



**TOOLBOX**  
SESIÓN

# ***SELECCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO***

**Eduardo Cote**

Gerente de Ingeniería – Latino América – ARMS Reliability

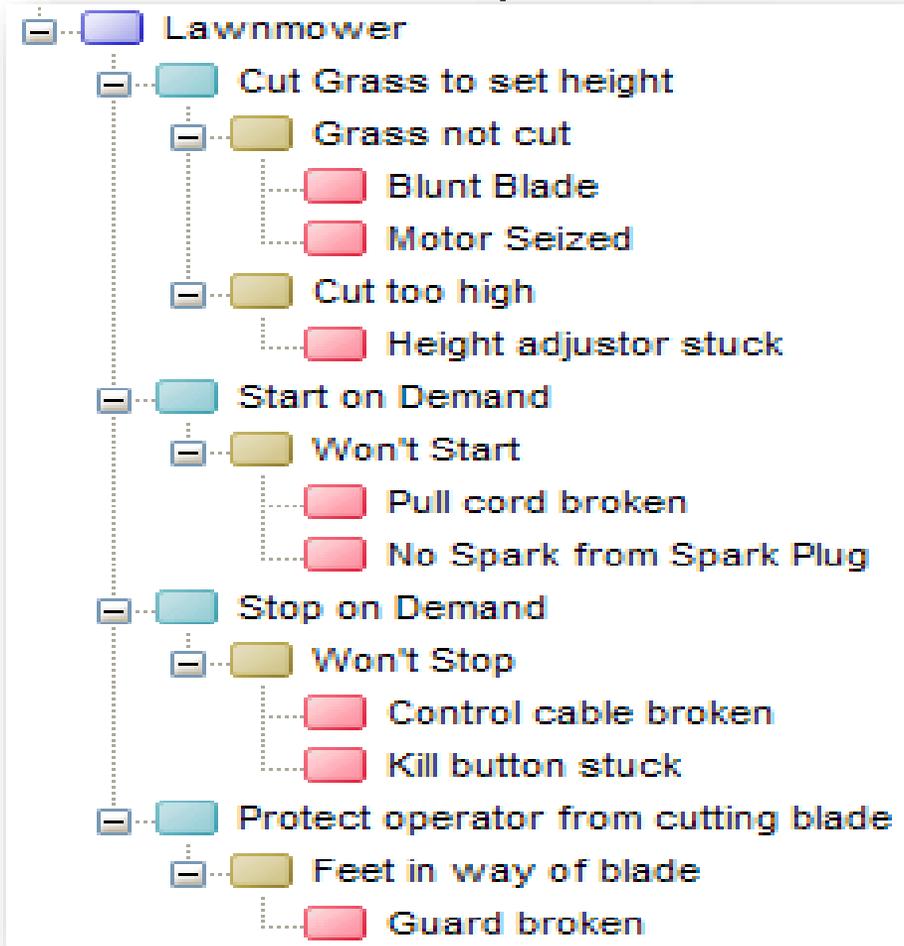


# *Introducción al RCM*

## **Análisis de Selección y Optimización de Tareas de Mantenimiento**

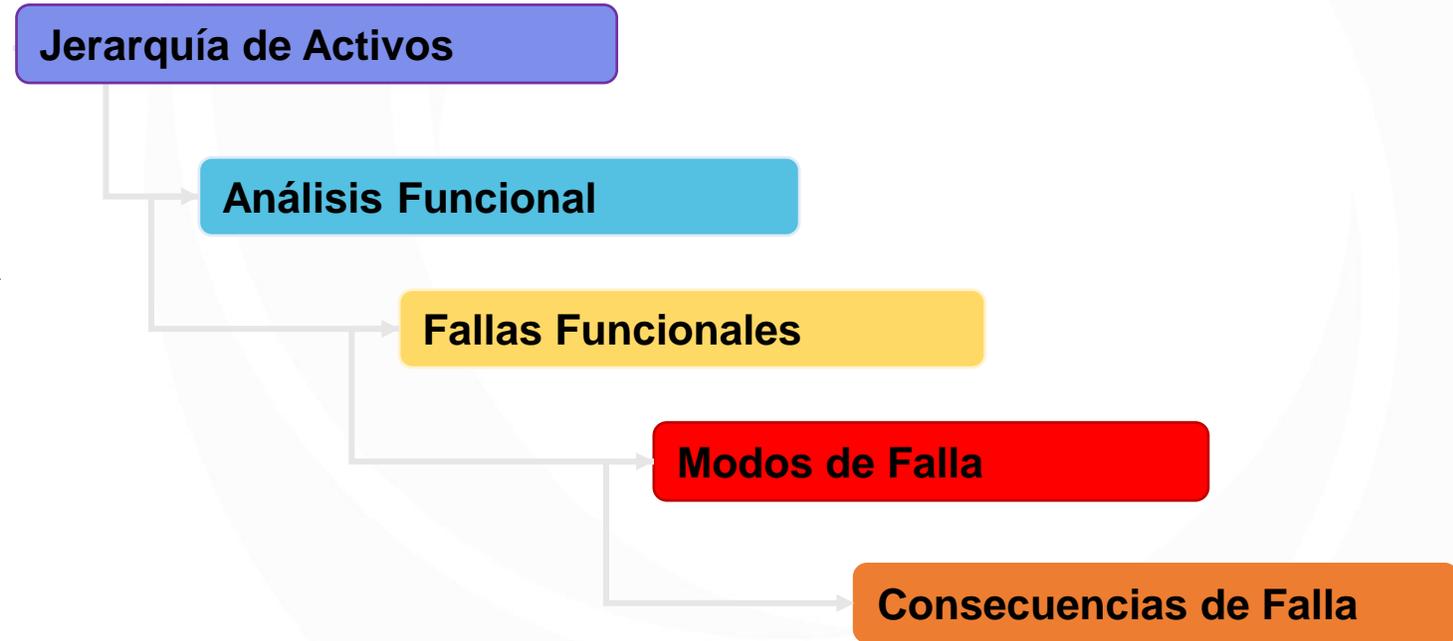
# RCM

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



# 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



# Falla vs Tarea

---

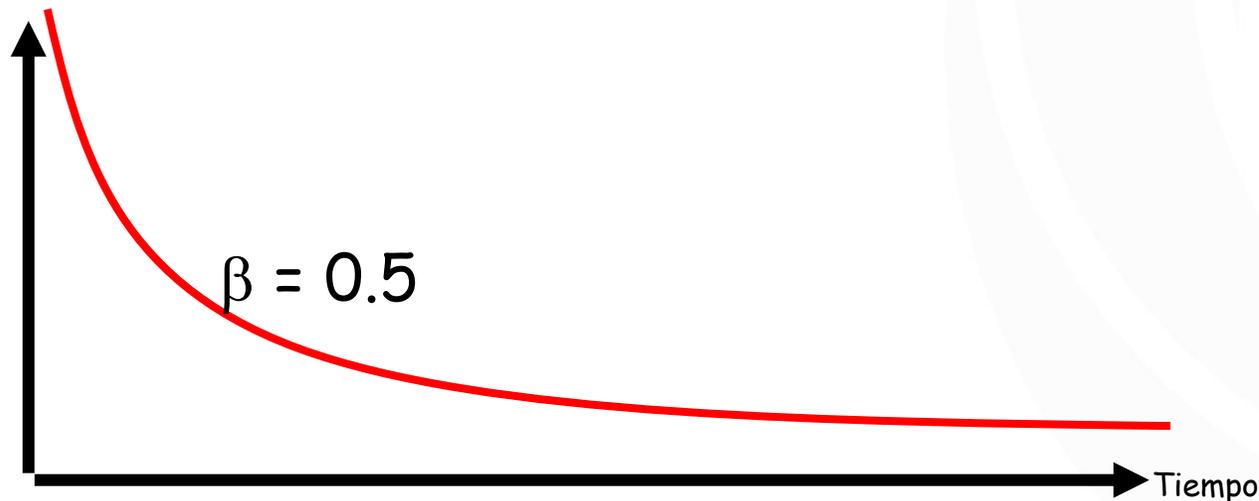


Entender el **comportamiento de falla** es importante para determinar el **tipo de tareas de mantenimiento** que son aplicables

