

Gestión del Mantenimiento

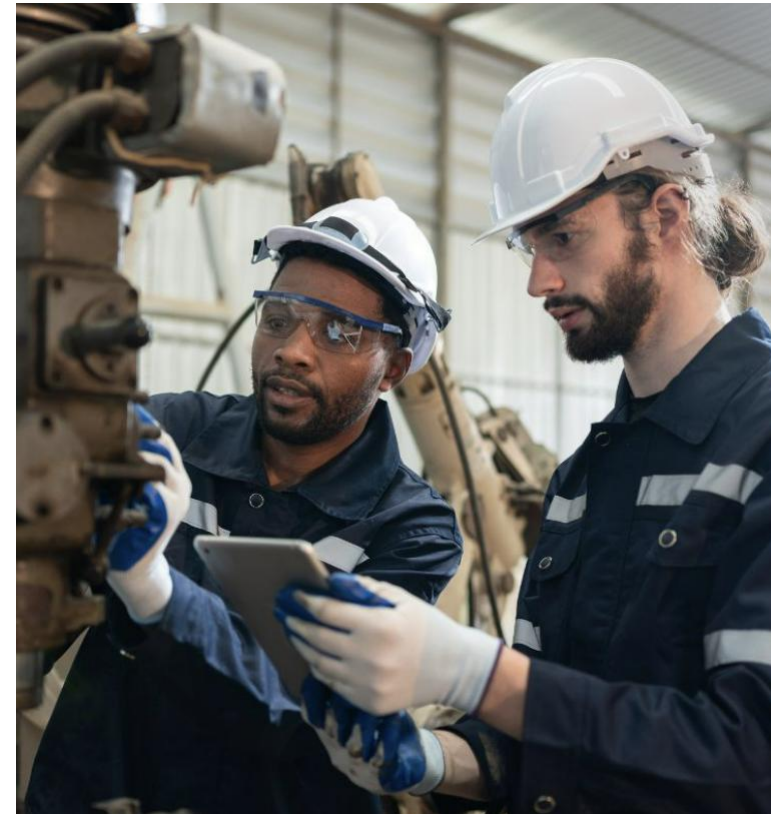
Cátedra: ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES

Septiembre 2026

Ing. Francisco Brusadin - Ing. Duilio Benaroya

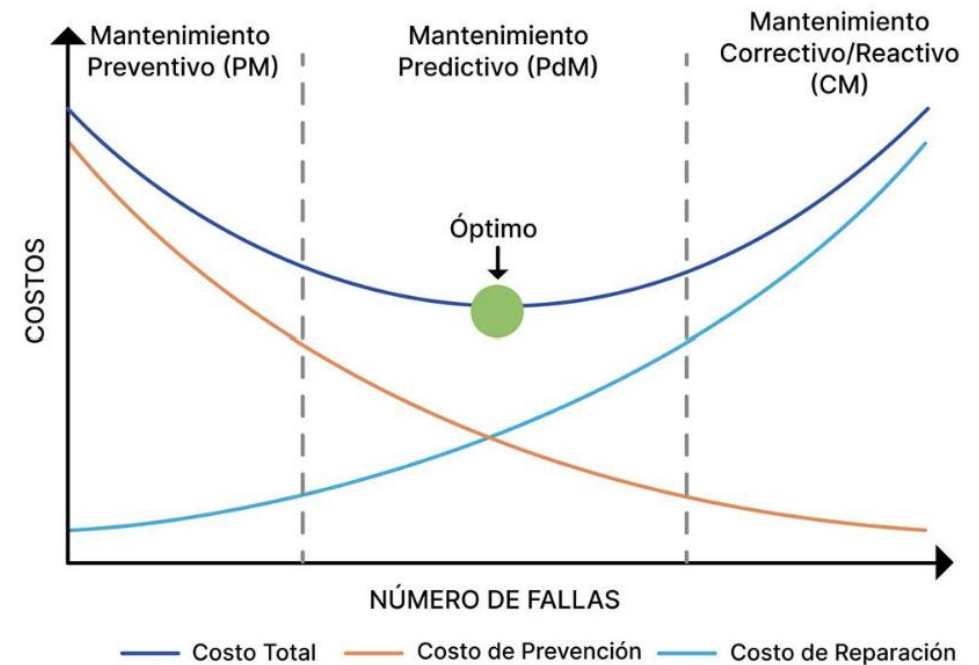
Mantenimiento

*"**Combinación** de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión, realizadas **durante el ciclo de vida de un elemento**, destinadas a conservarlo o a **devolverlo a un estado** en el que pueda **desempeñar la función requerida.**" (Norma EN 13306)*



Gestión del Mantenimiento

*"Todas las actividades de la gestión que **determinan los objetivos, la estrategia y las responsabilidades** respecto del mantenimiento, y que los llevan a la práctica por medios tales como la **planificación, el control y la supervisión del mantenimiento**, la mejora de los métodos en la organización, incluyendo los **aspectos económicos**." (Norma EN 13306)*



Confiabilidad Operacional

*"Una serie de **procesos de mejora continua**, que incorporan en forma **sistémica**, avanzadas herramientas de **diagnóstico**, **estrategias modernas** y **metodologías de análisis**, para **optimizar** la gestión, planeación, ejecución y control de la producción industrial." (José Durán, 2000, retomado por García Palencia)*



Fuente: Adaptada de The Woodhouse Partnership Ltda. 2000.

Los límites de la Confiabilidad Operacional: la evidencia de Moore

Ron Moore aporta evidencia empírica en el artículo "*¿Gestión de Activos? O Más Bien, ¿Gestión del Mantenimiento, Con Otro Nombre?*" (Reliabilityweb):

→ El 66% de las pérdidas de producción de una planta **NO** tiene relación con fallas de equipos, sino con ineficiencias de proceso: cambios de producto, falta de materia prima, errores de planificación, problemas de calidad, fluctuaciones de la demanda.

→ Del 33% restante vinculado a fallas de equipos, aproximadamente **dos tercios** son provocados por **prácticas operativas deficientes**: arranques y paradas mal ejecutados, operación fuera de la ventana de diseño, falta de cuidados básicos del operador.

→→ El departamento de mantenimiento controla de forma directa apenas alrededor del 10% de las pérdidas totales de producción de una planta.

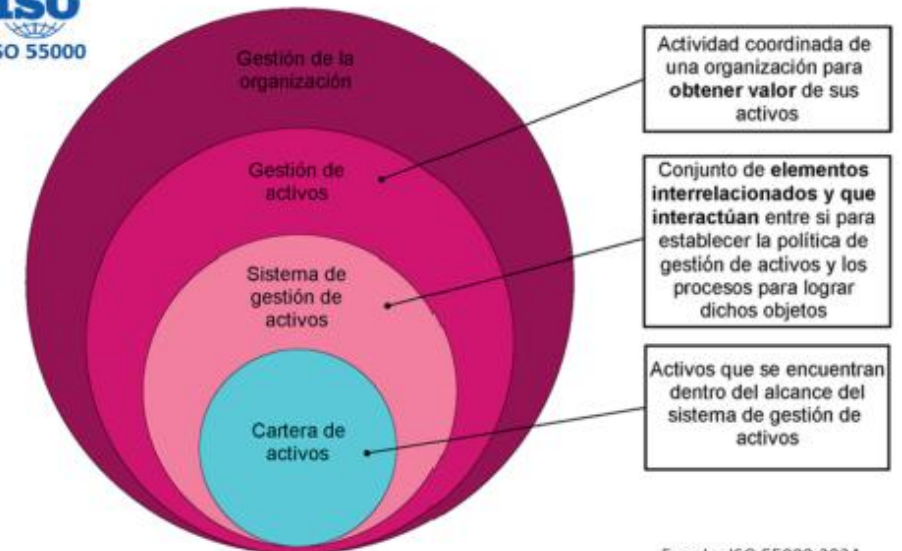


Gestión de Activos

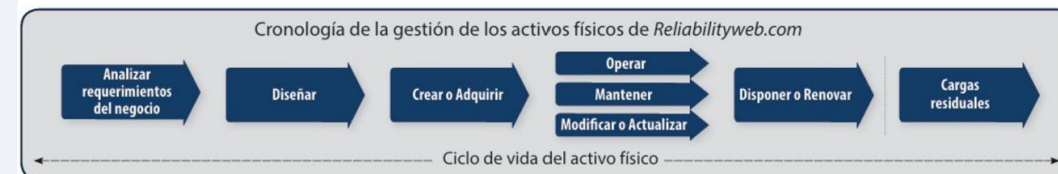
*"La actividad **coordinada** de una organización para generar **valor** a partir de sus **activos**." (ISO 55000).*

*El "**valor**" se ata a un equilibrio explícito **entre costo, riesgo y desempeño** → no "el máximo de confiabilidad posible", sino "la confiabilidad que el negocio necesita, al costo y riesgo que el negocio está dispuesto a aceptar".*

Involucra (a todos) a la dirección ejecutiva, compras, operaciones, finanzas, recursos humanos e ingeniería; el mantenimiento es una función clave pero subordinada y articulada con la estrategia de negocio.



Fuente: ISO 55000:2024

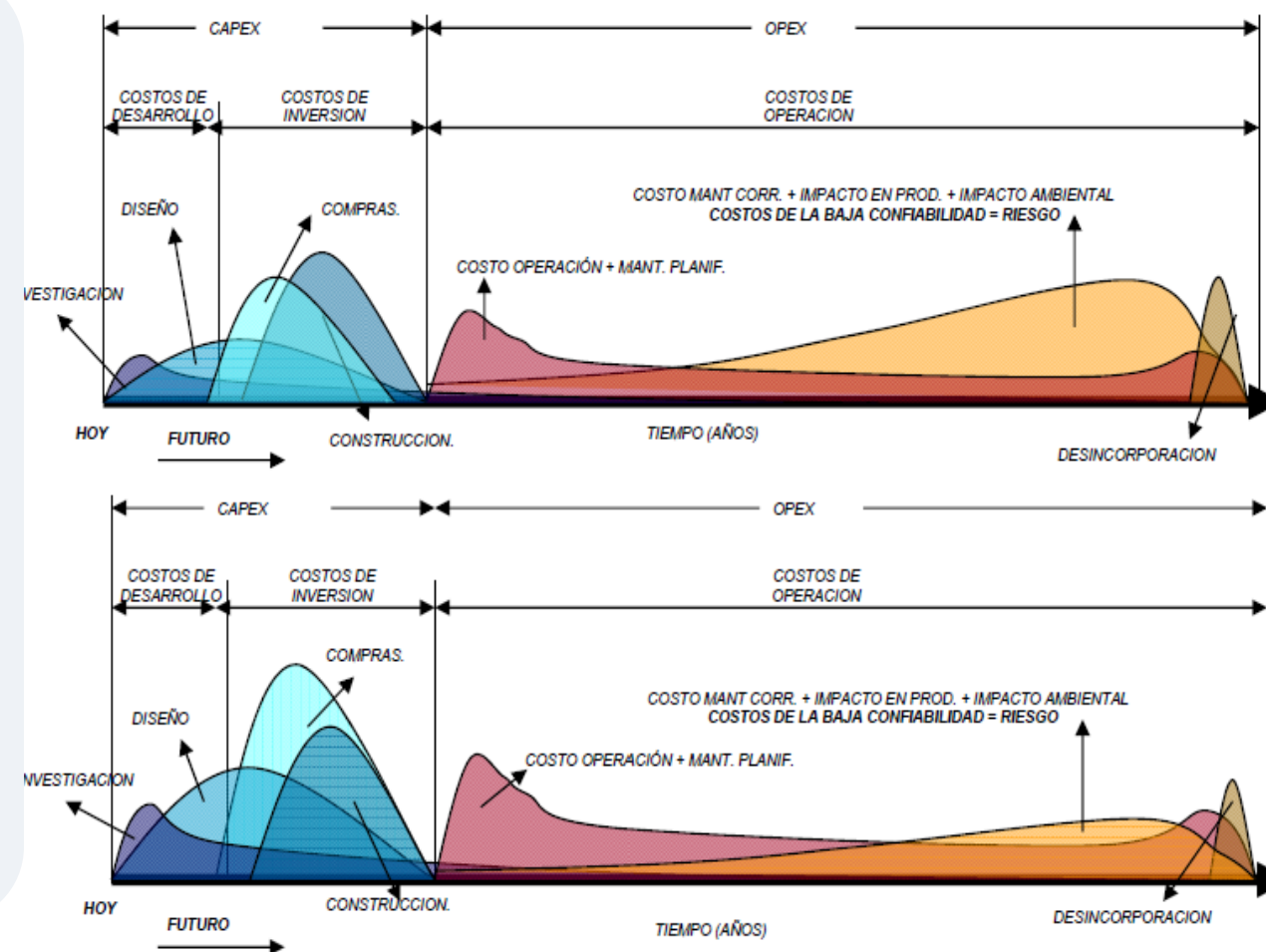


Gestión de Activos

Costo de Ciclo de Vida (LCC)

El ciclo de vida no arranca cuando el activo entra en operación: "va desde la concepción del proyecto, pasando por su operación, hasta el desmantelamiento al término de su vida útil"

Los costos asociados a la gestión de activos pueden superar el 30% de los costos de producción en empresas intensivas en capital fijo, cifra que no incluye los costos por improductividad, no calidad o lucro cesante, capaces de duplicar ese monto (Adolfo Arata).



Ingeniería de Confiabilidad

El marco teórico en el cual conviven las metodologías y técnicas necesarias para optimizar el uso de los activos fijos." (García Palencia) — descrita por Arata como "el brazo armado del modelo de la Confiabilidad Operacional".



Decidir qué hacer, a partir del análisis de datos históricos y la identificación de componentes críticos.

Evolución del Mantenimiento



Ingeniería de la confiabilidad → es el instrumental técnico que atraviesa transversalmente todas las etapas anteriores, aportando rigor cuantitativo para decidir con datos y no solo con intuición.

RCM

Diagnóstico

TPM

Predicción de fallas

RBI

Confiabilidad

LCC

Confiabilidad

Tasa de Falla

Disponibilidad

Weibull

Mantenibilidad

Costos-Riesgo

Misión del Mantenimiento

*“Preservar las funciones principales de todos los activos de la compañía, a lo largo de su **ciclo de vida**, a satisfacción de los propietarios, los usuarios, los clientes y la sociedad; seleccionando e **implementando las mejores prácticas para enfrentar las fallas y mitigar sus consecuencias**; con el compromiso efectivo de todas las personas de la organización, **debidamente formadas**, para desarrollar sus funciones en la búsqueda permanente de la **Excelencia Operacional**”*



Definición de Contexto Operativo

El **Contexto Operativo** es el conjunto de circunstancias, parámetros y entorno bajo los cuales opera un activo. La forma en que se opera, el ambiente, las exigencias del proceso y las consecuencias del fallo determinan cómo debe cuidarse y mantenerse cada activo (**Estrategia de Mantenimiento**).



Definición de Falla

Falla (Funcional): Pérdida de capacidad, total o parcial, de un ítem mantenible para satisfacer un nivel de operación establecido por la función.



