera de los límites de diseño o instalados en forma inadecuada.



Mortalidad Infantil

- Alta tasa de falla inicial reduciendo a una tasa constante.
- Conocida como Mortalidad Infantil.
- A menudo indicativo de problemas de calidad, mala instalación o procedimientos de puesta en marcha incorrectos.

Opciones de Mantenimiento

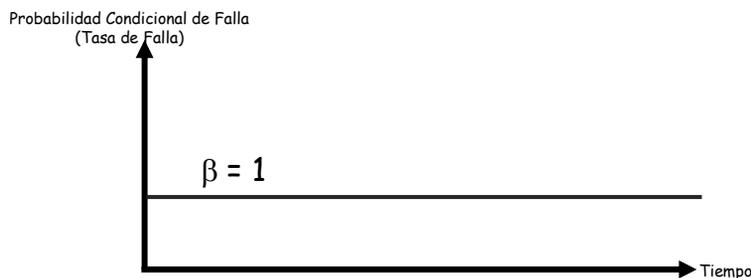
- Análisis Causa Raíz para eliminar la causa de los problemas,
- "Ablande" o apoyo en puesta en marcha para período inicial,
- Inspección.



8

Fallas Aleatorias

Típico de diseño insuficientes o de operar el activo fuera de especificación o en condiciones de operación muy variables



Fallas Aleatorias
 Estado Estable donde la tasa de falla no cambia con el tiempo.
 A menudo, debido a:

- eventos aleatorios
- error humano
- variabilidad en las condiciones de servicio

Opciones de Mantenimiento

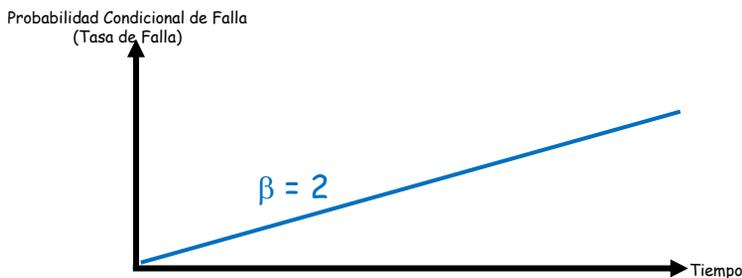
- Inspeccionar para encontrar señales de aviso de falla y planear para reparar antes de la falla,
- Operar a la falla y reparar
- Agregar redundancia.



9

Envejecimiento Constante

Típico de fallas de corrosión



Envejecimiento Constante

- Aumento constante de la tasa de falla con el tiempo.
- Sin vida útil de desgaste definida.
- Mecanismo de falla tal como la fluencia, la vida de material refractario, la corrosión.

Opciones de Mantenimiento

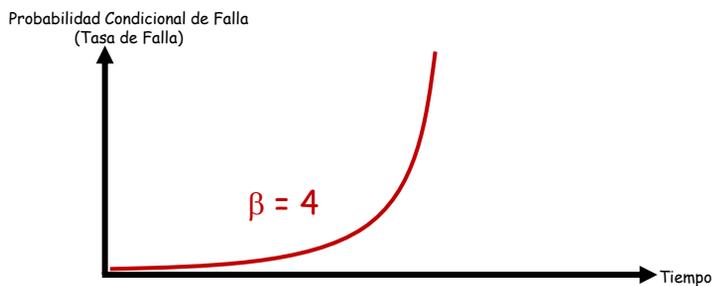
- Inspección regular.
- Restauración/Reemplazo basado en el tiempo.



10

Desgaste

Típico para aplicaciones de carga de fatiga, o de revestimientos de desgaste abrasivo



- Peor Viejo**
- Rápido deterioro hacia el final de la vida útil.
 - Fatiga, corrosión bajo tensión, erosión y otros mecanismos de envejecimiento.
- Opciones de Mantenimiento**
- Restauración/Reemplazo basado en el tiempo sin duda un candidato.
 - La inspección también puede ser eficaz si hay tiempo suficiente de advertencia