# 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.

Probabilidad Condicional de Falla  
(Tasa de Falla)



## Mortalidad Infantil

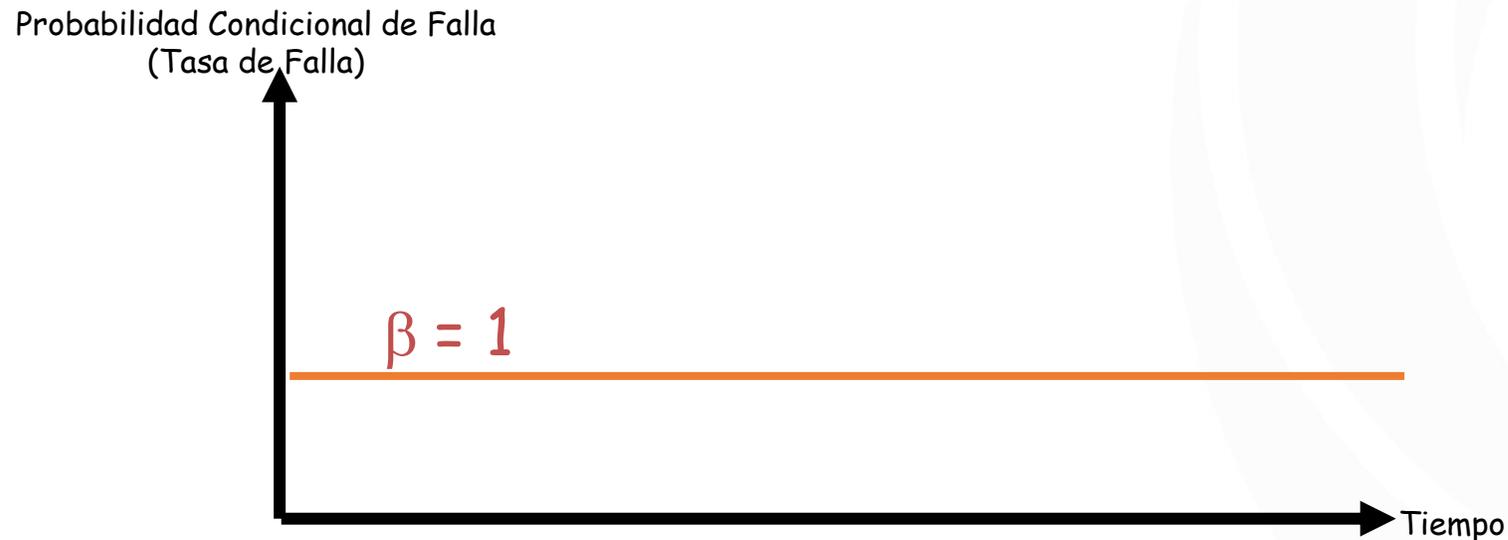
- Alta tasa de falla inicial reduciendo a una tasa constante.
- Conocida como Mortalidad Infantil.
- A menudo indicativo de problemas de calidad, mala instalación o procedimientos de puesta en marcha incorrectos.

## Opciones de Mantenimiento

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

# 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

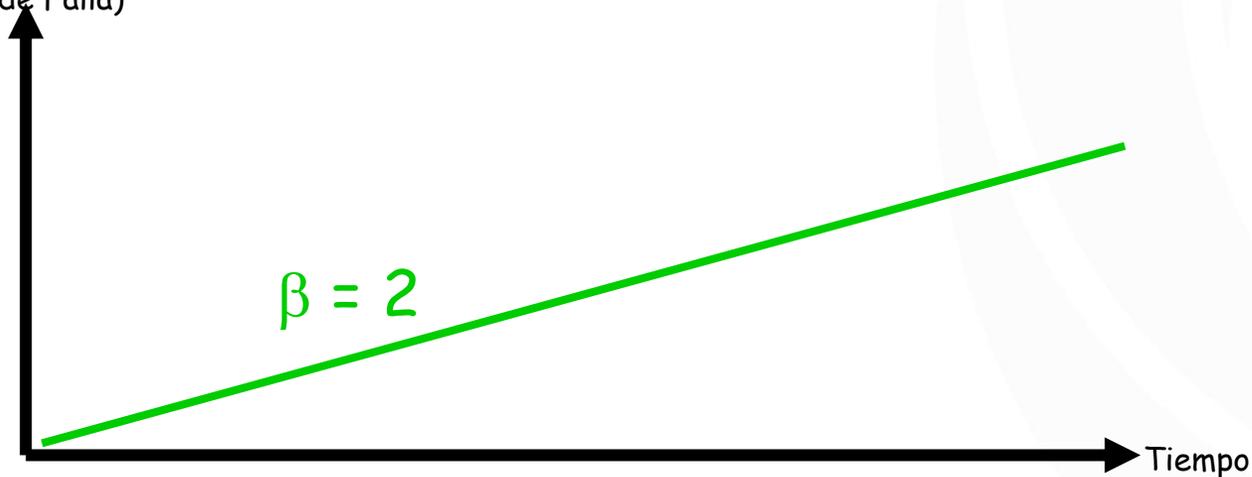
## Opciones de Mantenimiento

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

# Envejecimiento Constante

Típico de fallas de corrosión

Probabilidad Condicional de Falla  
(Tasa de Falla)



## Envejecimiento Constante

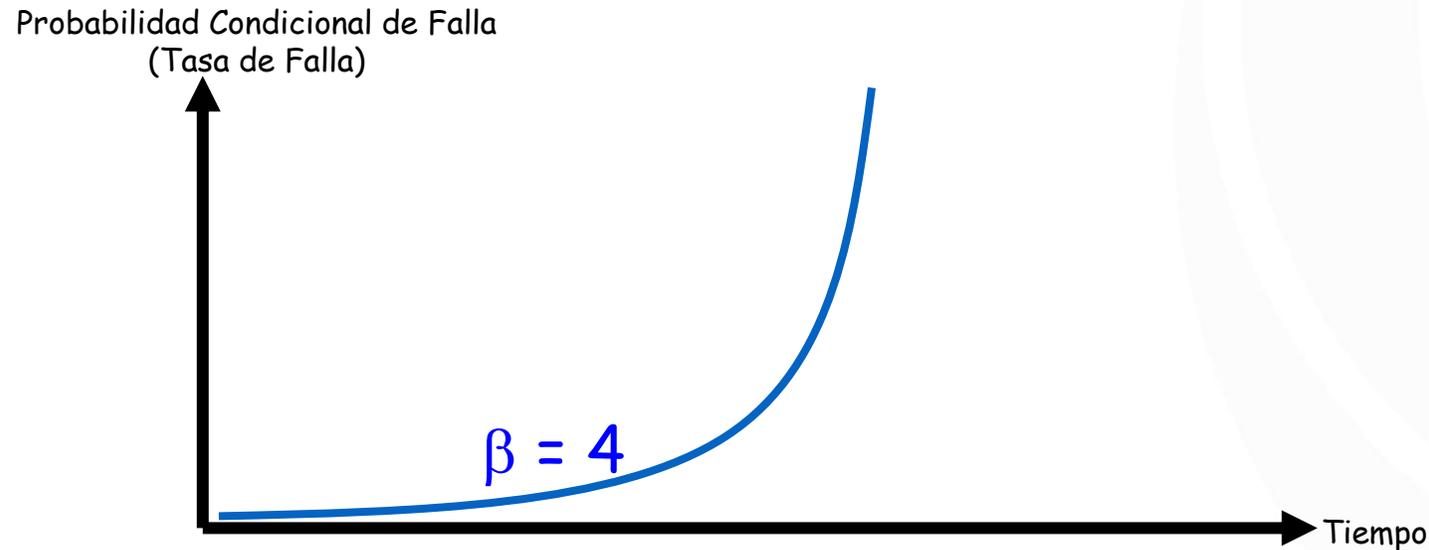
- Aumento constante de la tasa de falla con el tiempo.
- Sin vida útil de desgaste definida.
- Mecanismo de falla tal como la fluencia, la vida de material refractario, la corrosión.