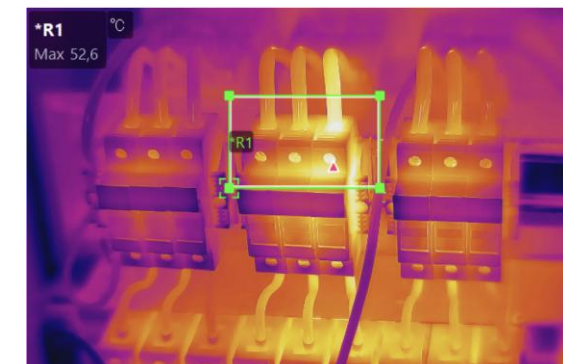
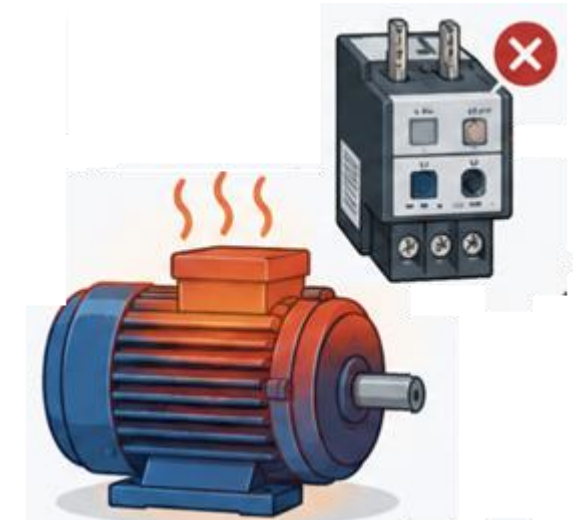
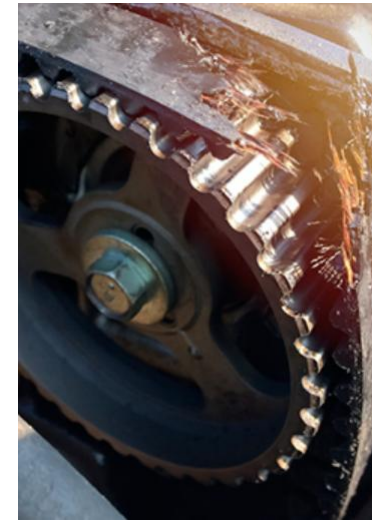
Función: Bombear crudo desde 10,000 hasta 12,000 BPD, con una presión de succión mayor a 0.8 Kg/cm² y presión de descarga menor a 50 Kg/cm². Cero gas en la carcasa de la bomba y temperatura en carcasa menor a 65°C. Cero fuga de crudo. Luz entre anillos de desgaste e impulsor en el rango de 0.018" a 0.022" en la bomba de crudo. Vibración radial lado libre y lado cople menor a 0.500"/seg

Esta máquina ha fallado si:

- Se detiene por completo (Falla Funcional Total)
- Bombea por debajo de 10,000 BPD (Falla Funcional Parcial)
- Luz entre anillos de desgaste e impulsor en el rango es MAYOR a 0,022"
- Vibración radial lado libre y lado cople mayor a 0.500"/seg

Definición Tipos de Falla

- **Falla Funcional (u operacional):** el componente deja de satisfacer completamente la función requerida por uno o más modos de falla (ej.: rotura del eje de un transportador).
- **Falla Simultánea:** en sistemas con redundancias o protecciones, ocurre cuando falla el equipo cargado/solicitado mientras la protección o redundancia también está en falla (no disponible).
- **Falla Sintomática o Potencial:** condición de estado verificable (defecto o desviación incipiente) que indica que una falla funcional está en proceso de ocurrencia; puede ser reversible o irreversible.
- **Falla Recurrente (o crónica):** fallas funcionales repetitivas fuera de la frecuencia de ocurrencia aceptable, causadas por un mismo modo de falla o por varios actuando simultáneamente.



Definición Modo de Falla

Modo de Falla: es cualquier evento que causa una falla funcional de un activo físico (o sistema o proceso). Se deben identificar los más probables (aquellos que ocurrieron antes, los que son parte del programa de mantenimiento, otros que no han ocurrido pero son posibles). Además hay que identificar los que no son probables, pero en el caso de ocurrir sus consecuencias son graves.



Sistema / Equipo	Función	Falla Funcional	Modo de Falla
Bomba de Crudo	Bombear crudo desde 10,000 hasta 12,000 BPD	Pérdida parcial de capacidad (Caudal < 10,000 BPD)	Álabes y superficies de sellado del impulsor (anillos de desgaste) erosionados

Definición Falla / Modo de Falla

Falla

La luz de alarma no indica en el tablero de control.

El soplador impulsa menos de 45m³/h de aire, que es lo requerido por la operación.

El caudal de la bomba de agua es menor a 20m³/hr necesarios para llenar el tanque.

El eje transmite la potencia con un valor de vibración en velocidad mayor a 10mm/seg

La viscosidad del aceite esta por debajo de 15cSt El reductor no contiene aceite completamente

Modo de Falla

Lámpara del tablero quemada.

Daños y fugas en el conducto de acometida a la operación.

Rotor de bomba desgastado

Eje desbalanceado

Aceite contaminado con combustible

Rotura del reten debido a golpes durante el montaje

Definición Causa

Causa de la Falla : Circunstancias durante el diseño, la fabricación o el uso, las cuales han conducido a una falla.

Mecanismos de falla: Son los procesos físicos-químicos que conducen a la falla del componente/equipo (corrosión, erosión, fatiga, desgaste).



Sistema / Equipo	Función	Falla Funcional	Modo de Falla	Causa
Bomba de Crudo	Bombear crudo desde 10,000 hasta 12,000 BPD	Pérdida parcial de capacidad (Caudal < 10,000 BPD)	Álabes y superficies de sellado del impulsor (anillos de desgaste) erosionados	Presencia excesiva de sólidos abrasivos (arena) en el crudo por falla en filtros de pozo aguas arriba

Definición Efectos y Consecuencias

Efecto: Los efectos de las fallas, es la descripción de los eventos secuenciales que suceden, desde que se origina la falla del componente o equipo y los posteriores hechos secuenciales hasta que se pierde total o parcialmente las funciones del activo que se esta analizando.

Consecuencias: Las consecuencias de una falla es determinada mediante la evaluación de los efectos ocasionados al equipo y su entorno. Las consecuencias se clasifican de según su impacto en: **Seguridad y MA, Operacionales, fallas ocultas y no operacionales.**



Sistema / Equipo	Función	Falla Funcional	Modo de Falla	Causa	Efecto de la Falla	Consecuencia
Bomba de Crudo	Bombear crudo desde 10,000 hasta 12,000 BPD	Pérdida parcial de capacidad (Caudal < 10,000 BPD)	Álabes y superficies de sellado del impulsor (anillos de desgaste) erosionados	Presencia excesiva de sólidos abrasivos (arena) en el crudo por falla en filtros de pozo aguas arriba	Recirculación interna de flujo, pérdida de eficiencia volumétrica y caída en el volumen de venta comprometido.	Operacionales

Confiabilidad de los Activos

El concepto de Confiabilidad: probabilidad de que un componente, equipo o sistema se desempeñará satisfactoriamente, bajo condiciones específicas de operación, durante un **período de tiempo definido**.

La *confiabilidad* como **cultura de calidad**, busca que todas las actividades de producción y en general todas las tareas se desarrollen bien desde la primera vez y por siempre.

La *confiabilidad* se relaciona básicamente con **la tasa de fallas** (cantidad de fallas en un periodo de tiempo) y con **el tiempo medio de operación (MTTF)**, o el **tiempo promedio entre fallas (MTBF)**.



Confiabilidad es una **garantía de funcionamiento y calidad a lo largo del tiempo**

Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial

Tiempo Medio entre Fallas (MTBF): El Tiempo Promedio Entre Fallos indica el intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de un fallo; es decir, es el tiempo medio transcurrido hasta la llegada del evento “fallo”. Mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del componente o equipo.

$$MTBF = \frac{T_0 - T_{np}}{C_f}$$

$$MTBF = \frac{(T_0 \cdot n) - \sum_{i=1}^n T_{np(i)}}{\sum_{i=1}^n C_{f(i)}}$$

T_0 = Tiempo establecido para operar

T_{np} = Tiempo por paradas no programadas

C_f = Número total de fallas detectadas durante el período de operación

n = cantidad de ítems independientes

Unidades reparables



Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial

Tiempo Medio para la Falla (MTTF): Es utilizado cuando un componente se sustituye ante la falla. Indica en promedio con qué frecuencia se producirá la falla del componente.

Para una población estadística de unidades en funcionamiento (con reposición luego de cada falla) puede expresarse como:

$$MTTF = \frac{T_0 \cdot n}{\sum_{i=1}^n C_{f(i)}}$$

T_0 = Tiempo de operación considerado para el análisis

C_f = Número de fallas ocurridas para cada unidad activa durante el tiempo T_0

n = cantidad de unidades activas

Unidades NOreparables



Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial

Tasa de fallas (λ): Es un índice de confiabilidad que representa la tasa a la que un componente o equipo falla.

20 unidades idénticas se ponen a prueba durante 1000 horas, en sus condiciones de operación normal. Si 6 de ellas fallan a las siguientes horas de funcionamiento: 550, 440, 680, 790, 860, 620; ¿cuál es la tasa de fallas? ¿Y el tiempo promedio para la falla?

$$\lambda = \frac{C_f}{T_o} = \frac{1}{MTTF} = \text{Fallas por unidad de tiempo}$$

C_f = Número de fallas ocurridas

T_o = Tiempo de operación

$$\lambda = \frac{6}{550+440+680+790+860+620+(14 \times 1000)}$$

$$\lambda = \frac{6}{17980} = 0,000334 \text{ Fallas por hora}$$

$$MTTF = \frac{17980}{6} = 2996 \text{ horas hasta la falla}$$

Confiabilidad de los Activos

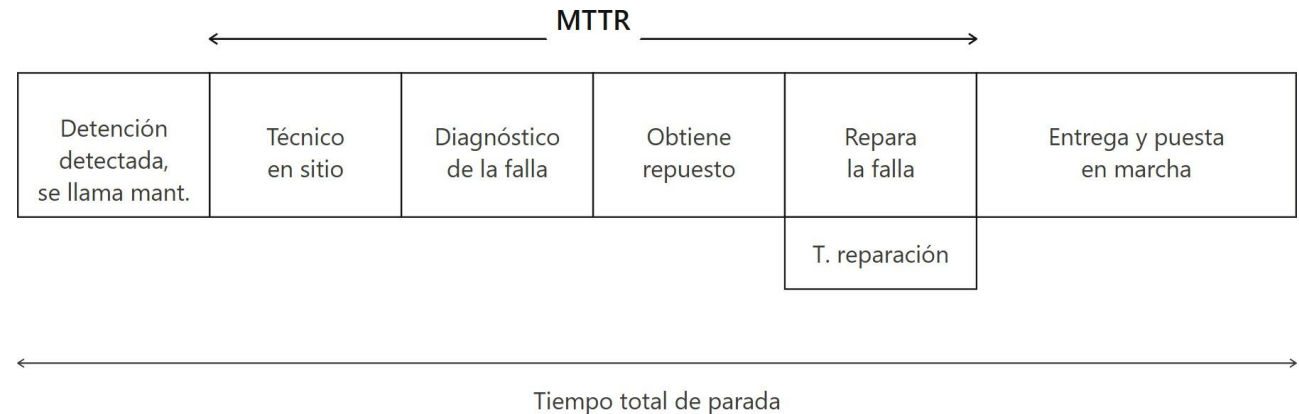
Índices de Clase Mundial

Tiempo Medio para Reparación (MTTR): Mide la efectividad para restituir un equipo a condiciones óptimas de operación, luego de haber quedado fuera de servicio por un fallo, dentro de un período de tiempo determinado. Se asocia a la **MANTENIBILIDAD**.

$$MTTR = \frac{T_{tr}}{C_r} \quad \varepsilon = \frac{1}{MTTR} \quad (\text{Tasa de reparación})$$

T_{tr} = Tiempo total de intervenciones por restauración

C_r = Número total de reparaciones



Nota 1: Es aplicable a un conjunto de ítems cuyas características sean similares y cuando se trata de la misma reparación.

Nota 2: Debe aplicarse a equipos cuyo tiempo de reparación es significativo con respecto al tiempo de operación.

Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial

La *Confiabilidad de diseño* se asocia directamente con la **Mantenibilidad** de los Equipos.

La norma MIL-STD-721B 1996 de USA, define la **Mantenibilidad** como la **característica de diseño e instalación de un equipo o sistema**, expresada como la probabilidad de que un elemento sea recuperado a su condición especificada de diseño, durante un período de tiempo empleado en su mantenimiento, cuando éste se realiza **de acuerdo con procedimientos y recursos preestablecidos**.

El parámetro fundamental para determinar la Mantenibilidad lo constituye el tiempo medio de reparación de las fallas (MTTR).

Diagnóstico

Identificar correctamente la causa de la falla en el menor tiempo posible, según la complejidad del sistema.



Reparación

Ejecutar la intervención y restituir el ítem a su condición operativa estándar de forma exitosa.

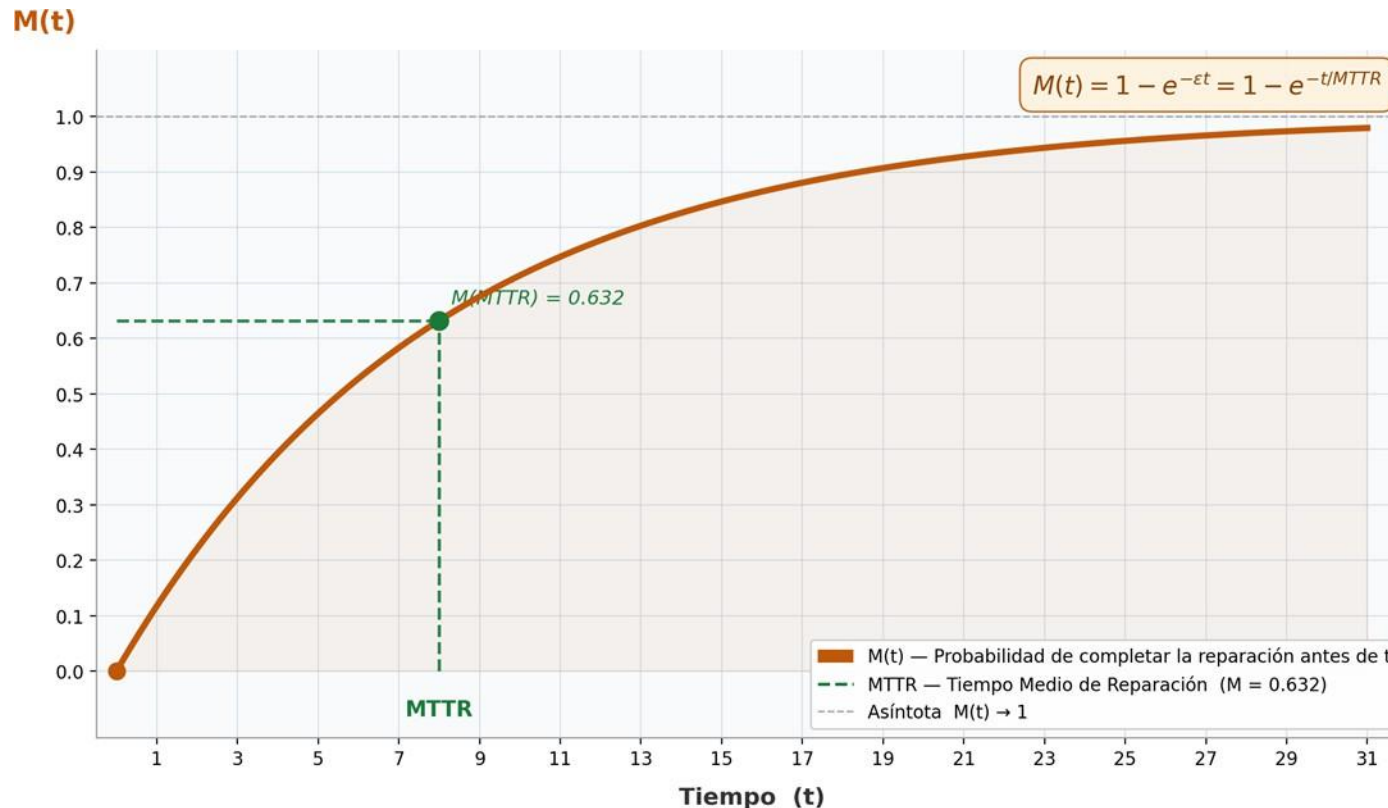


Tiempo t

La variable aleatoria central: el tiempo de reparación es estocástico — varía según el modo de falla y las condiciones.

Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial



$$M(t) = 1 - e^{-\int_0^t \varepsilon(t) dt} = 1 - e^{-(\varepsilon t)}$$

$$M(t) = 1 - e^{-(t/MTTR)}$$

$M(t)$ es la probabilidad de haber **terminado** la reparación antes de un tiempo t

Para equipos con “ n ” componentes, y cada uno de ellos con su tasa de falla λ_i y tiempo medio para reparación t_{ri} :

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \lambda_i t_{ri}}{\sum_{i=1}^n n_i \lambda_i}$$

Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial

Una Planta Industrial que produce bienes de consumo masivo, sufre interrupciones en el suministro de energía eléctrica. En la tabla se muestran los datos disponibles:

Año	Interrupciones	Duración
1	19	26 h 45 m
2	15	18 h 30 m
3	14	13 h 45 m
4	8	6 h 15 m

Calcule la probabilidad de que el sistema sea restituido al funcionamiento en 1, 2 y 3 horas (mantenibilidad).

Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial

Calcule la probabilidad de que el sistema sea restituido al funcionamiento en 1, 2 y 3 horas (mantenibilidad).