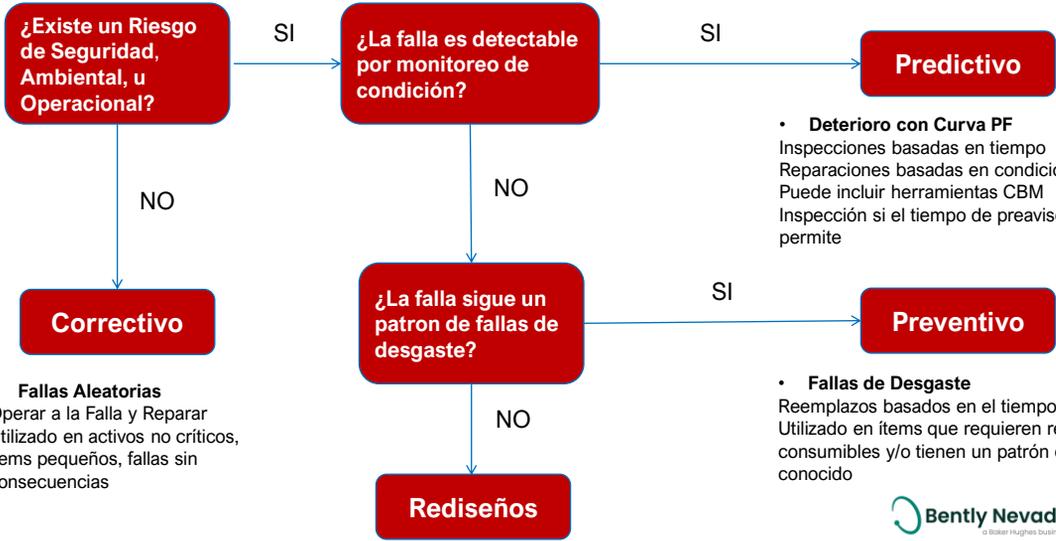
Valores de Beta

Beta	Tipo de Componente que Falla
Beta = 0.5	Electrónica, equipo de alta complejidad, sistemas de control avanzado
Beta = 1	Rodamientos
Beta = 1.5	Hidráulica, neumática
Beta = 2	Tuberías, materiales refractarios, neumáticos, embragues, estructuras, motores de turbina
Beta = 4	Pistas, revestimientos, impulsores, mandíbulas trituradoras, bombas de pistón





Árbol de Decisión RCM



¿Existe un Riesgo de Seguridad, Ambiental, u Operacional?

SI

¿La falla es detectable por monitoreo de condición?

SI

Predictivo

- **Deterioro con Curva PF**
Inspecciones basadas en tiempo
Reparaciones basadas en condición
Puede incluir herramientas CBM
Inspección si el tiempo de preaviso lo permite

NO

Correctivo

- **Fallas Aleatorias**
Operar a la Falla y Reparar
Utilizado en activos no críticos, ítems pequeños, fallas sin consecuencias

NO

¿La falla sigue un patron de fallas de desgaste?

SI

Preventivo

- **Fallas de Desgaste**
Reemplazos basados en el tiempo
Utilizado en ítems que requieren repuestos consumibles y/o tienen un patrón de fallas conocido

NO

Rediseños



Justificar Estrategias de Activos



Lograr el desempeño y la seguridad de la planta planeados, a los costos óptimos de recursos.

- ↳ Desempeño de Producción: cantidad y calidad
- ↳ Disponibilidad de Planta
- ↳ Seguridad & requerimientos Estatutarios
- ↳ Eficiencia Operacional



Se determina la estrategia de mantenimiento para cada elemento de equipo que se puede mantener.

- ↳ Tarea de mantenimiento a una frecuencia, duración, materiales y recursos de mano de obra especificados.

**Entender los Objetivos del Negocio
Permite que los Costos de Mantenimiento
Se Equilibren con los Costos de Falla**



Selección de Tareas de Mantenimiento



$$\text{Confiabilidad} = e^{-\lambda t}$$

Donde $\lambda = 1/\text{TMEF}$

La probabilidad de falla no es siempre la misma a lo largo del tiempo

- *Ítems tienen Mortalidad Infantil*
- *Ítems tienen Desagaste*

15



Distribución Weibull



Una fórmula que puede describir los diferentes patrones de falla (formas gráficas) en cada una de las tres zonas.

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{(Weibull de 2 Parámetros)}$$

$R(T)$ = Confiabilidad en Tiempo T

T = Tiempo T considerado

η = Vida Característica

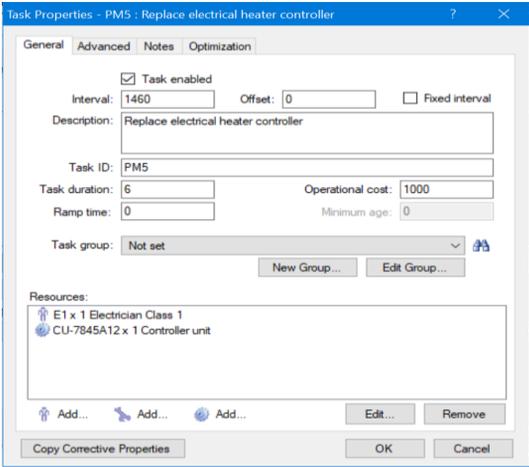
β = Parámetro de Forma

e = 2,71828 (base de los logaritmos naturales)