## Opciones de Mantenimiento

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

# 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.

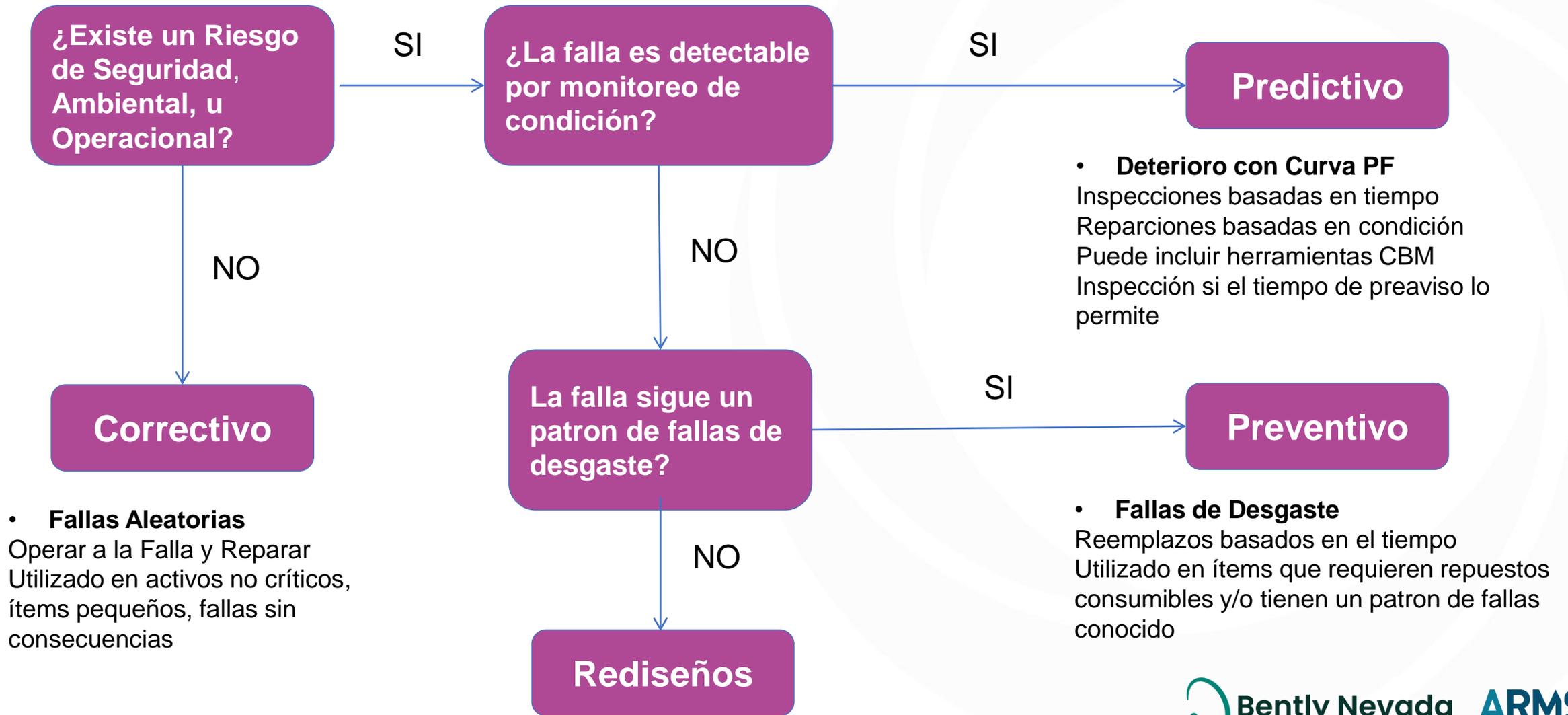
La inspección también puede ser eficaz si hay tiempo suficiente de advertencia

# 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



# 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  $\lambda = 1/TMEF$

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

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

# Distribución Weibull

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

$$R(T) = e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta}$$

(Weibull de 2 Parámetros)

R(T) = Confiabilidad en Tiempo T

T = Tiempo T considerado

$\eta$  = Vida Característica

$\beta$  = Parámetro de Forma

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

# Tareas de Mantenimiento Preventivo

Task Properties - CM2 : Replace bearings

General | Advanced | Notes

Description: Replace bearings

Task ID: CM2

Task duration: 12 Operational cost: 0

Ramp time: 0

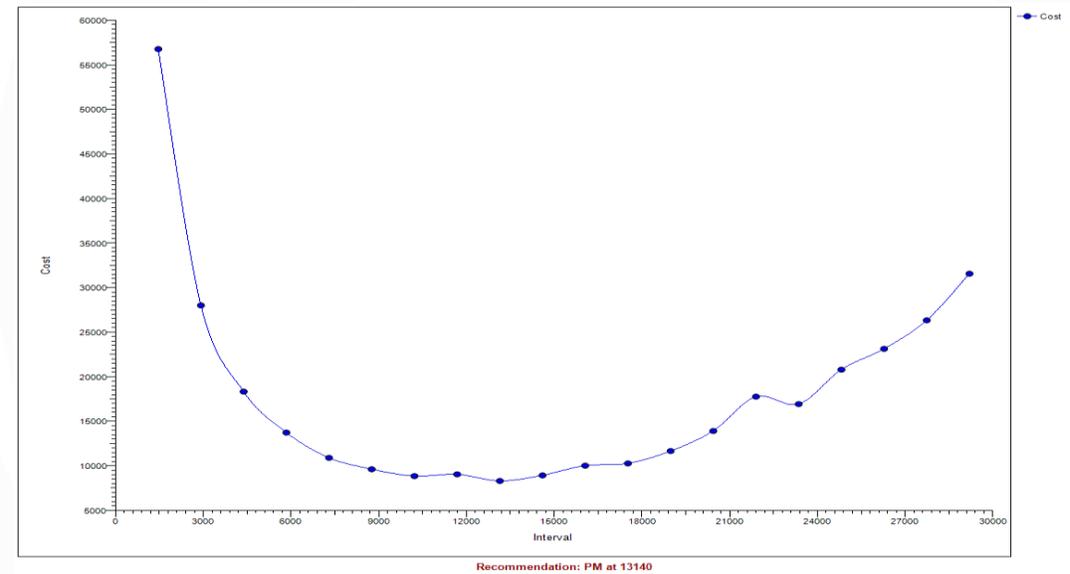
Resources:

- MECH x 2 Mechanic
- BB-3XY8395A x 2 Ball bearings

Add... Add... Add... Edit... Remove

OK Cancel

Definir Tarea

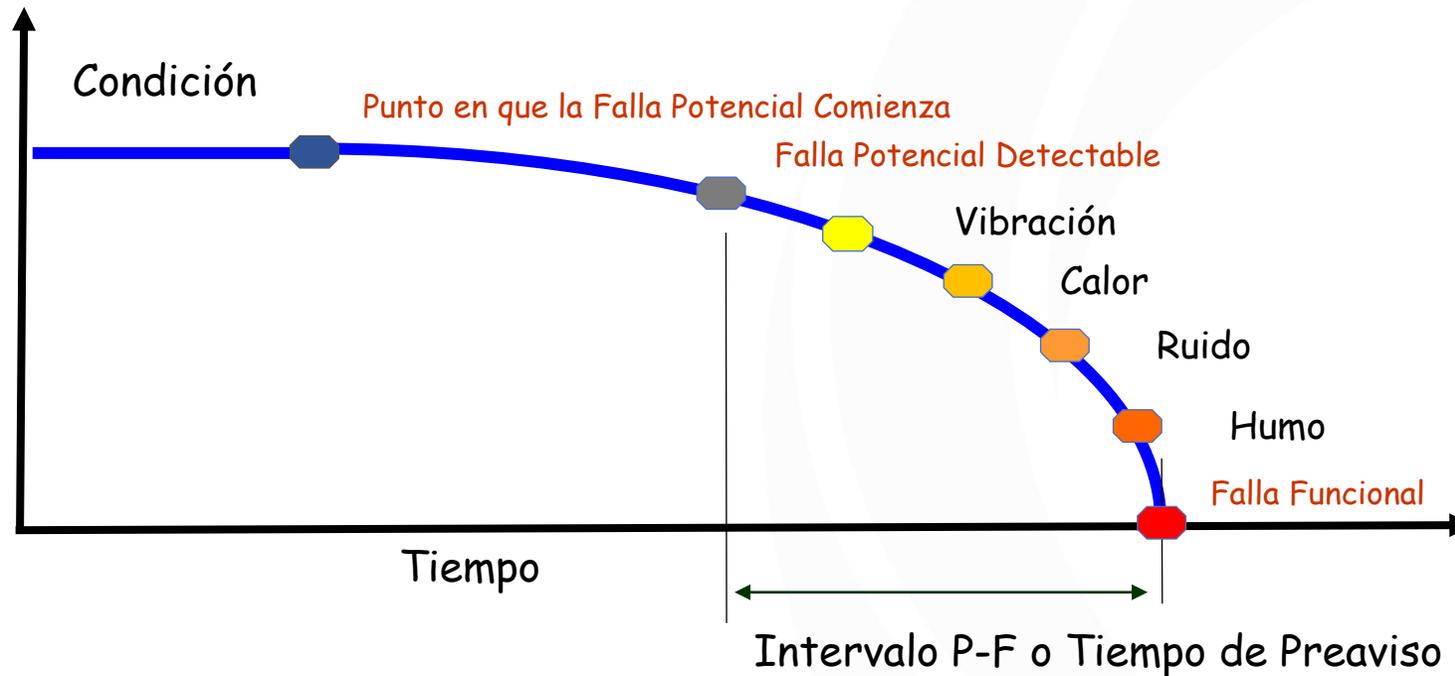


Maintenance and design strategy:

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

Task Properties - IN22 : Carry out vibration analysis to determine bearing c...

General | Advanced | Predictive Data | Notes | Optimization

Task enabled

Interval: 730    Offset: 0     Fixed interval

Description: Carry out vibration analysis to determine bearing condition

Task ID: IN22

Task duration: 0.5    Operational cost: 0

Ramp time: 0    Minimum age: 0

Task group: Not set

New Group...    Edit Group...

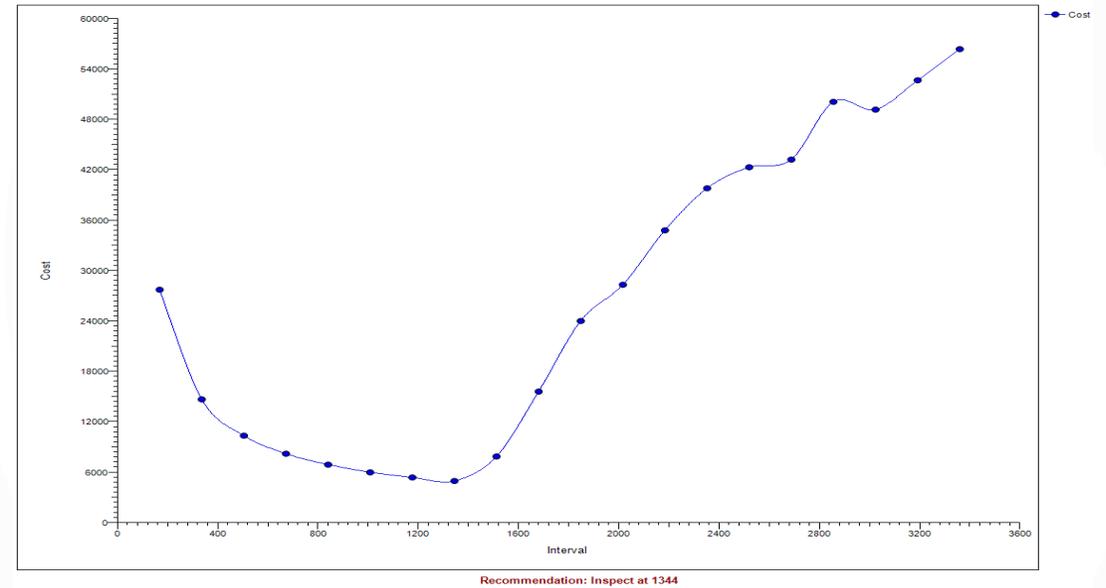
Resources:

CM Tech x 1 Condition Monitoring Technician

Add...    Add...    Edit...    Remove

OK    Cancel

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 determ

Seleccionar Intervalo de Inspección

# Evaluar Alternativas

## MP

## INSPECCIÓN

Cause Properties - SFEED.1.A.2 : Bearings worn

General Effects Failure Maintenance Alarm Commission Redesign Notes Strategy

Maintenance and design strategy:

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

Interval optimization... Edit task...

Predictions:

Cost:	8311.22	Cost benefit ratio:	0.0898195
Safety criticality:	0	Safety benefit ratio:	1
Operational criticality:	0	Operational benefit ratio:	1
Environmental criticality:	0	Environmental benefit ratio:	1
Failure down time:	0.624	Number lifetime failures:	0.048
PM down time:	47.704	Number lifetime PMs:	5.963
Inspection down time:	0	Number lifetime inspections:	0
Statistical error in TDT:	0.107048 %	Statistical error in cost:	4.20276 %

**\$8,311 & 48 hrs Downtime**

OK Cancel

Cause Properties - SFEED.1.A.2 : Bearings worn

General Effects Failure Maintenance Alarm Commission Redesign Notes Strategy

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 determ
Alarm	<input type="checkbox"/>			
Commission	<input type="checkbox"/>			
Redesign	<input type="checkbox"/>			

Interval optimization... Edit task...

Predictions:

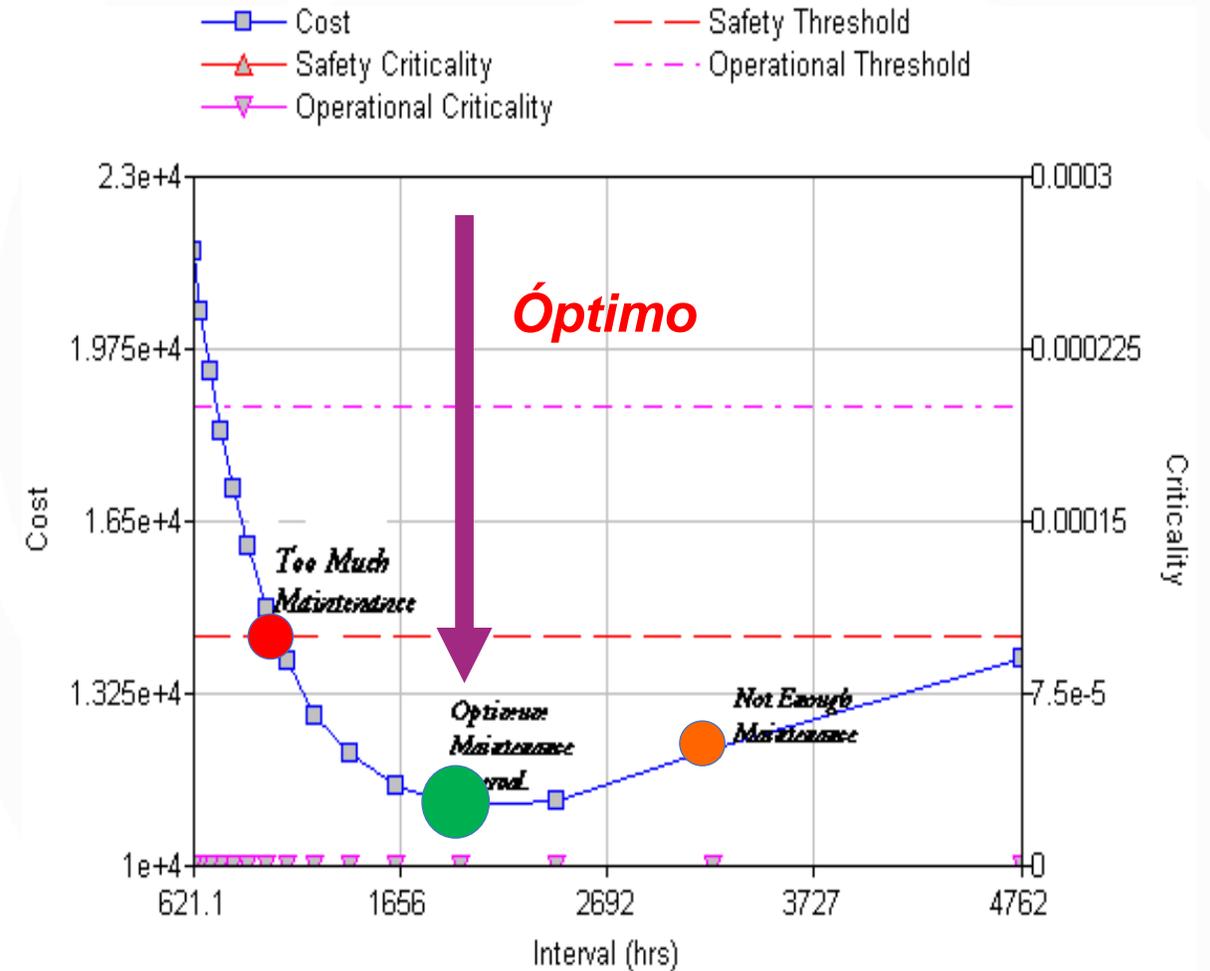
Cost:	4938.31	Cost benefit ratio:	0.0533684
Safety criticality:	0	Safety benefit ratio:	1
Operational criticality:	0	Operational benefit ratio:	1
Environmental criticality:	0	Environmental benefit ratio:	1
Failure down time:	0	Number lifetime failures:	0
PM down time:	14.04	Number lifetime PMs:	1.755
Inspection down time:	0	Number lifetime inspections:	65
Statistical error in TDT:	0.979622 %	Statistical error in cost:	0.224572 %