Año	Interrupciones	Duración
1	19	26 h 45 m
2	15	18 h 30 m
3	14	13 h 45 m
4	8	6 h 15 m
Total	56	65 h 15 m

$$MTTR = \frac{65,25}{56} = 1,165 \text{ horas}$$

$$\varepsilon = 1/MTTR = 0,8582$$



$$M(t) = 1 - e^{-(0,8582 t)}$$

$$M(1) = 1 - e^{-(0,8582 \times 1)} = 0,5760 = 57,6\%$$

$$M(2) = 1 - e^{-(0,8582 \times 2)} = 0,8203 = 82\%$$

$$M(3) = 1 - e^{-(0,8582 \times 3)} = 0,9238 = 92,38\%$$

Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial - Mantenibilidad

Factores que determinan su aumento

FACTORES INTERNOS

(de diseño)

- Acceso a las partes
- Complejidad técnica (Diseño)
- Manuales claros y completos
- Partes o piezas estandarizadas
- Manejo de componentes (peso, fragilidad)
- Calidad de los materiales de fabricación
- Herramental necesario estandarizado

FACTORES EXTERNOS

(de contexto operacional)

- Disponibilidad de repuestos
- Disponibilidad de mano de obra
- Capacitación de especialistas (Habilidad)
- Herramientas para diagnóstico y reparación
- Capacidad en la programación de tareas
- Limpieza y estado de la máquina
- Historial de averías y procedimientos

Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial - Disponibilidad



Disponibilidad es el porcentaje de tiempo total en que un equipo tiene la capacidad para cumplir la **función requerida**, en un instante de **tiempo** determinado y bajo condiciones dadas (**contexto**).

La combinación apropiada de Mantenibilidad y Confiabilidad es garantía del sostenimiento de la Disponibilidad.

Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial - Disponibilidad

Disponibilidad Operacional: Es el porcentaje de tiempo en que el equipo, conjunto de equipos o línea de producción, estuvo disponible para el proceso de operación en las condiciones de seguridad y calidad establecidas.

$$D_o = \frac{(T_o - T_{np})}{T_o} \times 100$$

T_o = Tiempo establecido para opearar

T_{np} = Tiempo de paradas no programadas

$$D_o = [MTBF / (MTBF + MTTR)]$$

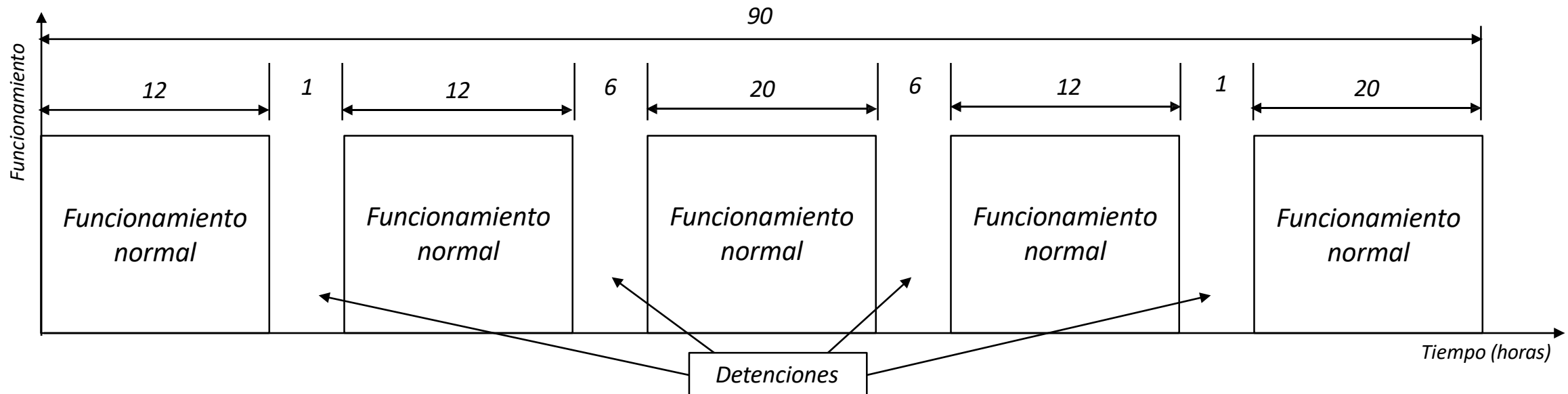
Nota 1: aplicable a equipos que se reparan luego de la detención, considerando un tiempo suficientemente grande en comparacion con el resto de las variables.

Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial - Disponibilidad

Disponibilidad Operacional: Es el porcentaje de tiempo en que el equipo, conjunto de equipos o línea de producción, estuvo disponible para el proceso de operación en las condiciones de seguridad y calidad establecidas.

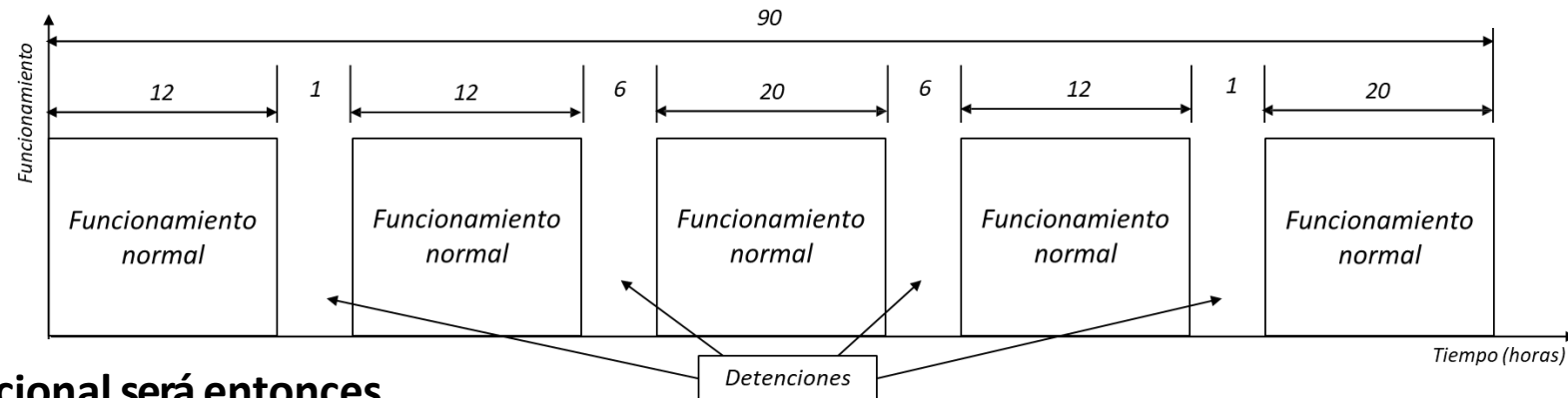
Supongamos que un equipo tuvo un desempeño de funcionamiento en el que a lo largo de 90 horas sufrió 4 detenciones que involucraron un tiempo total por paradas no programadas de 14 horas. El tiempo de funcionamiento neto resultó 76 horas. Calcular el MTBF, MTTR y Disponibilidad



Fuente: Manual de mantenimiento: ingeniería, gestión y organización. Pistarelli A., 2010.

Confiabilidad de los Activos

Índices de Clase Mundial - Disponibilidad



La disponibilidad operacional será entonces

$$D_o = \frac{90 - 14}{90} \times 100 = 84,44\%$$

Siendo que se trata de un sistema que se repara cuando falla, el MTBF será:

$$MTBF = \frac{90 - 14}{4} = 19 \text{ horas}$$

$$MTTR = \frac{14}{4} = 3,5 \text{ horas}$$

Luego, otra forma equivalente de calcular la disponibilidad será:

$$D_o = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)} = \frac{19}{(19 + 3,5)} = 84,44\%$$

Confiabilidad de los Activos

Leyes de distribución de probabilidad

Distribuciones continuas

Define las probabilidades de los posibles valores de una variable aleatoria continua — aquella con un conjunto de valores posibles infinito y no numerable.

Modela cuándo ocurre la falla.

Ejemplos en confiabilidad

Exponencial · Normal · Weibull

Continuas → el tiempo

¿Cuántas horas opera un equipo antes de fallar?

Base del cálculo de confiabilidad, MTBF y vida útil.

Ej: tiempo hasta la falla de un rodamiento

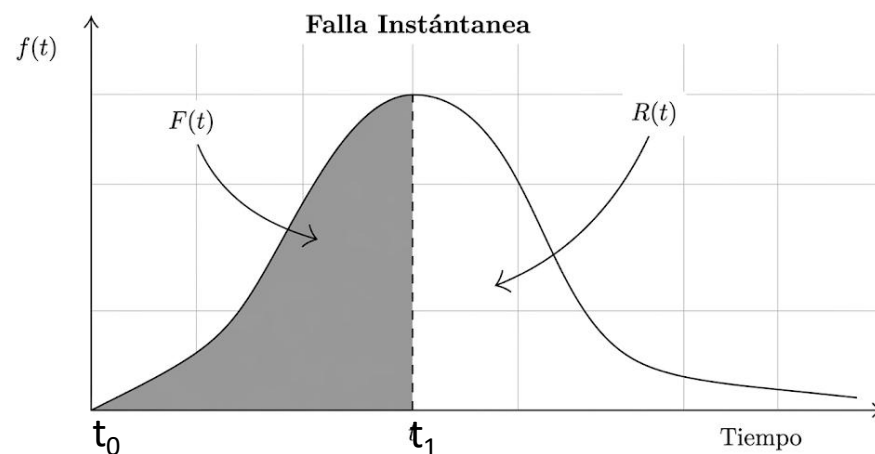
Ambas permiten pasar de la intuición al cálculo —y del cálculo a decisiones de mantenimiento proactivas.

Confiabilidad de los Activos

Leyes de distribución de probabilidad

Función de densidad probabilista de falla: Considerando la variable aleatoria tiempo (t), pueden representarse las fallas que le suceden a un equipo en un instante t cualquiera. La función de densidad acumulada $F(t)$ es la probabilidad acumulada en un intervalo $(t_0; t_1)$, y es equivalente al área bajo la curva $f(t)$ en ese intervalo.

$f(t)$ = Función de falla o función de densidad de falla



$$F(t) = \int_{t_0}^{t_1} f(t) dt \quad \text{Probabilidad de falla o Inconfiabilidad}$$

$$C(t) = 1 - F(t) \quad \text{Probabilidad de no falla o Confiabilidad}$$

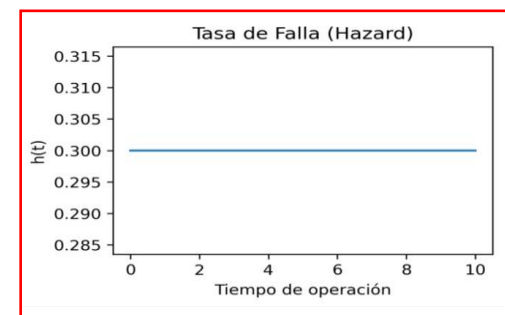
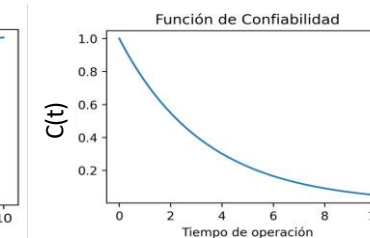
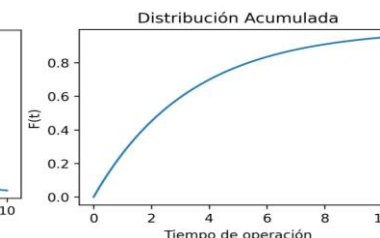
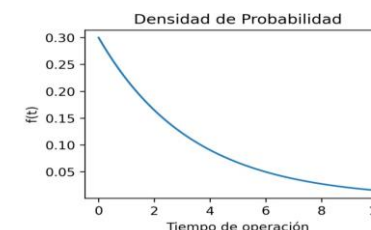
$$MTBF = E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} C(t) dt$$

Confiabilidad de los Activos

Leyes de distribución de probabilidad

Ley de distribución Exponencial

- Ley Exponencial: tasa de fallas λ constante en el tiempo.
- Propiedad "sin memoria": la probabilidad de falla en el próximo intervalo no depende de cuánto lleva funcionando
- Media = Desviación estándar (propiedad característica de esta distribución) $\rightarrow (CV = \sigma/\mu) \approx 1$
- Eso quiere decir que la dispersión de los tiempos de falla es tan grande como el propio promedio: hay muchísima variabilidad, coherente con la propiedad "sin memoria" como la próxima falla no depende de la edad, los tiempos de falla individuales van a estar muy esparcidos alrededor del promedio, sin agruparse cerca de él.



$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (t > 0 \text{ y } \lambda > 0)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$C(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t} = e^{-(t/MTTF)}$$

$$h(t) = \lambda = \frac{f(t)}{C(t)} = \frac{C_f}{T_o} = \frac{1}{MTTF} = cte$$

C_f = Número de fallas ocurridas

T_o = Tiempo de operación

Confiabilidad de los Activos

Leyes de distribución de probabilidad

Ley de distribución Exponencial

20 unidades idénticas se ponen a prueba durante 1000 horas, en sus condiciones de operación normal. Si 6 de ellas fallan a las siguientes horas de funcionamiento: 550, 440, 680, 790, 860, 620; ¿cuál es la confiabilidad para 1200 horas de operación?

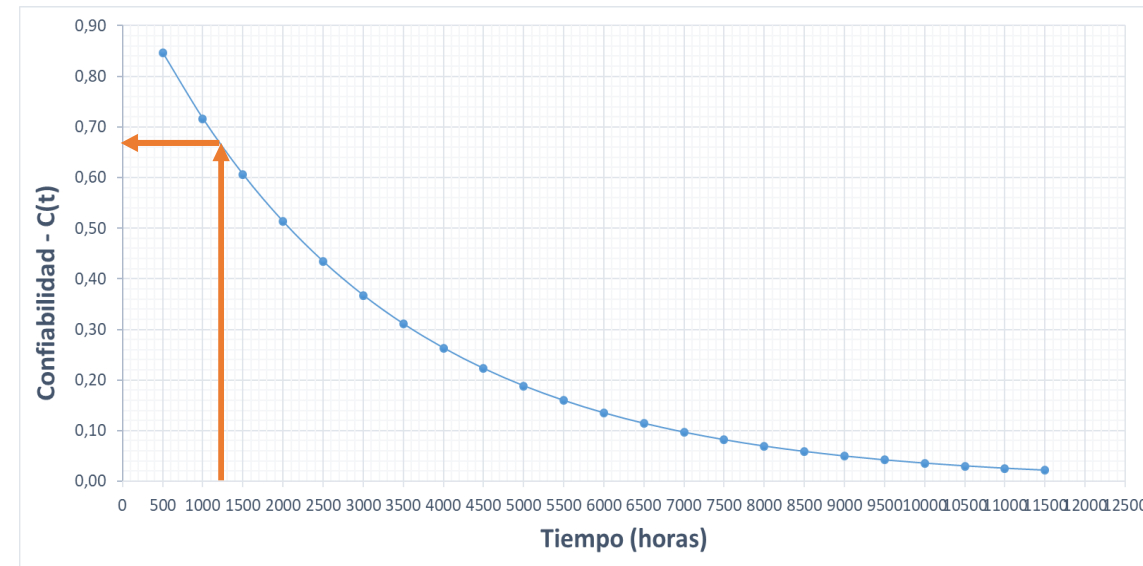
$$\lambda = \frac{6}{550+480+680+790+860+620+(14 \times 1000)}$$