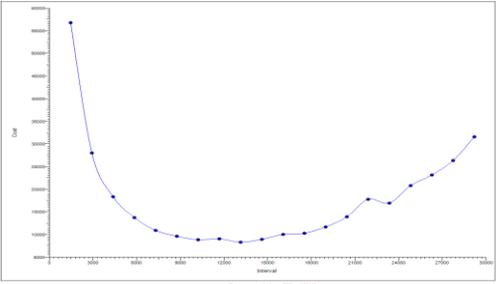
16



Tareas de Mantenimiento Preventivo



Definir Tarea



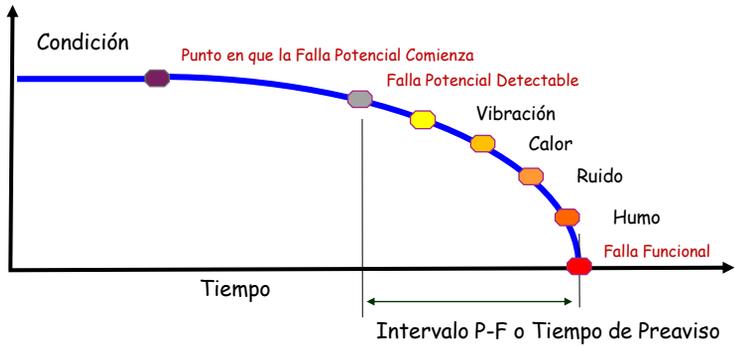
Maintenance and design strategy:

Strategy	Enabled	Interval	Group	Description
Planned Maintenance	<input checked="" type="checkbox"/>	13140	Not set	Replace bearings
Inspection	<input type="checkbox"/>	730	Not set	Carry out vibration analysis to determ

Seleccionar Intervalo MP



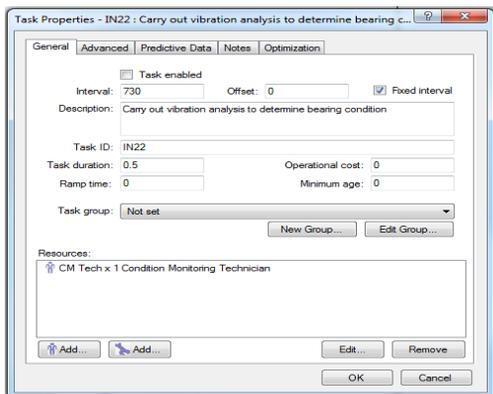
Frecuencia de Tareas de Inspección



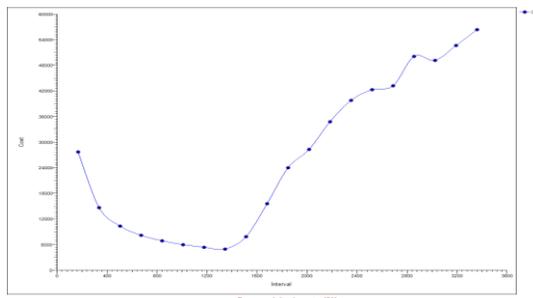
- El punto en que la falla es evidente se conoce como **punto (tiempo) de falla potencial**
- El punto de falla final se conoce como **punto (tiempo) de falla funcional**
- El tiempo entre el fallo potencial y el fallo funcional se conoce como **intervalo P-F**.



Tareas de Inspección



Definir Tarea



Maintenance and design strategy:

Strategy	Enabled	Interval	Group	Description
Planned Maintenance	<input type="checkbox"/>	13140	Not set	Replace bearings
Inspection	<input checked="" type="checkbox"/>	1344	Not set	Carry out vibration analysis to determine bearing condition