**\$4,938 & 14 hrs Downtime**

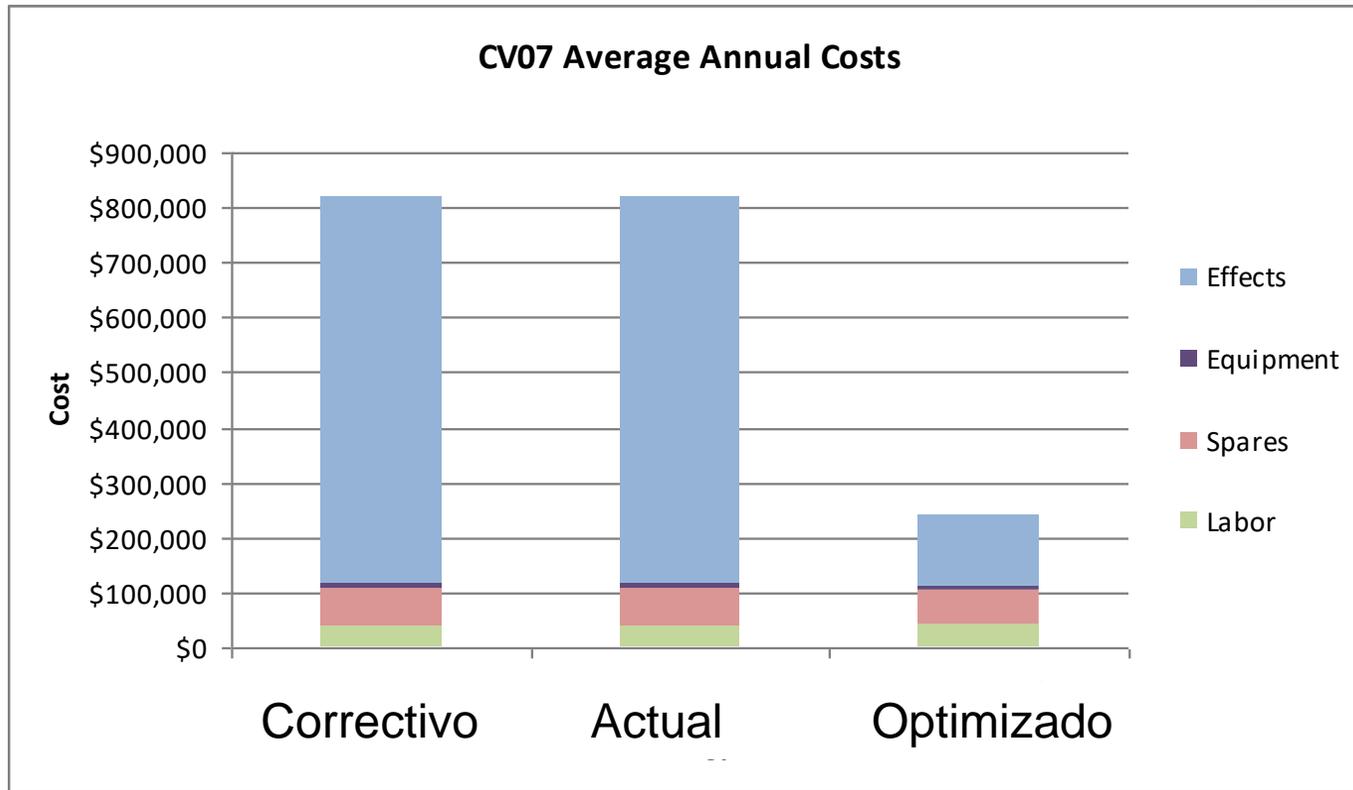
OK Cancel

# 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.

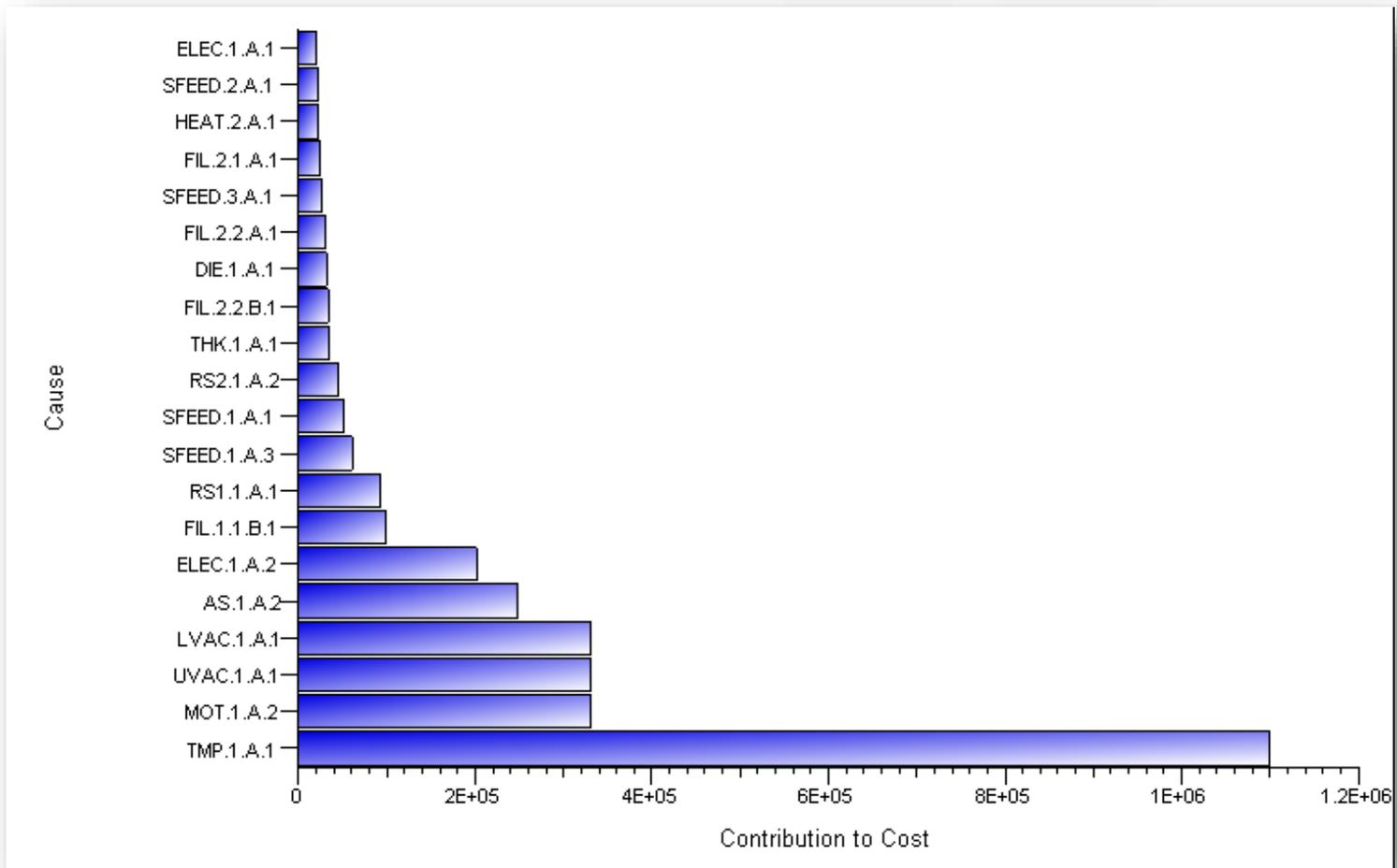


# Comparar Programas (Escenarios)

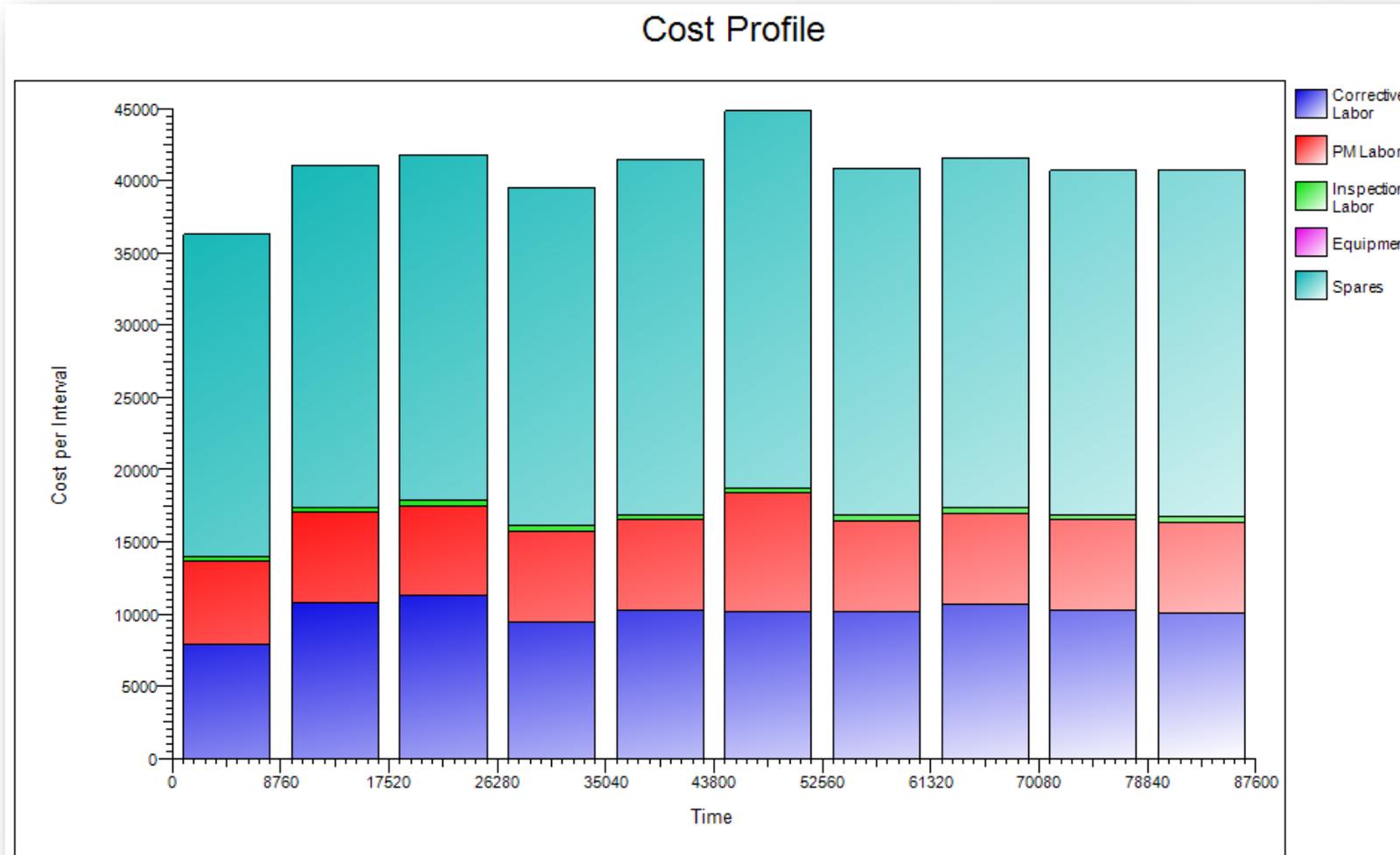


- Escenarios alternativos pueden ser evaluados.
- Empodera al equipo a considerar alternativas.
- Valida el plan de Mantenimiento para:
  - Gerentes, Técnicos, Reguladores.