$$\lambda = \frac{6}{17980} = 0,000334 \text{ Fallas por hora}$$

$$MTTF = \frac{17980}{6} = 2996 \text{ horas hasta la falla}$$

$$C(t) = e^{-\lambda t} = e^{-t/MTTF}$$

$$C(1200) = e^{-(1200/2996)} = 0,6699 = 67\%$$



Confiabilidad de los Activos

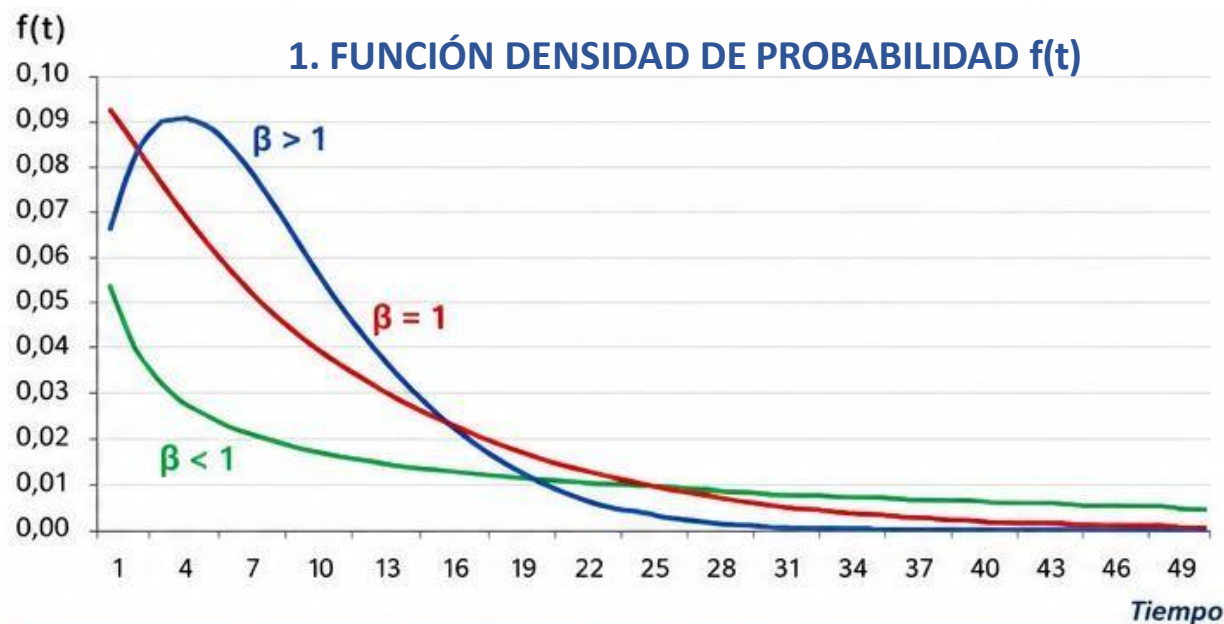
Leyes de distribución de probabilidad

Ley de distribución de Weibull → “Una sola ley, múltiples comportamientos”

$$f(t) = \beta \eta^{-\beta} t^{(\beta-1)} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

$$C(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

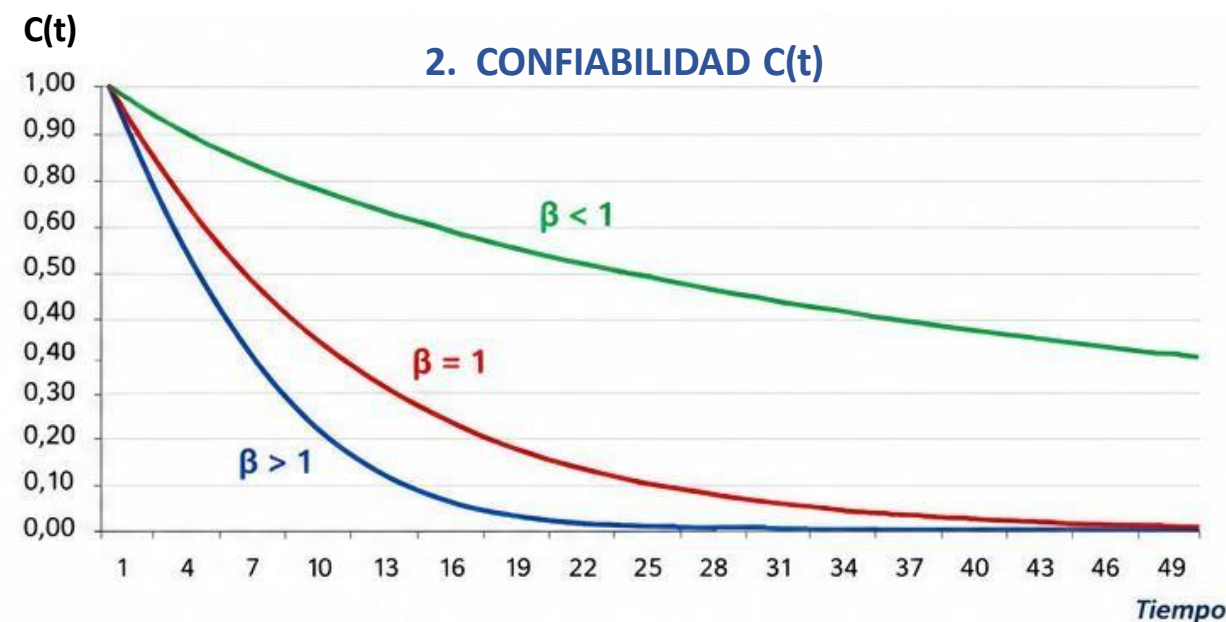
1. FUNCIÓN DENSIDAD DE PROBABILIDAD $f(t)$



Describe cuándo son más probables las fallas.

$\beta < 1$: fallas tempranas | $\beta = 1$: fallas aleatorias | $\beta > 1$: fallas por desgaste

2. CONFIABILIDAD $C(t)$



Probabilidad de que el equipo siga funcionando más allá del tiempo t .

$\beta < 1$: la confiabilidad disminuye lentamente (fallas tempranas).
 $\beta = 1$: disminuye exponencialmente (fallas aleatorias). $\beta > 1$: disminuye rápido (desgaste).

Confiabilidad de los Activos

Leyes de distribución de probabilidad

Ley de distribución de Weibull

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{C(t)} = \beta \eta^{-\beta} (t - \gamma)^{\beta-1}$$

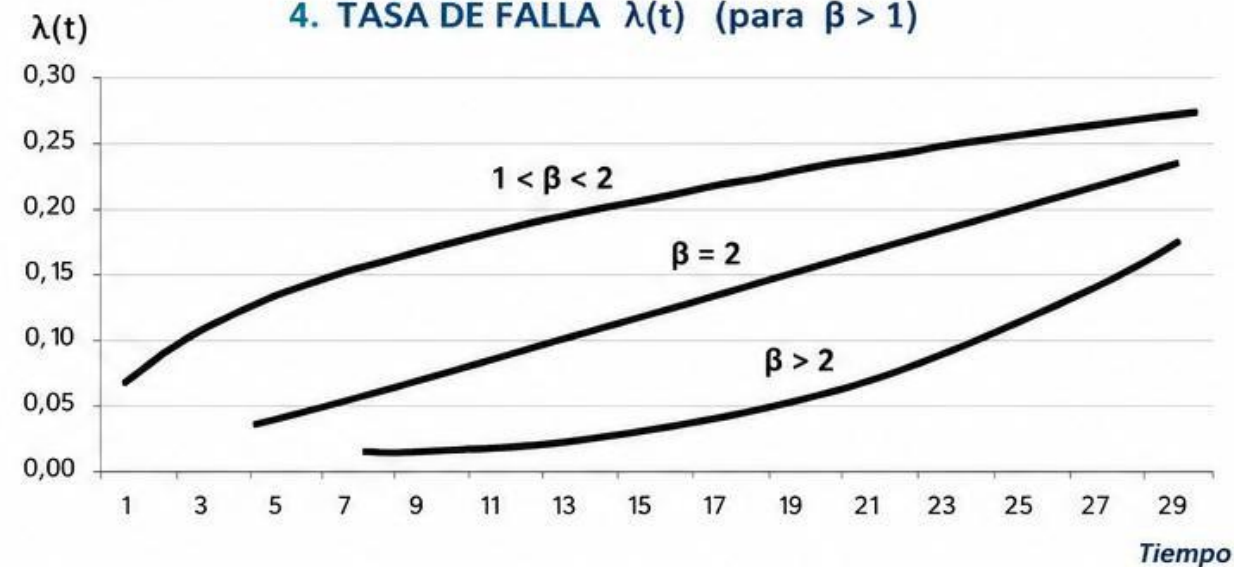
3. TASA DE FALLA $\lambda(t)$



Riesgo instantáneo de falla en el tiempo t .

$\beta < 1$: la tasa de falla disminuye | $\beta = 1$: tasa de falla constante

4. TASA DE FALLA $\lambda(t)$ (para $\beta > 1$)



Para $\beta > 1$ la tasa de falla aumenta con el tiempo.
Cuanto mayor es β , más rápidamente aumenta el riesgo de falla.

Confiabilidad de los Activos

Leyes de distribución de probabilidad

Ley de distribución de Weibull

$$C(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

$\beta \rightarrow$ "parámetro de forma" – describe la forma del tiempo para la falla (mortalidad infantil, aleatoria, desgaste) es la "física" del mecanismo de falla.

$\eta \rightarrow$ "parámetro de escala" – representa la "vida característica" describe la **escala temporal** en la que esa física se manifiesta para una población concreta

$$t=\eta \quad C(\eta) = e^{-\left(\frac{\eta}{\eta}\right)^\beta} = e^{-1} = 0,368 \quad F(\eta) = 1 - 0,368 = 0,632$$

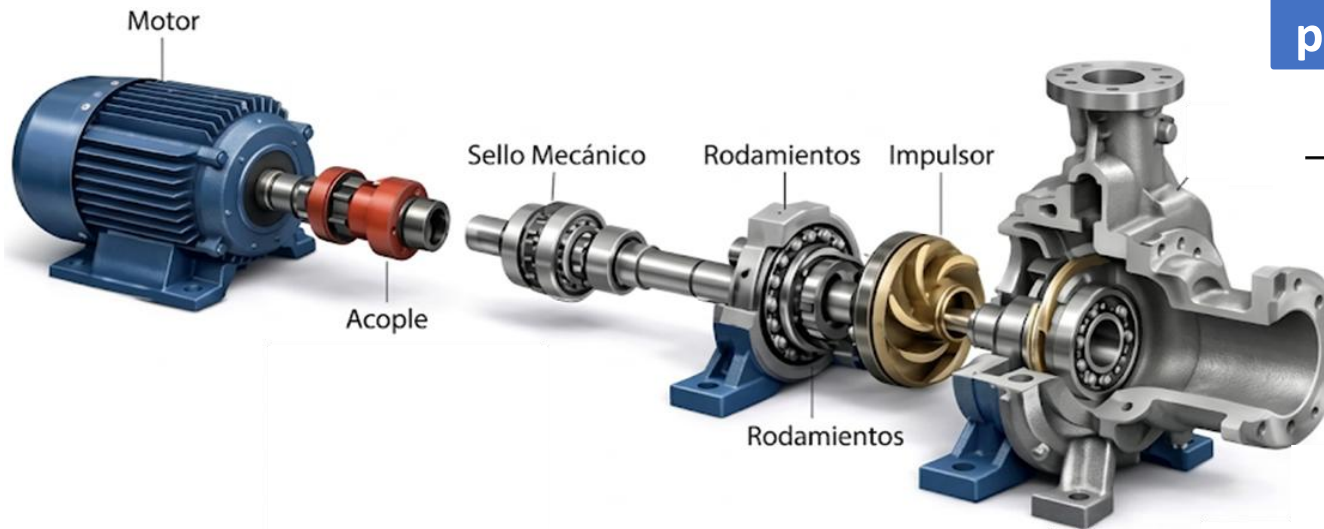
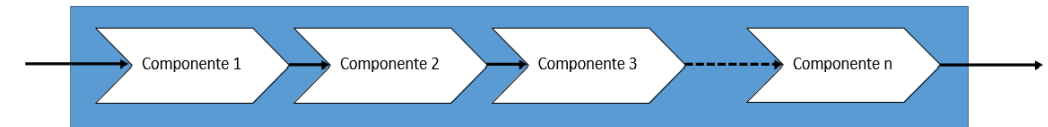
"Cuando el tiempo alcanza η , aproximadamente el 63,2% de la población ya falló"

$\gamma \rightarrow$ "parámetro de posición" – desplaza la distribución sobre el eje del tiempo

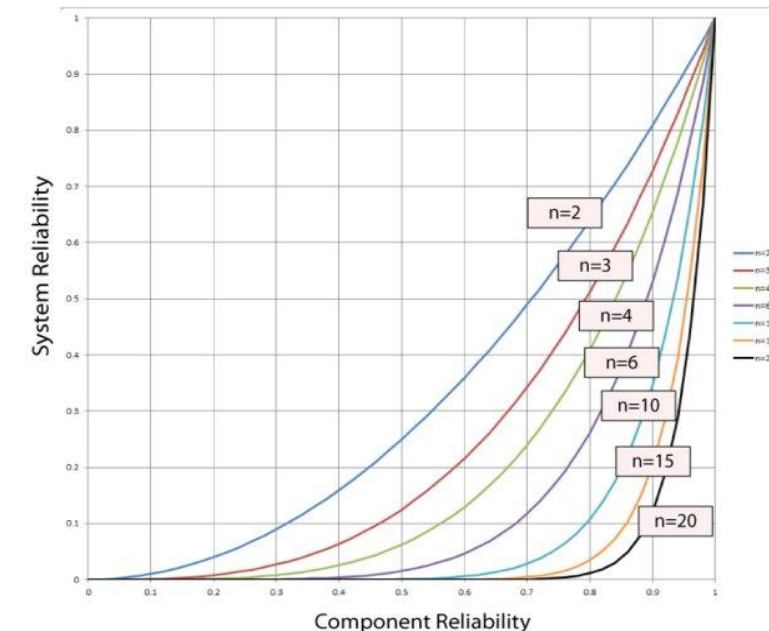
Confiabilidad de los Activos

Sistemas en Serie

El fallo de cualquier elemento de la cadena, provoca la detención del sistema completo.



Series System Reliability vs. Component Reliability
(for different number of components)



$$C(t)_{SIST.} = C_1(t) \times C_2(t) \times C_3(t) \times \dots \times C_n(t) = \prod_{i=1}^n C_i(t)$$

Lógica del eslabón más débil

El producto siempre será menor que el valor más bajo de los factores

Confiabilidad de los Activos

Sistemas en Serie

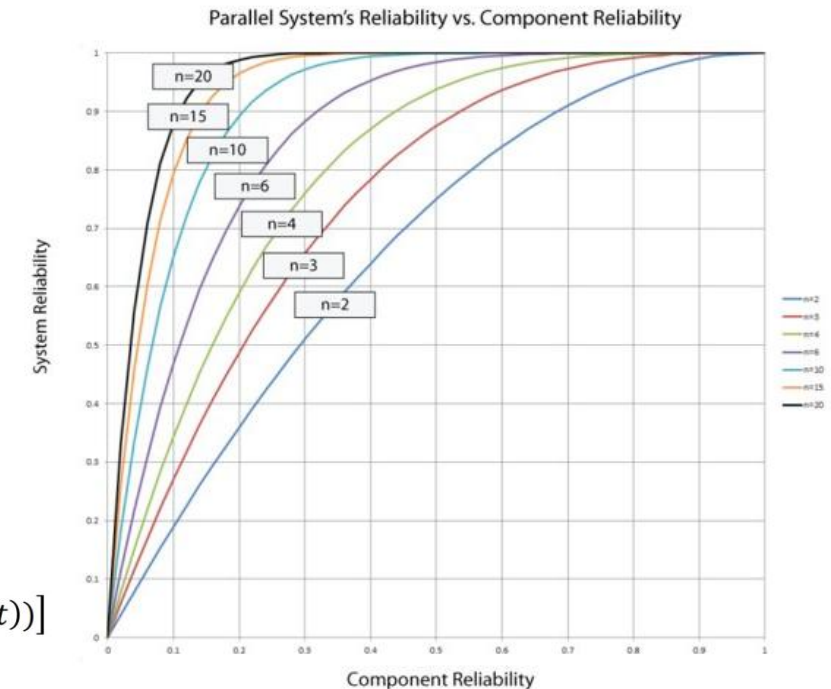
Sea un componente con dos posibles modos de falla (considerar independencia), uno con un MTTF(1) de 8 años y el otro con un MTTF(2) de 25 años. Asumiendo una distribución del tipo exponencial para ambos fallos, calcular la confiabilidad del sistema para los 6 meses de funcionamiento.

$$\lambda_1 = \frac{1}{MTTF_{(1)}} = \frac{1}{8} = 0,125 \text{ fallas/año}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{MTTF_{(2)}} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ fallas/año}$$

$$C(t)_{SIST.} = C_1(t) \times C_2(t) = e^{-\lambda_1 t} \times e^{-\lambda_2 t}$$

$$C(6 \text{ meses})_{SIST.} = e^{-(0,125 \times 0,5)} \times e^{-(0,04 \times 0,5)} = 0,9394 \times 0,9802 = \mathbf{92,08\%}$$



Confiabilidad de los Activos

Sistemas en Paralelo

Cierto motor de combustión interna posee doble sistema de encendido. El mismo cuenta con dos circuitos independientes capaces de entregar a todos los cilindros, la energía suficiente para la combustión. Se sabe que cada uno de los circuitos tiene una tasa de fallas de 1×10^{-4} f/h. Calcular la confiabilidad del sistema de encendido para cuando hayan transcurrido 1000 horas de funcionamiento. Asumir distribución exponencial.

$$C(t)_{SIST.} = 1 - \left[(1 - C_1(t)) \times (1 - C_2(t)) \right] = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2$$

$$C(1000)_{SIST.} = 1 - (1 - e^{-(0,0001 \times 1000)})^2 = 1 - (1 - 0,9048)^2 = \mathbf{99,09\%}$$

Confiabilidad de los Activos

Tasa de Falla

Tasa de fallas (λ): Dada una pieza que funcionó satisfactoriamente hasta un tiempo t , la tasa de fallas (o función de riesgo) es la probabilidad condicional de que ésta sufra un fallo en un instante de tiempo siguiente ($t+\Delta t$)

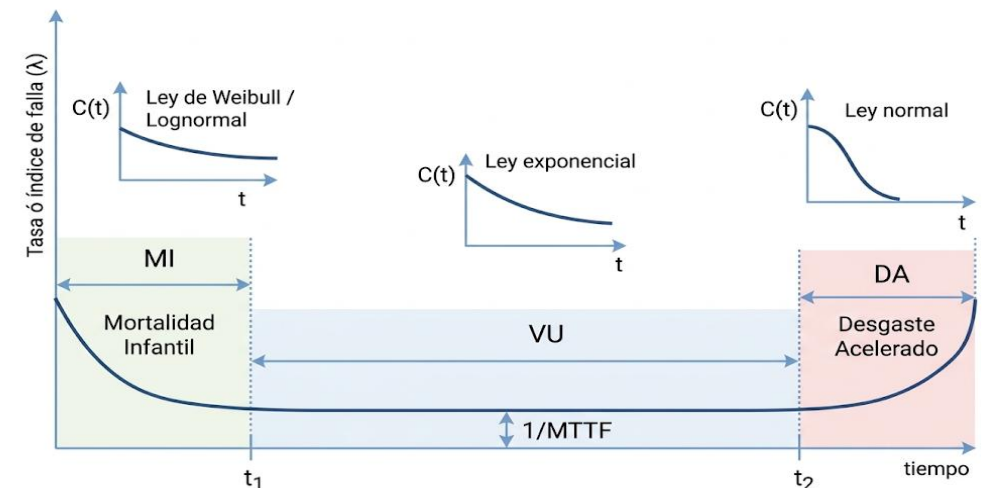
Se **aplica a nivel componente**: la mínima parte del sistema en que se pueden determinar sus modos de falla y la estadística que los gobierna.