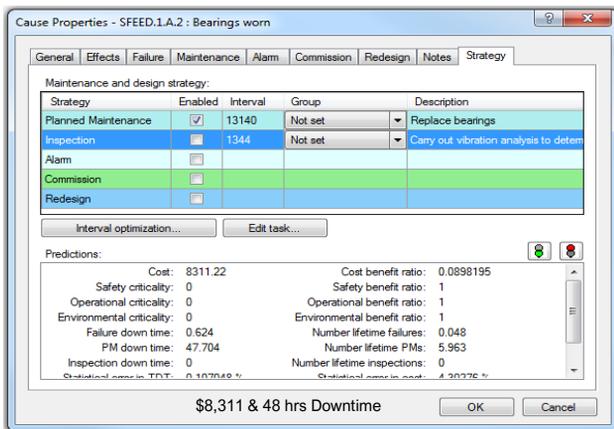
Seleccionar Intervalo de Inspección

19

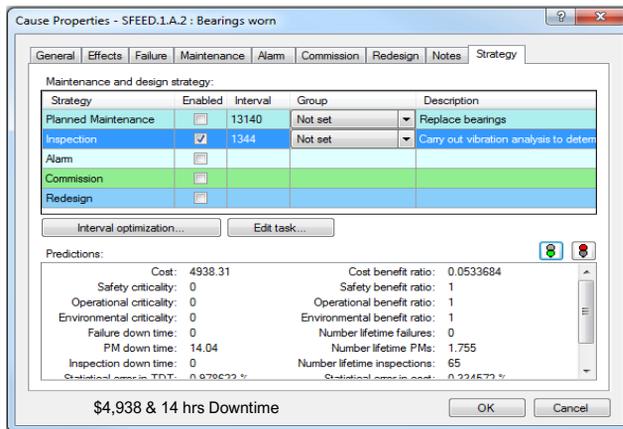


Evaluar Alternativas

PREVENTIVO



INSPECCIÓN



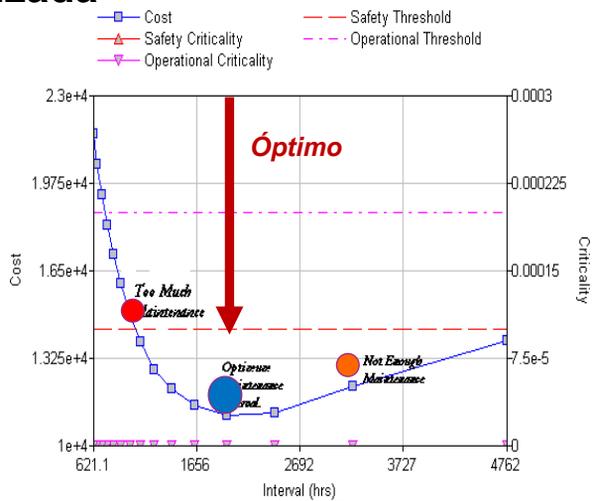
20



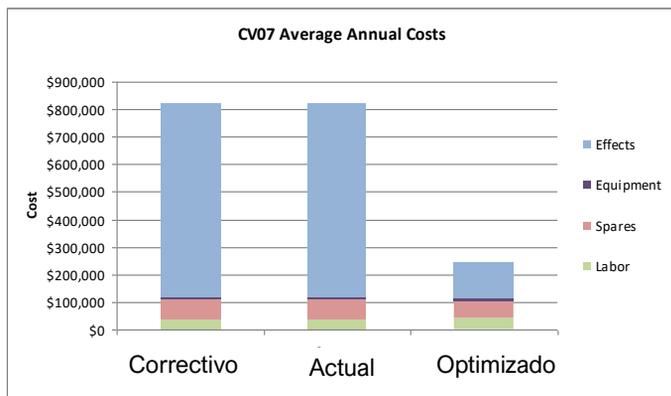


Resultados de Optimización: Frecuencia de Tarea Optimizada

- Asesoramiento para la toma de decisiones basado en la simulación de desempeño.
- Modelado de redundancia.
- Comparación costo beneficio para estrategias de mantenimiento alternativas.



Comparar Programas (Escenarios)

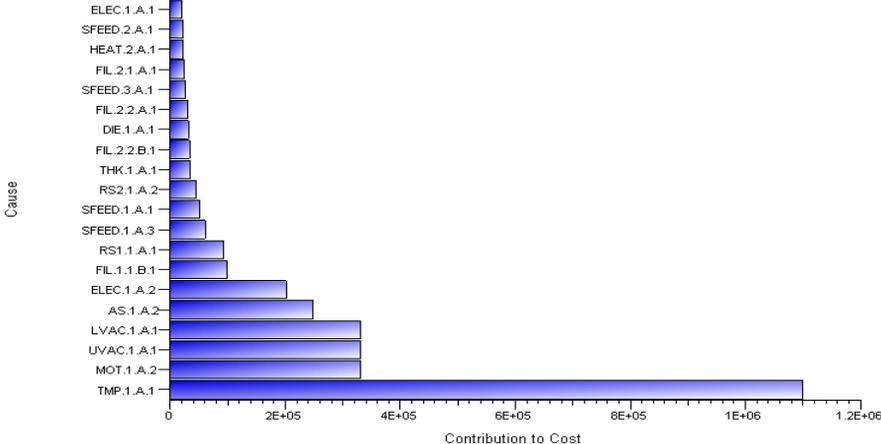


- Escenarios alternativos pueden ser evaluados.
- Empodera al equipo a considerar alternativas.
- Valida el plan de Mantenimiento para:
 - Gerentes, Técnicos, Reguladores.