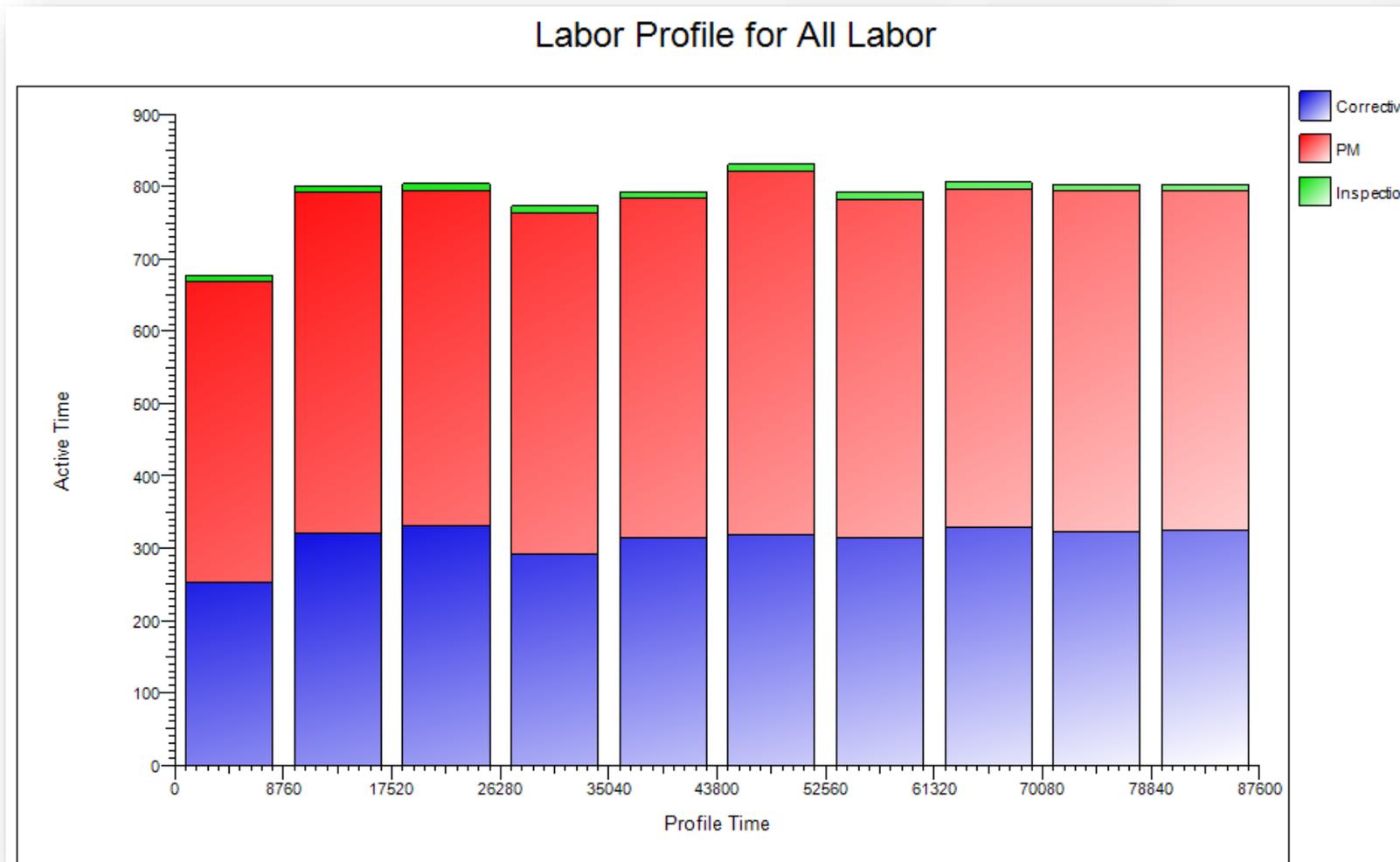
# Entender Exposición (Contribución de cada MF)



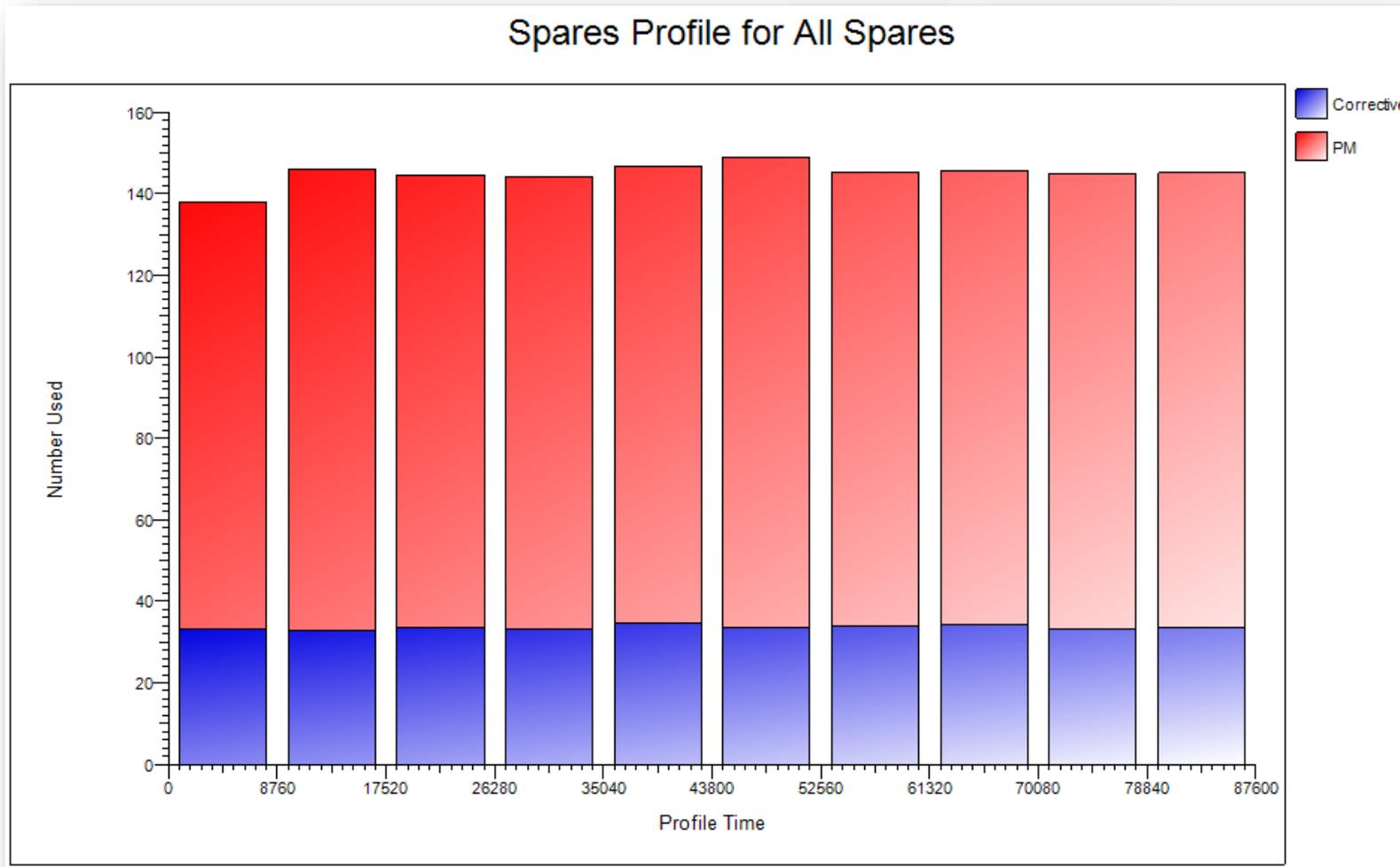
# Pronosticar Presupuestos Totales



# Pronosticar Uso de Mano de Obra



# Pronosticar Uso de Repuestos



# Programa de Confiabilidad Vivo mediante Recolección de Datos

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



# 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**

# *Optimización en Base a Datos Cuantificados*

## Ejercicio de Selección y Optimización de Tareas de Mantenimiento

# 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.

# Objetivos de Aprendizaje

---

1. Comprender el cálculo para evaluar el costo de Mantenimiento Correctivo.
2. Conocer los pasos para la construcción de una tarea de Mantenimiento Correctivo.
3. Saber calcular el costo de una tarea Preventiva/Predictiva (PM/PdM) eficaz.
4. Conocer los pasos para la construcción de un Preventiva/Predictiva (PM/PdM) optimizado.
5. Saber cuando usted ha encontrado una solución eficaz
6. Reconocer los factores sensibles que influyen las decisiones de mantenimiento tales como el costo de las fallas y el costo de repuestos.

# Mantenimiento Correctivo

---

- 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}
  - 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 = **numero de personas x costo/hora**
    - Costo de Repuesto = **numero de repuestos x costo por unidad**
  - Costo de la Falla = **{tiempo de parada + retraso logístico} x costo unitario por parada + costos de única vez**

# Mantenimiento Correctivo

---

## Ejercicio 1:

- Calcular el Costo de Mantenimiento Correctivo sobre 10,000 horas usando los siguientes datos.
  - Numero de fallas = Tiempo de Vida del Sistema/ MTBF=10,000/2,500 = 4
  - Duración de la tarea=8 horas
  - Costo por hora de trabajo \$100
  - Repuestos = \$5000
  - Costo de tareas operacionales = \$2000
  - Retraso logístico = 0
  - Costo unitario por parada= \$175 / hora
  - Costos de falla de vez única = \$10,000.