La confiabilidad de un componente puede ser caracterizada a través de **distintos modelos de probabilidades**. Este modelamiento **depende de la etapa de vida** en que se encuentre el componente.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{C(t)}$$

$f(t)$ = función densidad de fallas

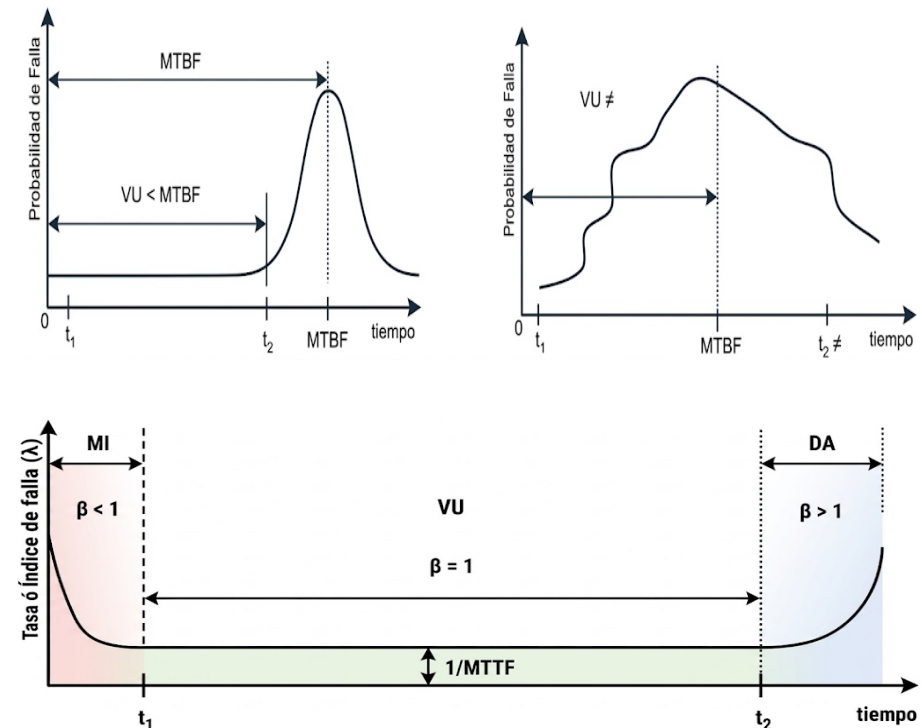
$C(t)$ = Confiabilidad del componente



Confiabilidad de los Activos

Patrón de Falla y Vida Útil

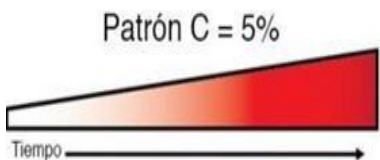
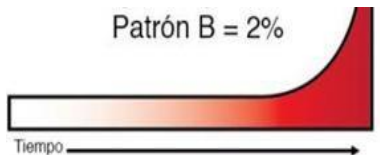
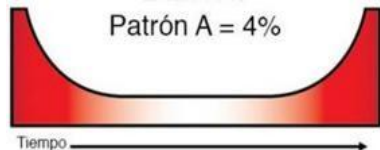
- **Vida Útil:** Se define como vida útil (VU) de un componente al intervalo de tiempo desde su puesta en marcha hasta el momento a partir del cual (para la mayoría de esos componentes) aumenta significativamente la tasa de fallas (λ).
- **Patrón de falla (o desempeño en el tiempo):** identifica la chance que tiene un componente de sufrir averías a lo largo de toda su vida.
- **Modo de falla dominante:** cuando un modo de falla prevalece sobre los demás; si además ocurre en tiempos similares en muchas piezas iguales, la dispersión de los tiempos de falla es baja.
- **Durante la vida útil los fallos son aleatorios** ($\beta=1$ en la distribución de Weibull) y es aplicable la ley exponencial para calcular la Confiabilidad.
- **No debe confundirse la vida útil con el MTBF:** solo puede hablarse de vida útil cuando la dispersión entre los $MTBF_i$ calculados es baja (un MTBF 'estabilizado' no implica, por sí solo, una vida útil definida).



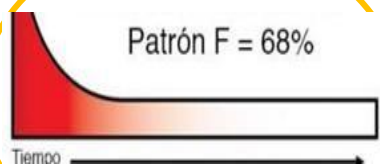
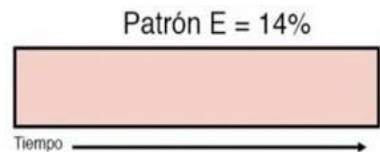
Confiabilidad de los Activos

Patrones de Fallas

PATRONES RELACIONADOS CON LA EDAD



PATRONES RELACIONADOS CON EL AZAR



Las fallas al azar representan un **89 % del total de fallas**.

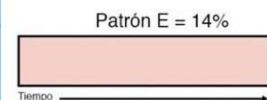
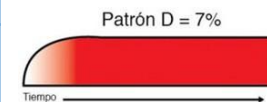
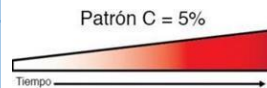
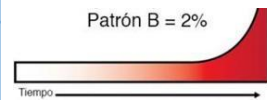
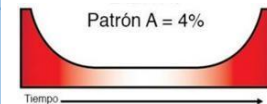
Las características de fallas relacionadas con la edad representan del **11 %** restante.

Cuanto más complejo sea un elemento, tendrá muchas más posibilidades de fallar de acuerdo al patrón F que al patrón A

Confiabilidad de los Activos

Patrones de Fallas

Patrón	Comportamiento	% aprox. (United Airlines 1978)	Ejemplos típicos
A	Curva de bañera (mortalidad infantil + aleatoria + desgaste)	4 %	Discos rígidos, relés eléctricos, cojinetes principales de grandes motores diésel, ejes de propulsión naval
B	Falla de Edad - Desgaste brusco al final de vida	2 %	Bujes de bronce, cojinetes lisos, revestimientos, sellos sometidos a desgaste.
C	Fatiga progresiva	5 %	Engranajes, resortes, ejes, dientes de engranajes, árboles de transmisión
D	Incremento inicial y luego aleatorio	7 %	Resistencias eléctricas, sensores capacitivos, algunos componentes electrónicos
E	Fallas aleatorias	14 %	Chips de memoria, tarjetas electrónicas, fallas inducidas por operación, ingreso de sólidos a bombas
F	Mortalidad infantil seguida de tasa constante	68 %	Equipos complejos: motores, turbinas, compresores, sistemas hidráulicos, CPUs, variadores, sistemas instrumentados



Confiabilidad de los Activos

Estrategias de Mantenimiento

Una **estrategia de mantenimiento** es aquella que nos dice **qué tareas hacer, con quién y a qué frecuencia**. El objetivo es asegurar la continuidad operacional a **mínimos costos globales**, considerando los costos propios de mantenimiento, costos de ineficiencia y los costos de capital fijo y de trabajo asociados.

Es necesario **distinguir datos de información**: la información sólo puede generarla el talento humano, los datos un sistema.

Fuentes de Información

- Fabricante: Manuales, Databook , Troubleshooting
- La experiencia del personal cotidianamente involucrado y comprometido supera ampliamente cualquier registro disponible en los sistemas informáticos.
- Historial de fallas: registros propios dentro del CMMS, estadísticas de fallas
- Equipos en plantas similares: Benchmarking
- Bases de datos genéricas: OREDA, ISO 14224, softwares a fines.

Confiabilidad de los Activos

Estrategias de Mantenimiento

Acciones Reactivas

- Restablecen las funciones originales perdidas por un evento inesperado (falla funcional imprevista).
- Si es una emergencia, la programación casi no existe o es improvisada; en las acciones restaurativas o de mejora hay más margen para programarlas.
- No forman parte del Plan de Mantenimiento, pero sí de la Planificación y Programación del área.
- Incluyen: Mantenimiento Correctivo, Restaurativo y Mejorativo.

Acciones Pro-activas

- Constituyen los Planes de Mantenimiento.
- Buscan impedir que se manifiesten modos de falla, que estos no ocurran a menudo, o minimizar sus consecuencias.
- Gestionar un evento (modo de falla) antes de que suceda es, por definición, una acción pro-activa.
- Incluyen: Preventivo, Predictivo, Proactivo, Detectivo y Previsivo.

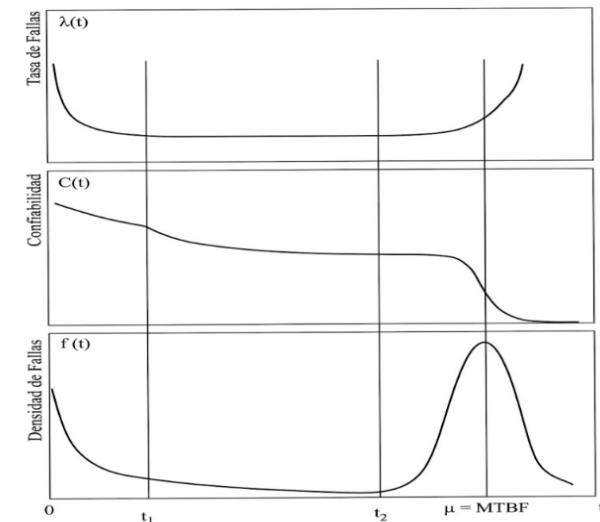
Estrategia de Mantenimiento

Mantenimiento Preventivo

Una estrategia antigua pero poderosa

*El Mantenimiento Preventivo consiste en **reparar un ítem o reemplazar sus componentes en forma periódica, sin importar su estado** de condición al iniciar la intervención, bajo la **hipótesis de que el patrón de fallas tiene un período de vida útil conocido**, alcanzando finalmente los mismos niveles de **confiabilidad y calidad originales**.*

- También conocido como Mantenimiento Cíclico: intervenciones programadas a intervalos fijos, sin importar el estado de condición del ítem.
- "No importa el estado del ítem" no significa que la información del componente sea irrelevante: permite ajustar el MTBF para futuras intervenciones.
- Aprovecha el momento más oportuno para detener la producción, minimiza riesgos de seguridad operacional y ayuda al cuidado del medio ambiente.
- Todo reemplazo realizado prematuramente es vida útil desperdiciada e imposible de recuperar.



Estrategia de Mantenimiento

Mantenimiento Preventivo

Componentes de un Plan de Mantenimiento Preventivo

- **Reemplazo de equipos, subconjuntos, componentes o piezas:** restituye el equipo a su estado original ante desgaste o fatiga, sobre todo en ítems mecánicos móviles.
- **Conservación, revisión o restauración de ítems:** controla o revisa en forma programada para llevar el equipo a su condición básica original; suele requerir desmontaje y desarme.
- **Rutinas de inspección y chequeos de recorrida:** no incluyen reemplazos ni restauraciones, pero corrigen defectos a bajo costo frente a los beneficios obtenidos.
- **Limpieza, ajuste y lubricación:** rutinas periódicas de muy bajo costo y beneficios extraordinarios.
- **Calibración:** ajuste de parámetros de proceso con patrones certificados, asegurando el cumplimiento de las normativas de calidad vigentes.

Hoja de Inspección Dinámica									
Área:	Servicios					Fecha:	12/03/2005		
Sector:	Sistema de Purificación					Responsable:	AJP		
Equipo/Línea:	Purificador N° 1					Tiempo:	25 min		
Tipo de Rutina:	Rutina de Inspección Dinámica					Fotografía del Equipo/ Línea o alguna referen- cia válida que ayude a realizar la Tarea.			
Frecuencia:	Diaria								
Realizó:	Carlos Rodríguez								
Protección Personal y Precauciones	Partículas dispersas: (Protector Ocular)				Autorizó:				
	Pantos calientes (Precaución / Pirómetro óptico)								
	Riesgo dléctrico: (Cables, equipo con tensión)								
	Zona ruidosas (Protector Auditivo)				Firma Ejecutante:				
	Zapatos de Seguridad.								
	Sistemas en Movimiento: (Precaución)								
Equipo:	Descripción de la Tarea				Modo	Valor esperado	Acción	Registro/Observaciones	
Purificador N° 1	Verificar que las conexiones eléctricas del motor no posean daños. Avisar a Mantenimiento en caso de daños.				👁️	Visual	OK	Aviso	
	Controlar al anuel de ruida. Dar aviso al Supervisor de turno en caso de anormalidad.				👂	Auditivo	Sin ruidos	Aviso	
	Medis temperatura del motor eléctrica. Dar aviso al Supervisor de Mantenimiento si es > a 50 °C.				🌡️	Pirómetro	Superior a 50 °C	Aviso	
	Verificar ausencia de pérdidas de aire en la sllida. Dar aviso al Super-visor de turno en caso de pérdidas.				👂	Auditivo	Sin pérdidas	Aviso	
	Verificar pérdidas de aire en conductos. Dar aviso al Supervisor de turno en caso de pérdidas.				👂	Auditivo	Sin pérdidas	Aviso	
	Estado de limpieza general. Limpiar.				👁️	Visual	Limpio	Limpieza	
	Detectat objetos estraños o abandonados. Retraidos.				👁️	Visual	Sin objetos	Retiro	
	Medir temperatura apoyo cojinetes. Dar aviso al Supervisor de Mantenimiento si es > a 65 °C.				🌡️	Pirómetro	Inferior a 1,5 bar	Registro	
	Registrar indicación manómetro de entrada.				👁️	Visual	Menor a 1,5 bar	Registro	
	Registrar indicación manómetro de salida.				👁️	Visual	Mayor a 3 bar	Registro	
	Verificar que las filtros se encuentren ajustados y sin obstrucciones.				👁️	Visual	Firmes y sin obstrucción	Ajuste	
	Verificar que las guardacorzras y protecciones se encuentren coloca-das y firmes.				👁️	Visual	Colocadas / Firmes	Ajuste	
	Verificar integridad Parada de Emergencia.				👁️	Visual	OK	Aviso	
	Verificar integridad, alineación y conexión del sensor de giro. Altnear y limpiar en caso de ser necesario.				👁️	Visual	Allueado y Limpio	Ajuste	
	Asegurar que el Interior de tablero eléctrico se encuentre libre de objetos estraños, limpio y sin conexiones sueñas. Dar aviso al Super-visor eléctrico si hay conexiones suellas.				👁️	Visual	OK	Limpicz / Aviso	