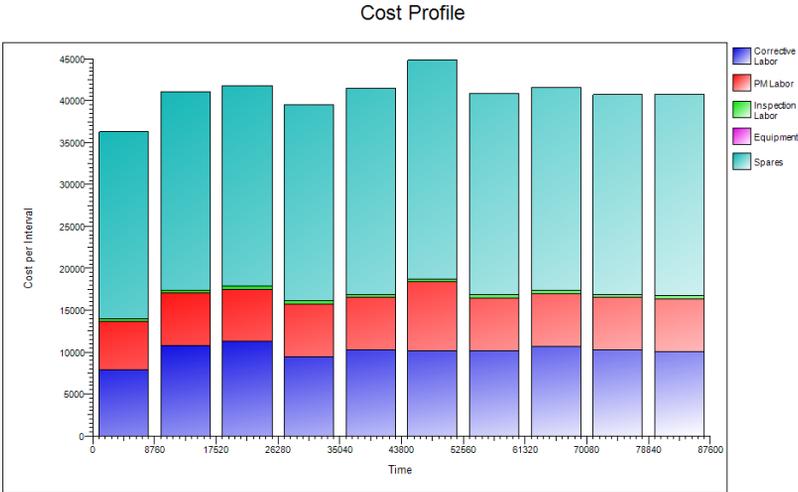




Entender Exposición (Contribución de cada MF)



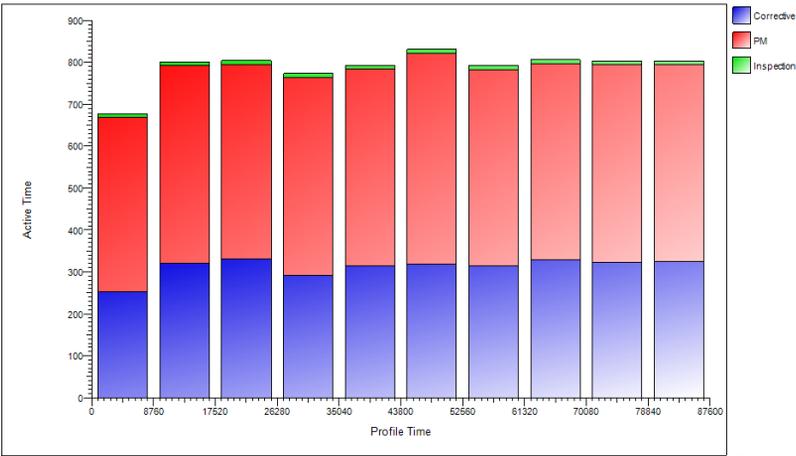
Pronosticar Presupuestos Totales





Pronosticar Uso de Mano de Obra

Labor Profile for All Labor

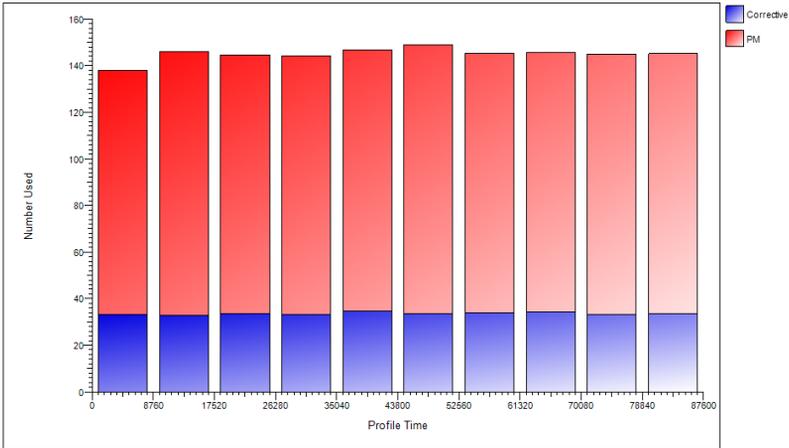


25



Pronosticar Uso de Repuestos

Spares Profile for All Spares



26

Programa de Confiabilidad Vivo mediante Recolección de Datos



- Lograr una operación más esbelta es el resultado de una evaluación constante de los datos de desempeño
- Esta información ayudará a actuar como una base para la toma de decisiones futuras



27



RCM Brinda



- Una **operación segura**
- Asegura la **eficiencia & confiabilidad de planta**
- Provee una **base documentada** para **mantenimiento planeado**
- Predice requerimientos de **recursos**
- Predice uso de **repuestos**
- Predice **presupuesto de mantenimiento**



28



Optimización en Base a Datos Cuantificados

Ejercicio de Decisiones Cuantificadas en Estrategias de Confiabilidad Optimización Costo-Beneficio



29

Ejercicios de RCM



1. Este Taller guía a los estudiantes a través de una serie de Ejercicios para ilustrar cómo evaluar diferentes escenarios de mantenimiento.
2. El propósito de este Taller es que los alumnos se familiaricen con las variables que influyen en la elección de una tarea óptima de mantenimiento.



30



Objetivos de Aprendizaje

1. Describir e identificar los pasos para la construcción de una tarea de Mantenimiento Correctivo (CM).
2. Calcular el costo de una tarea de Mantenimiento Correctivo (CM).
3. Describir e identificar los pasos para la construcción de una tarea Preventiva/Predictiva (PM/PdM) optimizada.
4. Calcular el costo de una tarea Preventiva/Predictiva (PM/PdM) eficaz.
5. Evaluar la eficacia de las soluciones encontradas.
6. Evaluar el riesgo de extender los intervalos de tareas o definirlos por calendario.
7. Reconocer la sensibilidad a diversos factores que influyen las decisiones de mantenimiento tales como el costo de las fallas y el costo de repuestos.