# Mantenimiento Correctivo

---

*Hoja de Cálculo*

# Mantenimiento Correctivo

---

## Respuesta Ejercicio 1:

- **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}**

Respuesta

$$= 4 \times \{(8 \times \$100/\text{hr} + \$5000 + \$2000) + (8 \times \$175/\text{hr} + \$10,000)\}$$

$$= \mathbf{\$76,800}$$

# Mantenimiento Preventivo

---

- Mantenimiento Preventivo = {Número de tareas completadas x Costo de la tarea PM} + Costo de fallas
  - Numero 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 = numero de fallas x costo por parada + costo de vez única.

# Mantenimiento Preventivo

---

## Ejercicio 2:

- Calcular el costo total sobre 10,000 hrs. usando datos de PM adicionales.
  - Intervalo de PM = 1650 horas
  - Duración de tarea PM = 6 horas
  - Repuestos \$5000
  - Costo operacional \$2000
  - El costo de la falla supone que el PM es efectivo en restaurar la vida

# Mantenimiento Preventivo

---

*Hoja de Cálculo*

# Mantenimiento Preventivo

---

## Respuesta Ejercicio 2:

- $6 \times (6 \times \$100 + \$5000 + \$2000) + 0 = \mathbf{\$45,600}$ 
  - 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

# Mantenimiento Preventivo

---

## Ejercicio 3:

- Intente el mismo ejemplo con un intervalo PM de 4,900 horas.
  - Calcular el costo total sobre 10,000 hrs usando datos de PM adicionales.
  - Intervalo de PM = 4,900horas
  - Duración de tarea PM = 6 horas
  - Repuestos \$5000
  - Costo operacional \$2000
  - El costo de la falla supone que el PM es efectivo en restaurar la vida

# Mantenimiento Preventivo

---

*Hoja de Cálculo*

# Mantenimiento Preventivo

---

## Respuesta Ejercicio 3:

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

- Numero 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 = **\$76,800**

# 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.

# Mantenimiento Predictivo

---

## Ejercicio 4:

- Calcular el costo total sobre 10,000 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:**
    - Repuesto \$5000
    - Costo operacional \$2000

# Mantenimiento Predictivo

---

*Hoja de Cálculo*

# Mantenimiento Predictivo

## Respuesta Ejercicio 4:

- Numero de reemplazos:
  - MTBF = 2500 horas
  - Tarea PdM @ 500 horas con
  - PF = 750 horas
  - Atraparemos las fallas @ 2000 horas
  - Entonces  $10,000 \text{ horas} / 2000 \text{ horas} = 5$  reemplazos
- Numero de PdM's:
  - $10,000 \text{ horas} / 500 \text{ horas} = 20$  PdM's
  - Costo de falla para un CbM efectivo = cero
- Costo Total = Reemplazo + Costo PdM
  - $5 \times \$7,600 / \text{reemplazo} + 20 \text{ PdM's} [0.5 \text{ horas} \times \$100 / \text{hora}]$
  - Costo Total = **\$39,000**

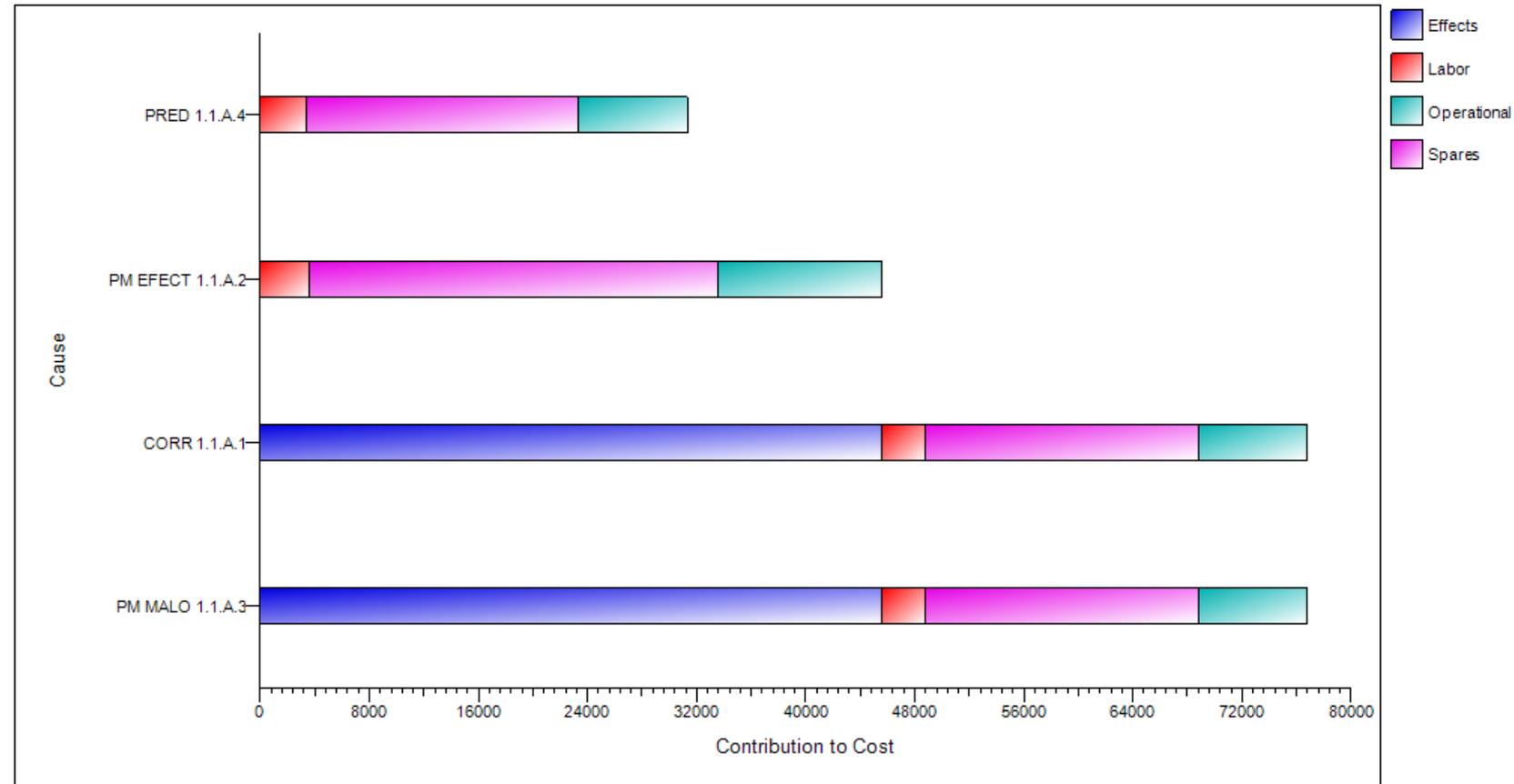
# Discusión Mantenimiento Predictivo

---

- 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 esta 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

# Resumen – Tareas de Mantenimiento

Estrategia	Costo Total
Correctiva (CM)	\$76,800
Preventiva (PM) Efectiva (1650 hr)	\$45,600
Preventiva (PM) Inefectiva (4900 hr)	\$76,800
Predictivo (PdM)	\$39,000





## **Eduardo Cote**

*Gerente Ingeniería - Latino América - ARMS Reliability*  
*eduardo.cote@bakerhughes.com*

***SI TIENES PREGUNTAS O  
COMENTARIOS***

**¡No dudes en acercarte!**



CONGRESO DE  
MANTENIMIENTO  
& CONFIABILIDAD  
M É X I C O

**16**  
EDICIÓN



# iGRACIAS!

*Preparado por:*

**Santiago Sotuyo**

santiago.sotuyo@bakerhughes.com

*Presentado por:*

**Eduardo Cote**

eduardo.cote@bakerhughes.com