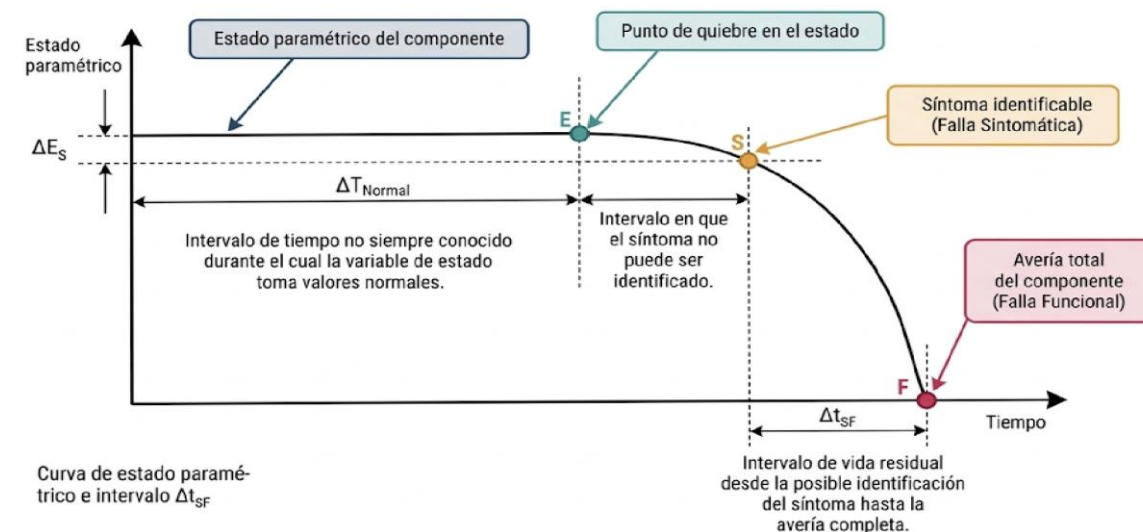
Tiempo Real:

Estrategia de Mantenimiento

Mantenimiento Basado en Condición (CBM) = Mantenimiento Predictivo + Mantenimiento Proactivo

Una estrategia poderosa fortalecida por la tecnología moderna (Predictivo)

- El Mantenimiento Condicional propone un plan de inspecciones basado en el monitoreo del estado del equipo, para aprovechar al máximo su vida útil antes de intervenirlo o retirarlo de servicio.
- Se fundamenta en que ciertos componentes "avisan" mediante síntomas prematuros de desperfectos o desajustes antes de alcanzar la falla operacional (funcional).
- Al detectar la falla incipiente, permite estimar el tiempo de vida remanente hasta la falla funcional, otorgando margen suficiente para programar su reparación o reemplazo.
- Se aplica preferentemente sobre equipos vitales para el proceso o cuyas fallas comprometen la seguridad o el medio ambiente.
- La expresión "a condición" implica que, si la parte está bien, se la deja funcionar; si está mal, se reemplaza o restaura.

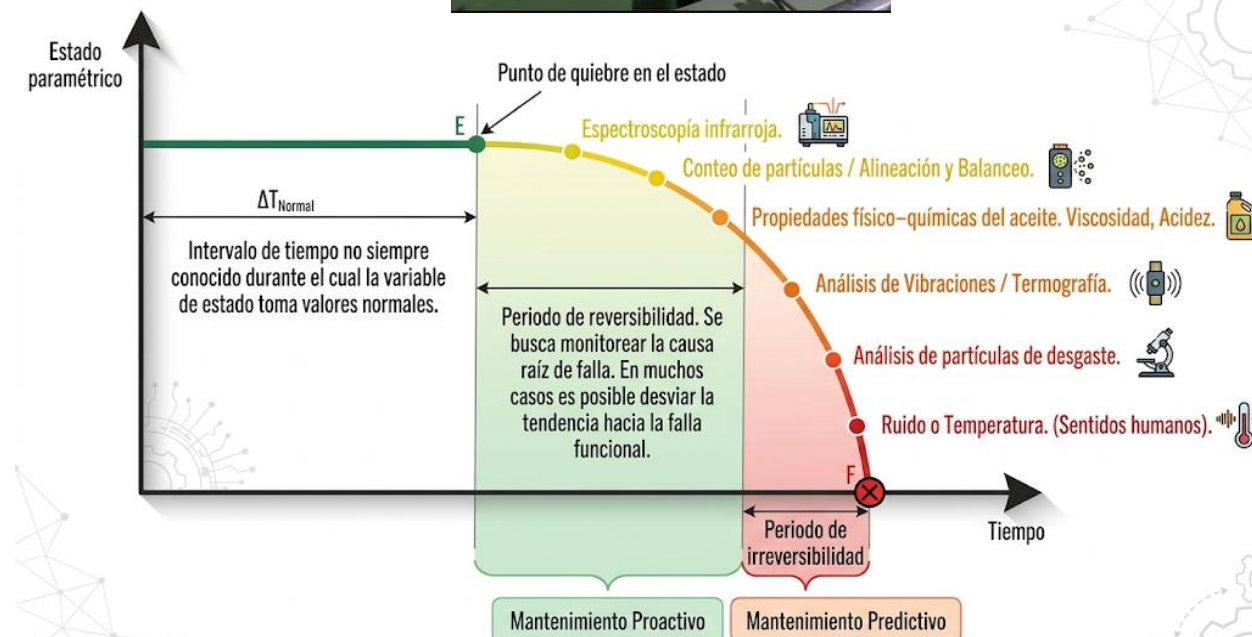


Estrategia de Mantenimiento

Mantenimiento Basado en Condición (CBM) = Mantenimiento Predictivo + Mantenimiento Proactivo

Una estrategia poderosa fortalecida por la tecnología moderna (Proactivo)

- Surge como alternativa para anticiparse al momento en que una causa raíz de falla puede convertirse en una falla sintomática irreversible.
- Identifica síntomas de carácter reversible; las tareas realizadas son habitualmente de carácter investigativo.
- Ejemplos: monitoreo del contenido de agua en aceites dieléctricos de transformadores, recuento de partículas en la carga lubricante de reductores, alineación y balanceo periódico de equipos rotantes, estudios de amperaje, seguimiento de niveles térmicos.



Estrategia de Mantenimiento

Mantenimiento Basado en Condición (CBM) = Mantenimiento Predictivo + Mantenimiento Proactivo

Ventajas

Mantenimiento Predictivo

- Reduce los tiempos de parada no programada, pronosticando la falla imprevista con la mínima interrupción del activo.
- Permite seguir la evolución de una falla sintomática evitando la avería catastrófica o disminuyendo su consecuencia.
- Optimiza los recursos) programando las tareas correctivas o de restauración, reduciendo horas extras.
- Aprovecha al máximo la vida de equipos cuyo empeoramiento hacia la falla (última etapa de la curva de la bañera) es progresivo.
- Desventaja principal: las fallas sintomáticas bajo predictivo son de carácter irreversible, por lo que esta estrategia no logra alargar la vida útil de los elementos medidos.

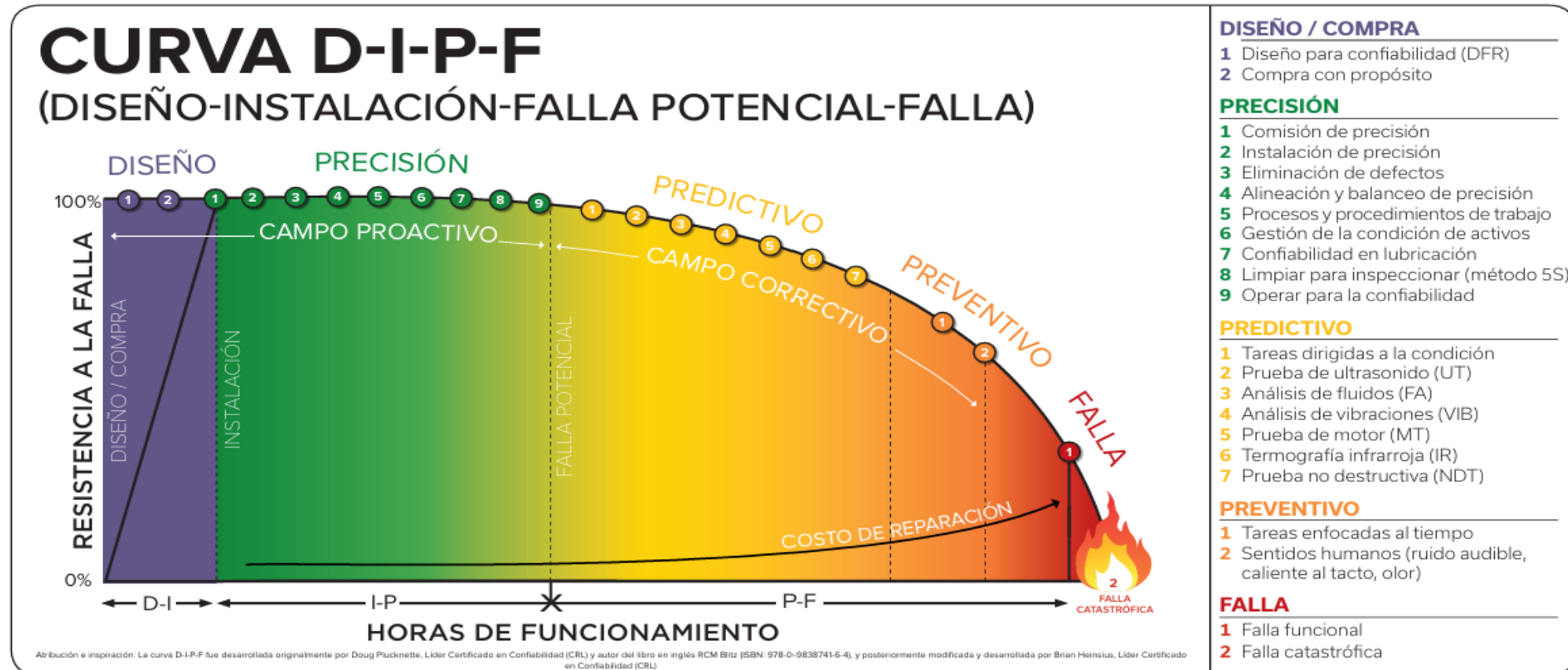
Mantenimiento Proactivo

- Permite analizar la evolución de una falla sintomática reversible desde la aparición de la causa raíz, gracias a su sensibilidad de detección prematura.
- Provee información para trabajar sobre las causas y no sobre los efectos de los fallos.
- Reduce los gastos provocados por las fallas sintomáticas irreversibles.
- Ofrece un panorama acotado del estado de los componentes para decidir el momento más oportuno de reemplazo o reparación.
- Prolonga la vida de equipos cuya causa raíz habría generado una falla sintomática irreversible, permitiendo optimizar los intervalos entre intervenciones preventivas.

Estrategia de Mantenimiento

Mantenimiento Basado en Condición = Mantenimiento Predictivo + Mantenimiento Proactivo

La siguiente es una curva extendida de la curva tradicional P-F que considera las etapas de diseño como un factor clave que incide en la confiabilidad y mantenibilidad del activo.

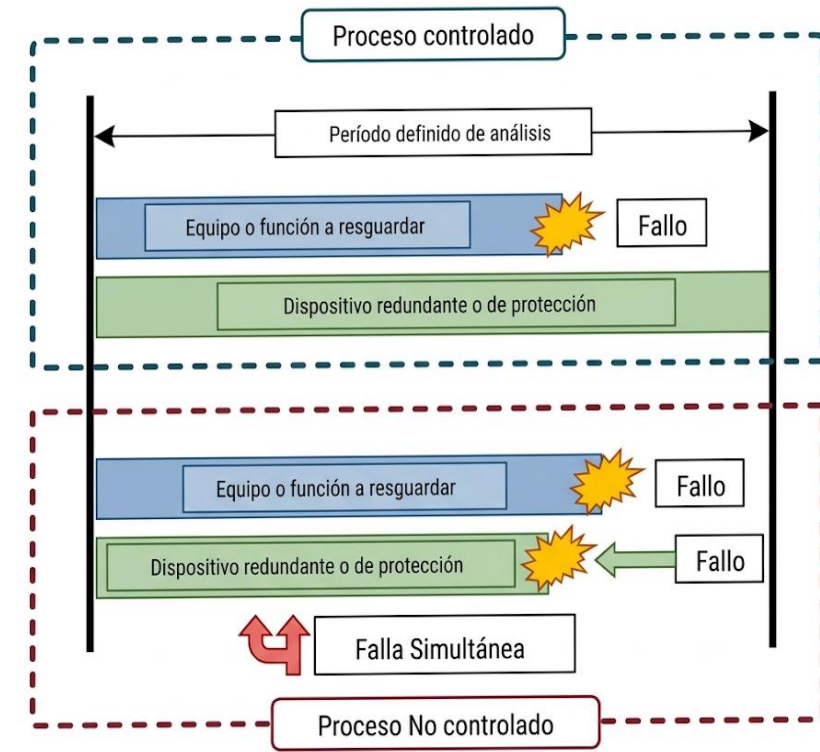


Estrategia de Mantenimiento

Mantenimiento Detectivo

Es el conjunto de rutinas/tareas aplicadas para poner de manifiesto las fallas ocultas que ocurren sobre dispositivos redundantes o de protección, por medio de chequeos regulares de su funcionamiento o de alguna variable.

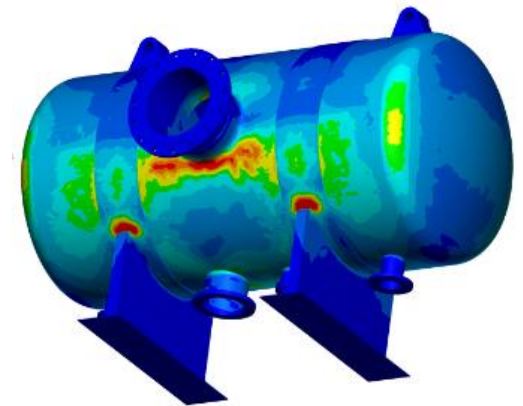
- Se aplica para reducir los fallos ocultos en dispositivos Redundantes o de Protección, cuando no se encontró otra estrategia pro-activa más eficaz (predictivo o preventivo).
- El intervalo entre dos chequeos detectivos es función directa del MTBF o de la tasa de fallas (λ) del dispositivo de seguridad.
- Muchos diseños tecnológicos buscan transformar en evidentes los fallos ocultos, al menos por algún tiempo y hasta cierto nivel; estos elementos que "avisan" se llaman dispositivos con seguridad intrínseca.



Estrategia de Mantenimiento

Introducción a Acciones Reactivas

- Una acción reactiva consiste **en actuar cuando se ha descubierto un estado de funcionamiento no deseado**, tomando alguna medida ante fallas, desvíos o sus consecuencias luego de su ocurrencia.
- Se clasifican en **Mantenimiento Correctivo** (acción no programada), **Mantenimiento Restaurativo y Mantenimiento Mejorativo** (acciones programadas).
- El **Mantenimiento Correctivo es no programado** porque el momento de su ejecución es tan aleatorio como la falla que pretende corregir, aunque puede ser objeto de planificación previa.
- El **Restaurativo y el Mejorativo son programables** porque su detención se decide a **partir de un desvío, falla sintomática o anomalía** detectada por otro tipo de mantenimiento



Estrategia de Mantenimiento

Mantenimiento Correctivo

- También llamado **de emergencia o de rotura**: consiste en reparar las fallas funcionales tras su ocurrencia, como tarea No Programada.
- La velocidad con que debe solucionarse la falla depende de las consecuencias que produzca en el negocio (seguridad, medio ambiente, proceso productivo o activo).
- **Pasar por alto fallas sintomáticas** (flojedades, ruidos extraños, exceso de temperatura) tarde o temprano **obliga** a aplicar Mantenimiento **Correctivo**.
- El mantenimiento autónomo promovido por el **TPM ayuda a evitar estas situaciones**: "el personal debe ser capaz de ver y no sólo de mirar".
- **Reducir el MTTR** optimizando equipos y procedimientos, **sin descuidar el riesgo de accidentes durante la ejecución de los trabajos**.
- Reparar definitivamente las fallas para reducir su recurrencia y mejorar el MTBF; **realizar un análisis de falla (ADF) al finalizar la reparación**.



Estrategia de Mantenimiento

Mantenimiento Correctivo

Ventajas

- Por lo general requiere poca planificación, excepto en trabajos de larga duración.
- Si la consecuencia de la falla funcional es controlada, se aprovecha al máximo la vida de los elementos y no se sobre-mantienen las máquinas.
- Se evitan grandes gastos preventivos y predictivos cuando la decisión surge de un análisis costo-beneficio.
- Si la intervención técnica es adecuada, se restituye rápidamente la operación del equipo.