Mantenimiento Correctivo

- Costo de Mantenimiento Correctivo = Numero de Fallas en el Tiempo de Vida de un Sistema x {Costo de la Tarea de Mantenimiento + Costo de la Falla}
 - Numero de Fallas en el Tiempo de Vida de un Sistema = **Tiempo de Vida del Sistema/MTBF dado por la simulación durante el tiempo de vida especificado**
 - Costo de la Tarea de Mantenimiento = **duración x costo de trabajo por hora + costo de repuestos + costos operacionales**
 - Costo de Trabajo = **número de personas x costo/hora**
 - Costo de Repuesto = **número de repuestos x costo por unidad**
 - Costo de la Falla = **{tiempo de tarea + retraso logístico} x costo por hora de parada + costos de única vez**

Mantenimiento Correctivo



Ejercicio 1:

– Calcular el Costo de Mantenimiento Correctivo sobre 10000 horas usando los siguientes datos.

- Número de fallas = Tiempo de Vida del Sistema/MTBF = $10000/2500 = 4$
- Duración de la tarea = 8 horas
- Costo por hora de trabajo = \$100
- Costo de repuestos = \$5000
- Costo de tareas operacionales = \$2000
- Retraso logístico = 0
- Costo por hora de parada = \$175 / hora
- Costos de falla de única vez = \$10000



33

Mantenimiento Correctivo



• Hoja de Cálculo



34

Mantenimiento Correctivo

Respuesta Ejercicio 1:

- **Costo de Mantenimiento Correctivo = Número de Fallas en el Tiempo de Vida de un Sistema x {Costo de la tarea de mantenimiento + Costo de la Falla}**

Respuesta

$$= 4 \times \{(8 \times \$100/\text{hr} + \$5000 + \$2000) + (8 \times \$175/\text{hr} + \$10000)\}$$

$$= \mathbf{\$76800}$$



35

Mantenimiento Preventivo

- **Mantenimiento Preventivo = {Número de tareas completadas x Costo de la tarea PM} + Costo de fallas**
 - Número de tareas = **Tiempo de Vida del Sistema / Intervalo**
 - Costo del PM = **Duración de tarea PM x costo de trabajo + costos de repuestos + costos operacionales**
 - Costo de fallas
 - Para PM efectivos = el costo de la falla es cero
 - Para PM inefectivos = número de fallas x costo por parada + costo de única vez.

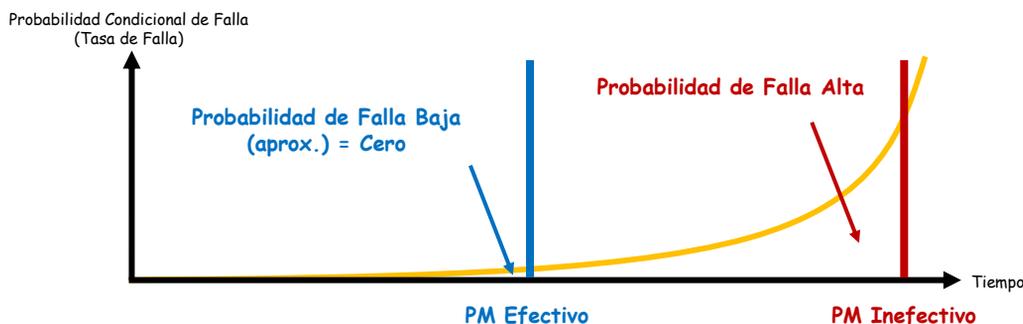


36

Efectividad del PM



Weibull – Patrón de Falla de Desgaste y Efectividad del PM.



37



Mantenimiento Preventivo



Ejercicio 2:

- Calcular el costo total sobre 10000 hrs. usando datos de PM adicionales.
 - Intervalo de PM = 1650 horas
 - Duración de tarea PM = 6 horas
 - Costo de repuestos = \$5000
 - Costo operacional = \$2000
 - El costo de la falla supone que el PM es efectivo en restaurar la vida



38



Mantenimiento Preventivo



- *Hoja de Cálculo*



39

Mantenimiento Preventivo



Respuesta Ejercicio 2:

- $6 \times (6 \times \$100 + \$5000 + \$2000) + 0 = \mathbf{\$45600}$
 - Numero de tareas = $10000 \text{ hrs} / 1650 \text{ hrs} = 6$
 - Costo de PM = $6 \times \$100\text{phr} + \$5000 + \$2000 = \$ 7600$
 - Costo de falla por tarea de PM efectiva = cero



40

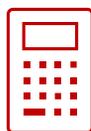
Mantenimiento Preventivo

Ejercicio 3:

- Intente el mismo ejemplo con un **intervalo PM de 4900 horas**.
 - Calcular el costo total sobre 10000 hrs usando datos de PM adicionales.
 - Intervalo de PM = 4900horas
 - Duración de tarea PM = 6 horas
 - Costo de repuestos = \$5000
 - Costo operacional = \$2000
 - El costo de la falla supone que el PM es efectivo en restaurar la vida

41

Mantenimiento Preventivo



• *Hoja de Cálculo*

42

Mantenimiento Preventivo

Respuesta Ejercicio 3:

Mantenimiento Preventivo = {Número de tareas completadas x Costo de la tarea PM} + Costo(s) de la falla(s)

- Número de tareas = 0
- Costo del PM = \$0
- Costo de la falla
 - **En este caso el intervalo de PM es demasiado largo y la falla ocurre antes de la parada programada, entonces el costo de la falla será el mismo que el del Mantenimiento Correctivo.**
- Costo del Mantenimiento Correctivo incluyendo parada = **\$76800**



43

Discusión Mantenimiento Preventivo

- La reducción de costos de mantenimiento mediante la extensión del intervalo más allá de la edad de desgaste conduce a mayores costos generales.
- **Sensibilidad:**
 - Si el costo del tiempo de parada es bajo, pero el costo de los repuestos es alto, el Correctivo probablemente sea más eficaz que el PM.
 - Si el costo de los repuestos es bajo, entonces los programas PM son probablemente más eficaces.
 - Con certeza la edad de desgaste puede ser un factor significativo en determinar la efectividad de las tareas PM.



44

Mantenimiento Predictivo

- Mantenimiento Predictivo = {Número de inspecciones completadas x Costo de la inspección PdM} + {Número de tareas completadas x Costo de tarea PM} + Costo de fallas
 - Número de inspecciones/tareas = **Tiempo de Vida del Sistema / Intervalo**
 - Costo del PdM = **Duración de inspección PdM x costo de inspección + costos de instrumentos**
 - Costo del PM = **Duración de tarea PM x costo de trabajo + costos de repuestos + costos operacionales**
 - Costo de fallas
 - Para PdM inefectivos = Nro de fallas x costo por parada + costo de única vez.
 - Para PdM efectivos = el costo de la falla es cero



45

Mantenimiento Predictivo

Ejercicio 4:

- Calcular el costo total sobre 10000 horas usando datos PdM adicionales.
 - **Tarea Predictiva:**
 - Intervalo PdM = 500 horas
 - Intervalo P-F = 750 horas
 - Duración de la tarea = 0.5 horas
 - **Acción Secundaria:**
 - Costo de repuesto = \$5000
 - Costo operacional = \$2000



46

Mantenimiento Predictivo



• *Hoja de Cálculo*

Mantenimiento Predictivo

Respuesta Ejercicio 4:

- Número de reemplazos:
 - MTBF = 2500 horas
 - Tarea PdM @ 500 horas con
 - PF = 750 horas
 - Atraparemos las fallas @ 2000 horas (Aprox.)
 - Entonces 10000 horas / 2000 horas = 5 reemplazos
- Número de PdM's:
 - 10000 horas/500 horas = 20 PdM's
 - Costo de falla para un PdM efectivo = cero
- Costo Total = Reemplazo + Costo PdM
 - 5 x \$7600/reemplazo + 20 PdM's [0.5 horas x \$100/hora]
 - Costo Total = **\$39000**

Discusión Mantenimiento Predictivo



- El Mantenimiento Predictivo puede reducir los costos de mantenimiento más allá, al permitir a los activos alcanzar el desgaste fuera de la curva y ser mantenidos antes de la falla.
- **Sensibilidad:**
 - PdM está restringido por las tecnologías o la capacidad humana de percibir señales de una falla inminente
 - No todas las Tareas Preventivas pueden ser reemplazadas por una Inspección
 - No todos los Modos de Falla son mejor mitigados con una Tarea Preventiva
 - Los intervalos P-F deben ser suficientemente largos para ser rentable y permitir a las Inspecciones identificar fallos prematuros

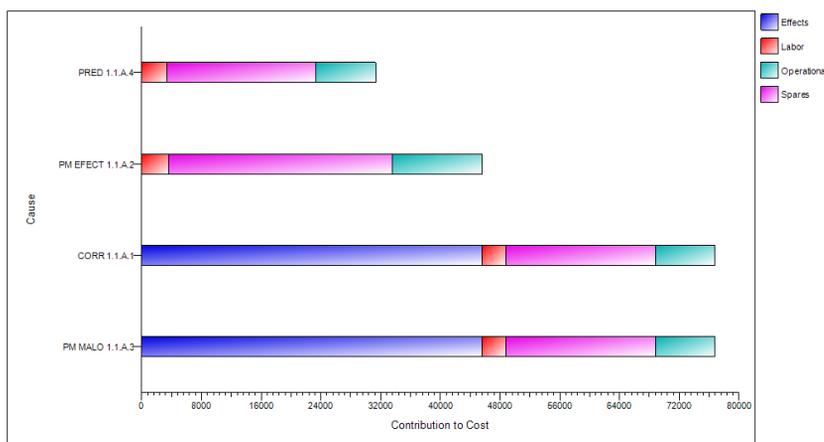


49

Resumen – Tareas de Mantenimiento



Estrategia	Costo Total
Correctiva (CM)	\$76800
Preventiva (PM) Efectiva (1650 hr)	\$45600
Preventiva (PM) Inefectiva (4900 hr)	\$76800
Predictivo (PdM)	\$39000