Desventajas

- En intervenciones no controladas puede afectarse la disponibilidad de planta, generando grandes pérdidas en cantidad y calidad.
- Se incrementa sustancialmente el riesgo de accidentes por actuarse de forma acelerada y caótica.
- Peligro de no contar con suficiente dotación al momento de suceder la avería, con posible aumento indiscriminado de gastos fijos.
- Pérdida de información valiosa sobre las causas de la avería, y dificultad para proyectar los gastos de mantenimiento y confeccionar presupuestos.

Estrategia de Mantenimiento

Mantenimiento Restaurativo y Mejorativo

Mantenimiento Restaurativo

- Conocido como Mantenimiento de Restauración Programada (MRP): concibe **intervenciones controladas** en función del resultado de otras rutinas pro-activas.
- **Detectado un desvío** (alta vibración, temperatura elevada, ruido excesivo, aceite contaminado), **se programa una acción** que devuelve el sistema a su condición básica original
- **Disparadores habituales**: rutinas de inspección, rutas de lubricación, chequeos de recorrida zonal, defectos detectados en operación normal, inspecciones a condición y búsqueda de fallos ocultos.



Mantenimiento Mejorativo

- También llamado Mantenimiento Modificativo o Rediseño: altera condiciones originales del equipo para **corregir errores de diseño que impiden alcanzar los estándares de producción**.
- **Con pequeñas modificaciones se mejoran la confiabilidad y mantenibilidad**, eliminando fallos crónicos (mejora física) u optimizando procedimientos de montaje/desmontaje (mejora operativa).



Confiabilidad Operacional

Procesos y Metodologías para mejorar el Mantenimiento

*Para la implementación de un programa de Confiabilidad Operacional es indispensable establecer un **plan estratégico** que permita la creación de un **Clima Organizacional** clave para el éxito. El proyecto debe iniciar con una conveniente revisión y planeación de actividades, debe apoyarse en los últimos avances tecnológicos, y debe concluir con la integración de varias herramientas estratégicas (García Palencia).*

Confiabilidad Operacional

Mantenimiento
Productivo
Total (TPM)

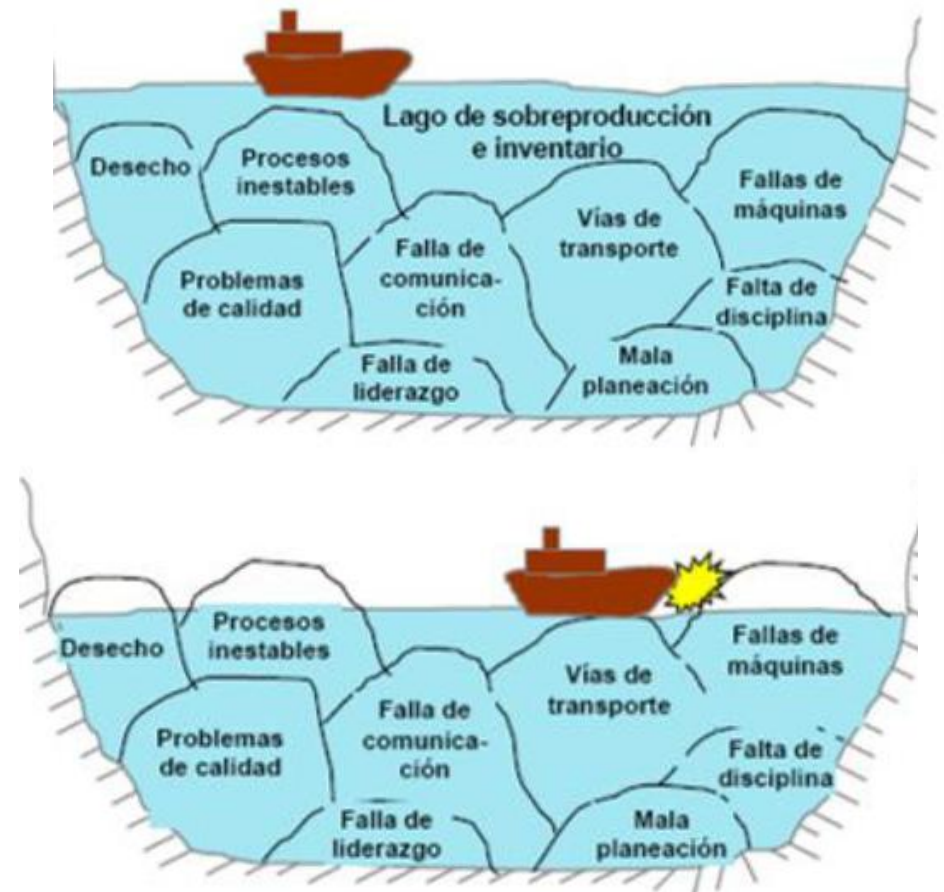
Mantenimiento
centrado en
Confiabilidad
(RCM)

Inspección
Basada en
Riesgo (RBI)

Mantenimiento Productivo Total (TPM)

Del Enfoque de Confiabilidad al Sistema Lean: ¿Por qué necesitamos el TPM?

- **El Desafío Pull:** En *Push* hay inventarios colchón; en *Pull*, si una máquina falla, se detiene toda la cadena.
- **Los Tres Ceros:** Para que el flujo sea continuo, el sistema exige **Cero Averías**, **Cero Defectos** y **Cero Accidentes**.
- **La Solución:** TPM.



Mantenimiento Productivo Total (TPM)

El TPM es una filosofía de manufactura enfocada a lograr la máxima eficiencia del sistema productivo, mediante la eliminación total de las pérdidas de producción.

Características:

- Participación total
- 5S como herramienta de inspección
- Sostenibilidad en el tiempo

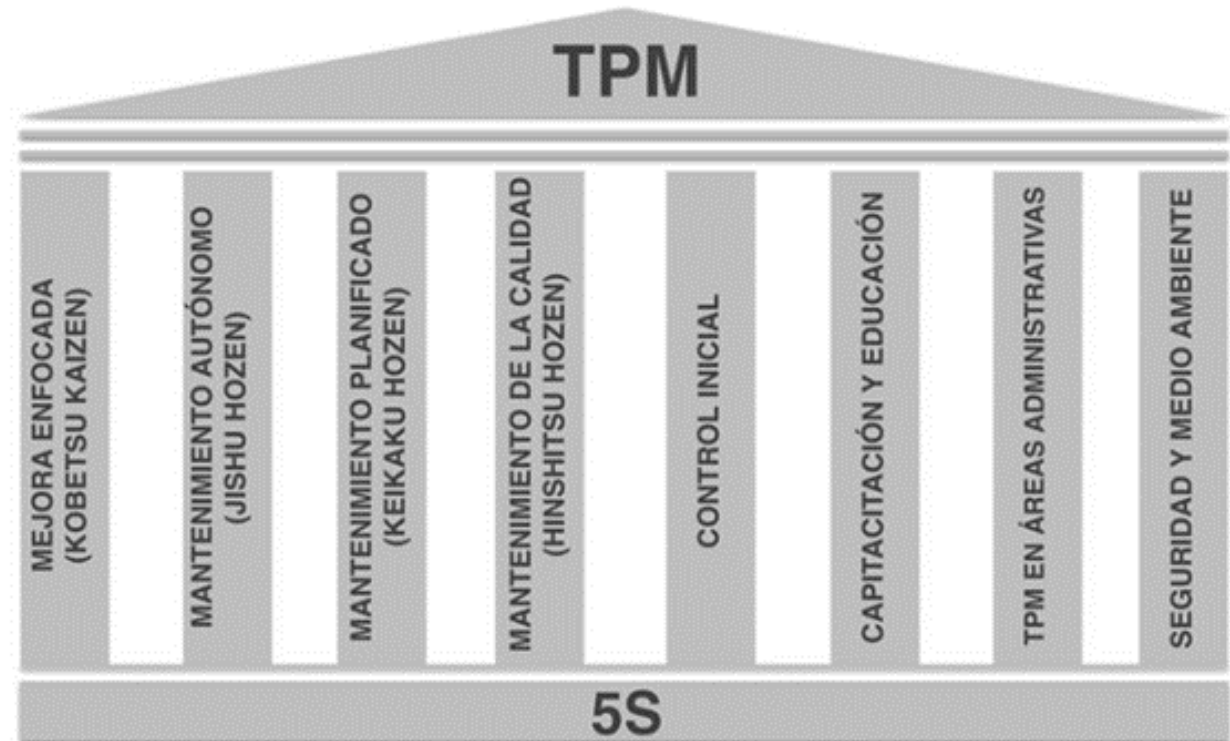


Mantenimiento Productivo Total (TPM)

Diagrama de "la casa del TPM" apoyada en las 5S.

Contenido en 3 bloques visuales:

- **Pilar Operativo Base:** Mejora enfocada + Mantenimiento Autónomo (operador y planta en el día a día).
- **Pilares Técnicos y de Confiabilidad:** Mantenimiento Planificado + Calidad + Control inicial.
- **Pilares de Soporte Organizacional:** Capacitación + SHA + Áreas Administrativas.



Mantenimiento Productivo Total (TPM)

La OEE y las 6 grandes pérdidas

El OEE(Overall Equipment Effectiveness) en el TPM es la principal métrica de rendimiento.

Mide la eficiencia global de los equipos en base a tres dimensiones:

- **Disponibilidad** – porcentaje del tiempo en que el equipo está efectivamente disponible para producir;
- **Rendimiento** – velocidad de funcionamiento real de operación en comparación con la velocidad ideal;
- **Calidad** – porcentaje de productos buenos producidos en relación con el total producido.

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidad} \times \text{Rendimiento} \times \text{Calidad}$$

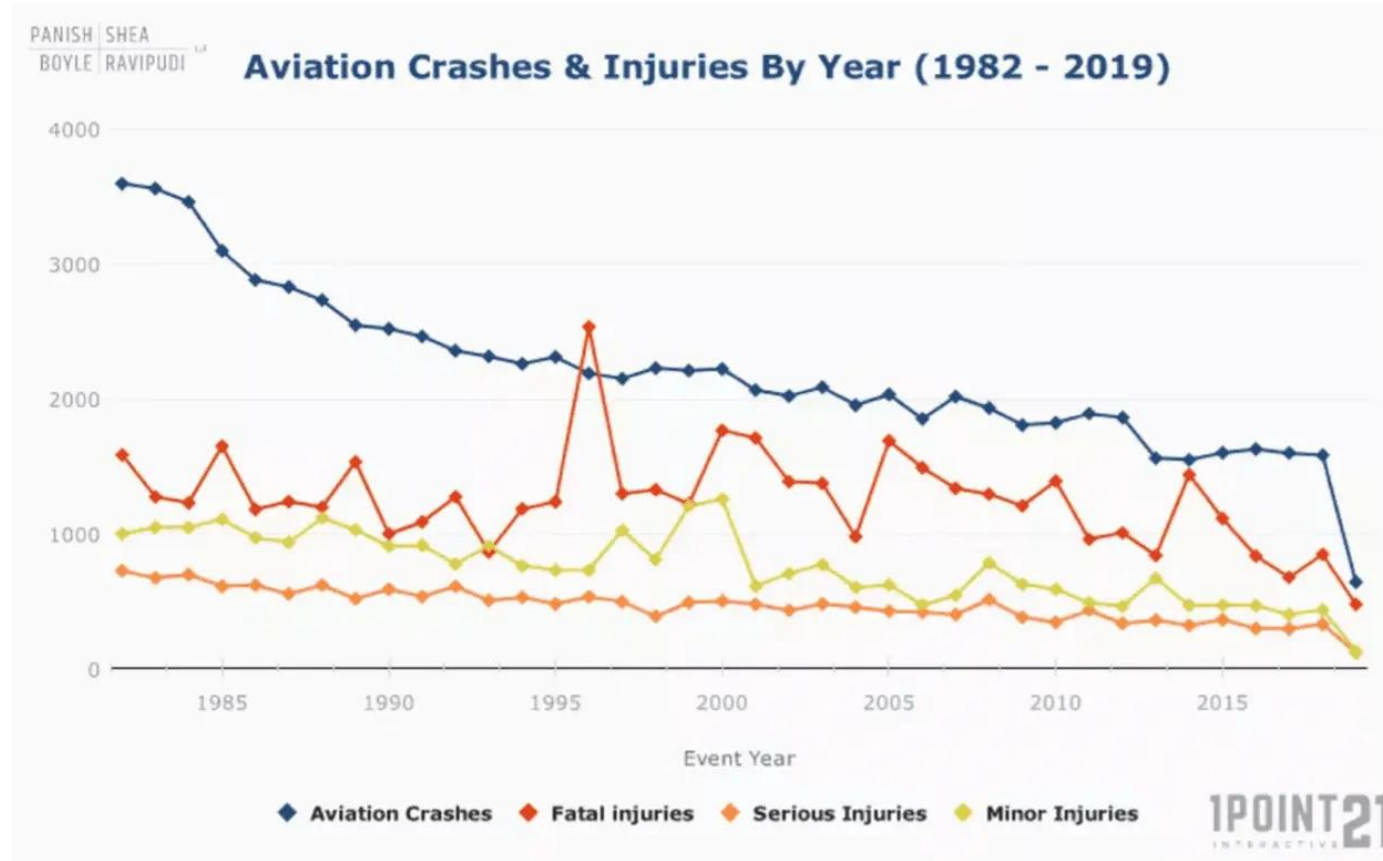


Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

Estudio Nowlan y Heap

Breve Historia

- En la década de los años 50-60s “mantenimiento” era **equivalente a reparaciones periódicas**.
- En los casos en que esta **estrategia no parecía estar funcionando**, se asumía que se estaban realizando inoportunamente las reparaciones, es decir muy tarde.
- A finales de los años 50s, la aviación comercial mundial tenía más de 60 accidentes por cada millón de despegues.
- **Dos tercios de los accidentes** ocurridos al final de los años 50s eran **causados por fallas en los equipos**.
- Nowlan y Heap: la mayoría de los componentes NO se benefician de "reparar más seguido".



Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

El RCM es un proceso analítico y sistemático basado en el entendimiento de las **funciones del sistema** y sus **fallas funcionales**. Permite diseñar planes de mantenimiento que aumenten la confiabilidad de los equipos con un mínimo costo y riesgo; para lo cual combina técnicas de AM (Mantenimiento Autónomo), CM (Correctivo), PM (Preventivo) y CBM, mediante estrategias justificadas técnica y económicamente.

ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO	
Predictivas <i>Monitoreo de condición (CBM)</i>	Preventivas <i>Tareas a intervalos fijos (TBM)</i>
Correctivas <i>RTF — correr hasta la falla</i>	Detectivas <i>Prueba de fallas ocultas</i>



No busca sólo resolver problemas de confiabilidad: introduce un cambio cultural — el mantenimiento existe para sostener las funciones del equipo, no el equipo como objeto aislado.