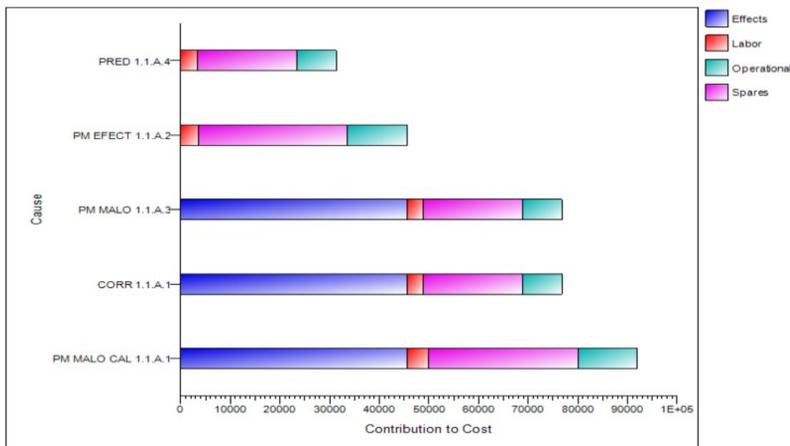


50



Resumen – Tareas de Mantenimiento Calendario

Estrategia	Costo Total
Predictivo (PdM)	\$39000
Preventiva (PM) Efectiva (1650 hr)	\$45600
Preventiva (PM) Inefectiva (4900 hr)	\$76800
Correctiva (CM)	\$76800
Preventiva (PM) Inefectiva Calendario (4900 hr)	\$92000



51



Resumen – Tareas de Mantenimiento Optimización



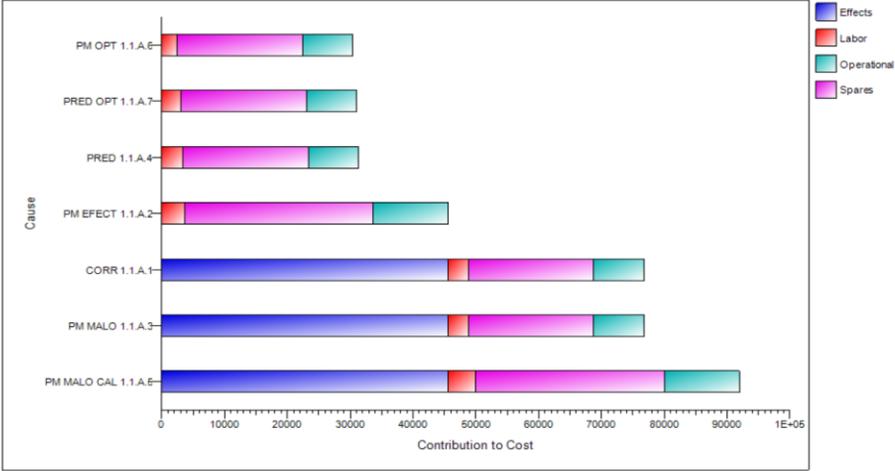
Estrategia	Costo Total	CBR
Preventiva (PM) Efectiva Optimizado (2200 hr)	\$30400	39.6%
Predictivo (PdM) Optimizado (750 hr)	\$31050	40.4%
Predictivo (PdM) (500 hr) <i>(en software es \$ 31350)</i>	\$39000	50.8%
Preventiva (PM) Efectiva (1650 hr)	\$45600	59.4%
Preventiva (PM) Inefectiva (4900 hr)	\$76800	100.0%
Correctiva (CM)	\$76800	100.0%
Preventiva (PM) Inefectiva Calendario (4900 hr)	\$92000	119.8%



52



Resumen – Tareas de Mantenimiento Optimización



Santiago Sotuyo Blanco

Ingeniero Principal de Confiabilidad - Latino América
ARMS Reliability
santiago.sotuyo@bakerhughes.com

SI TIENES PREGUNTAS O COMENTARIOS

¡No dudes en acercarte!



iGracias!

Presentado por:

Ing. Ind. Santiago Sotuyo Blanco, CMRP, CRL, AMP-S

santiago.sotuyo@bakerhughes.com