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

La Metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, como proceso sistemático se sustenta en dar respuesta a las siguientes 7 preguntas básicas:

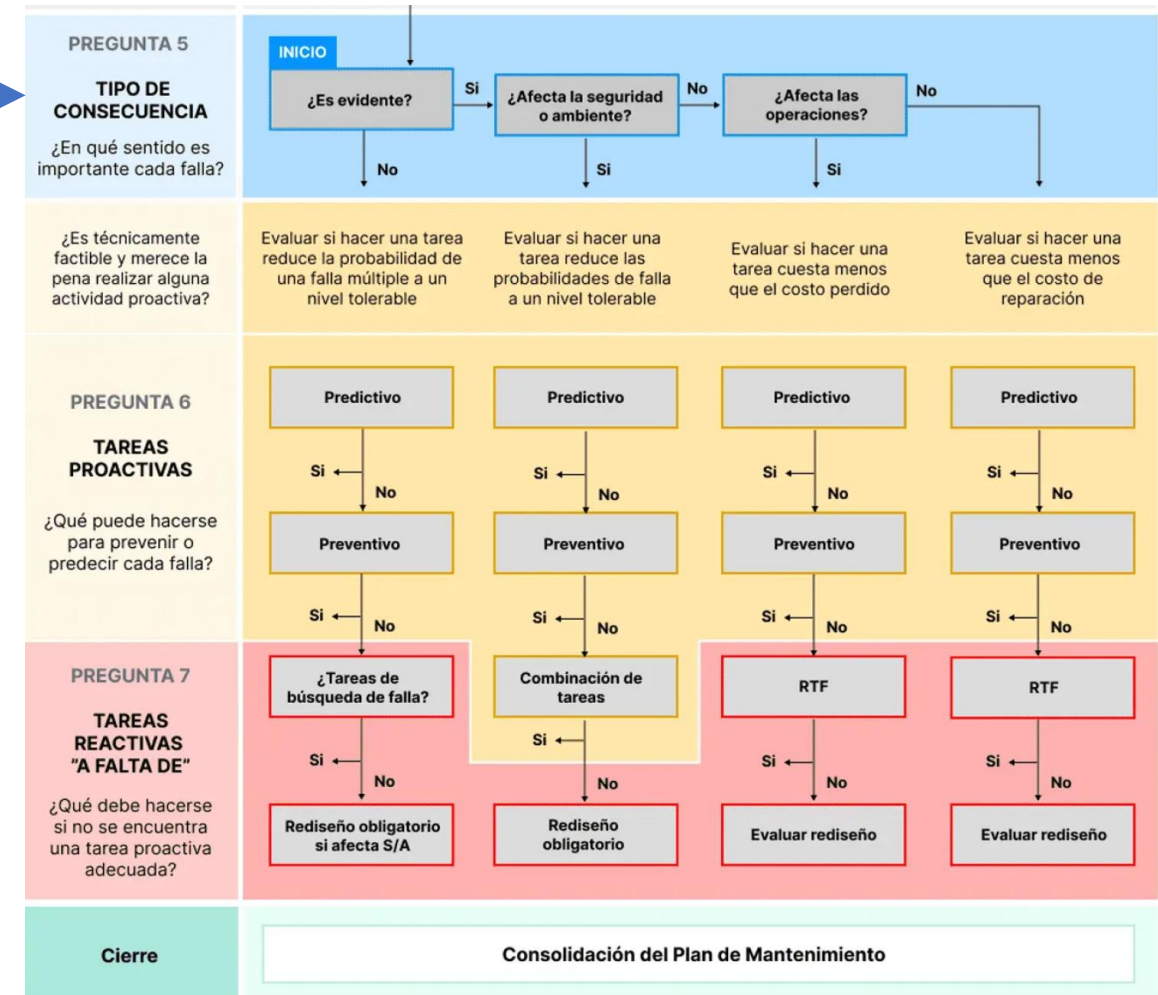
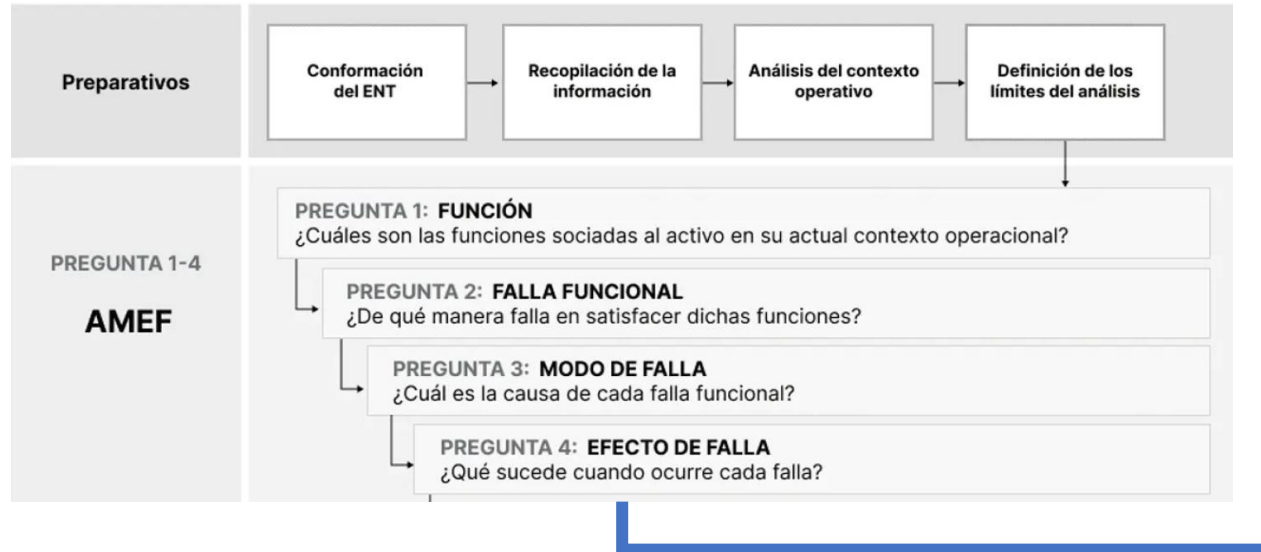
Las 7 Preguntas de la metodología (Moubray – RCM II)

Ejemplo : rodamiento de compresor

1	¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo en su contexto? (Función)	→ Soportar el eje a 8.000 rpm manteniendo vibración global $\leq 4,5$ mm/s RMS
2	¿De qué forma falla en cumplir dichas funciones? (Fallas funcionales)	→ Vibración global $> 4,5$ mm/s RMS
3	¿Qué causa cada falla funcional? (Modo de falla / Causa de la falla)	→ Fatiga superficial (picado) de pistas/rodillos; pérdida de película lubricante; contaminación por partículas abrasivas
4	¿Qué ocurre cuando se produce cada falla funcional? (Efectos de falla)	→ Sube fricción y temperatura → riesgo de agarrotamiento → disparo del compresor por alta vibración → parada de planta
5	¿En qué se traduce cada falla funcional? (Consecuencia: Seg/MA, Oper, No Oper, Fallas Oc.)	→ Operacional — producción perdida (el disparo automático evita que escale a un tema de seguridad)
6	¿Qué puede hacerse para predecir o prevenir cada falla funcional? (Tareas Proactivas)	→ Monitoreo de vibración global en banda ISO 20816 (alarma en 2,8 mm/s, trip en 4,5 mm/s)
7	¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea preventiva adecuada? (Rediseño)	→ No aplica — la tarea proactiva (CBM) es técnica y económicamente viable

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

Pasos del RCM para el armado del plan de mantenimiento



Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

Ejemplo de armado del plan de mantenimiento

PREGUNTA 1	PREGUNTA 2	PREGUNTA 3	PREGUNTA 4	PREGUNTA 5	PREGUNTA 6 Y 7		
Función	Falla Funcional	Modos de Falla	Efecto de falla	Tipo de consecuencia	Tipo de actividad	Descripción de actividad	Frec.
Motor Eléctrico ME-1202							
Proveer accionamiento a la bomba P-1202 manteniendo el consumo de potencia dentro de los parámetros normales mientras permite el bombeo de 400l/min de crudo.	La bomba accionada no logra transferir la tasa de flujo requerido y/o existe consumo elevado de potencia en el motor.	Mala alimentación eléctrica deficiente (desbalance entre fases, subtensiones o sobretensiones, variación de frecuencia, baja calidad de potencia).	Una mala alimentación eléctrica en un motor, caracterizada por desbalance entre fases, subtensiones, sobretensiones, variaciones de frecuencia y baja calidad de potencia, puede llevar a serias consecuencias, como sobrecalentamiento y daños en los bobinados, lo que reduce la vida útil del aislamiento y del motor en general. Estas condiciones también pueden provocar un aumento de la corriente, disminución del par motor, operación ineficiente, vibraciones anormales y un desgaste acelerado de los componentes mecánicos, lo que incrementa el riesgo de fallas prematuras o incluso catastróficas del motor. Costos de reparación: Reparación o sustitución de componentes eléctricos dañados (bobinados, aislamiento) puede oscilar entre \$5,000 y \$10,000 USD. Personal requerido: 2 electricistas y 1 ingeniero. Frecuencia estimada: Moderada, especialmente en instalaciones con variaciones frecuentes de suministro eléctrico o sistemas de protección insuficientes. 1-2 veces por año.	Falla evidente con impacto a la operación	Mantenimiento Predictivo	Verificar valores de tensiones y corrientes por fase, potencia activa y reactiva, factor de potencia y temperaturas.	3M
		Ventilador sucio	La acumulación de suciedad en las aspas del ventilador reduce su eficiencia para mover aire, lo que disminuye la capacidad del sistema para disipar calor. Esto puede llevar a un sobrecalentamiento del motor o componentes electrónicos, lo que incrementa el riesgo de fallos térmicos y reduce la vida útil de los componentes. Además, un ventilador sucio puede generar vibraciones anormales debido al desequilibrio de las aspas, lo que provoca un desgaste prematuro en los cojinetes y otros componentes mecánicos. En casos extremos, el sobrecalentamiento continuo podría derivar en una falla catastrófica del motor o del equipo, provocando paradas no planificadas y costosas reparaciones. Costos de reparación: Limpieza y mantenimiento rutinario puede costar entre \$500 y \$1,000 USD; si se requiere reemplazo de componentes debido al desgaste, podría aumentar a \$2,000 USD. Personal requerido: 1 técnico de mantenimiento. Frecuencia estimada: Alta, especialmente en entornos polvorientos o con mala ventilación. 1 vez cada 2 años.	Falla evidente con impacto a la operación	Mantenimiento Preventivo	Verificación del correcto funcionamiento del ventilador, limpiar entradas y salidas de aire, deflectores y carcasa.	2A
		Rodamiento degradado	Aumento significativo de la fricción y el calor generado durante la operación. Esto puede causar un sobrecalentamiento. La degradación del rodamiento también puede provocar vibraciones excesivas y ruidos anormales, lo que no solo afecta la eficiencia operativa, sino que también aumenta el riesgo de fallo mecánico. Costos de reparación: Reemplazo del rodamiento y posibles daños asociados puede costar entre \$3,000 y \$6,000 USD. Personal requerido: 2 mecánicos y 1 ingeniero. Frecuencia estimada: Moderada, dependiendo de las condiciones de operación y la calidad de la lubricación. 1 vez cada 3 años.	Falla evidente con impacto a la operación	Mantenimiento Predictivo	Termografía	3M

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)

Ejemplo de armado del plan de mantenimiento

No	Tipo de tarea	Descripción	Ejecutor	Frec.	1S	3M	6M	1A	2A	4A
Motor Eléctrico ME-1202										
1	Mantenimiento Preventivo	Verificar el funcionamiento de resistencias calefactoras para la prevención de humedad en el interior del motor (solo aplica en cuando el motor no se encuentra operando, en standby espera).	Operador	1s						
2	Mantenimiento Predictivo	Verificar sensorialmente temperatura, vibración, decoloración, olores y/o ruidos anormales.	Operador	1S						
3	Mantenimiento Predictivo	Verificar valores de tensiones y corrientes por fase, potencia activa y reactiva, factor de potencia y temperaturas.	Eléctrico	3M						
4	Mantenimiento Predictivo	Realizar análisis de vibración con analizador portátil	Tec. Predictivo	3M						
5	Mantenimiento Predictivo	Termografía	Tec. Predictivo	3M						
6	Mantenimiento Predictivo	Evaluar reengrase con ultrasonido	Tec. Predictivo	3M						

Introducción al Concepto de Riesgo

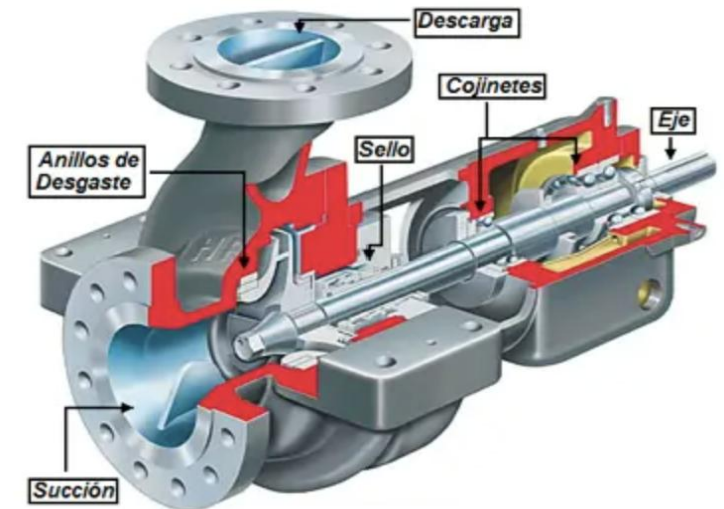
R I E S G O = PROBABILIDAD (P) x CONSECUENCIA (C)

R I E S G O = EFECTO de la INCERTIDUMBRE sobre los OBJETIVOS. Tres palabras clave.

¿cuán grave es el efecto si ocurre, en la peor situación previsible?



¿qué tan factible es que el evento/falla ocurra?



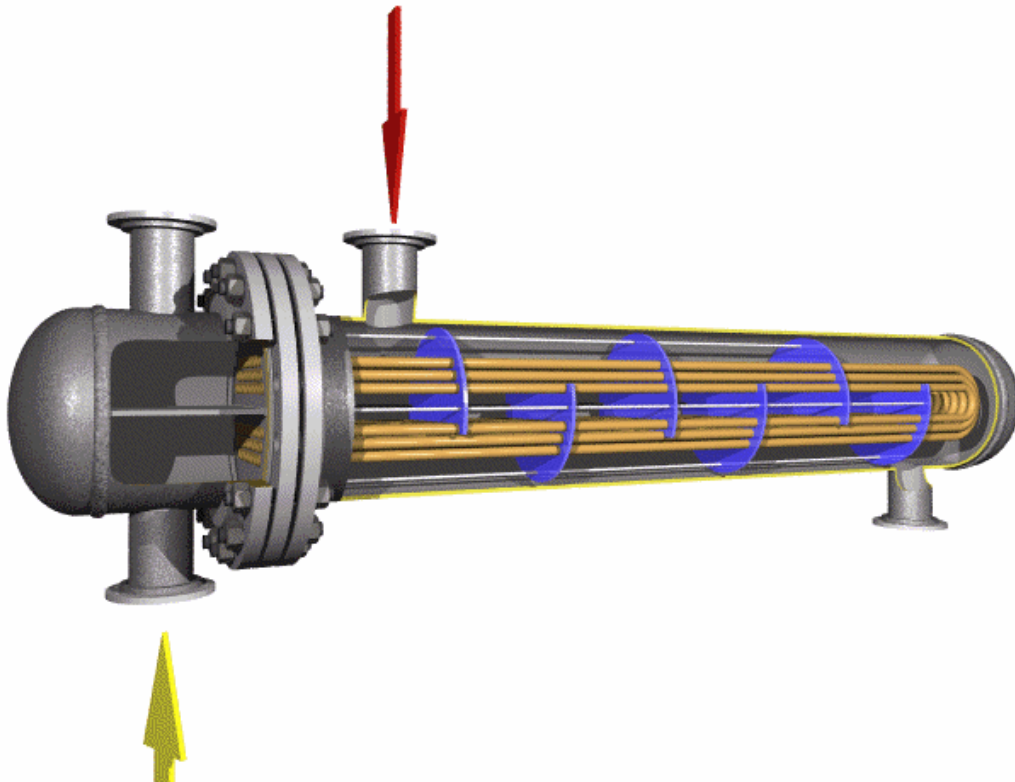
Bomba crítica sin respaldo → El riesgo de una parada por falla del sello es $P \times C$.

- Bajo la **probabilidad** con monitoreo de vibraciones y plan predictivo (intervengo antes de que falle).
- Bajo la **consecuencia** instalando una bomba de respaldo en paralelo (si falla, no paro la planta).

MISMA FALLA, DOS FORMAS DISTINTAS DE GESTIONAR EL RIESGO.

Inspección Basada en Riesgo (RBI)

¿RBI vs. RCM ? → No compiten, se complementan y **gestionan riesgo**.

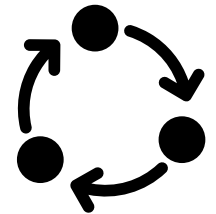


- **RCM** busca garantizar que el equipo cumpla su función. Equipos **dinámicos/rotativos** (bombas, compresores, turbinas).
- **RBI** busca evitar fallas catastróficas por pérdida de contención. Equipos **estáticos** (recipientes, cañerías, intercambiadores, tanques). Falla por degradación del material y pérdida de contención.

Inspección Basada en Riesgo (RBI)

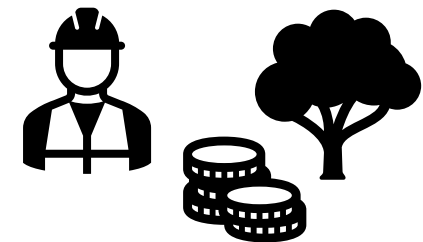
¿Qué es la inspección basada en riesgo?

- La Inspección Basada en Riesgo (RBI) es un enfoque sistemático que se utiliza para evaluar el riesgo asociado con la operación de equipos y sistemas críticos. La RBI es una herramienta importante para la gestión de activos **y se utiliza para mejorar la seguridad y la confiabilidad de las instalaciones.**



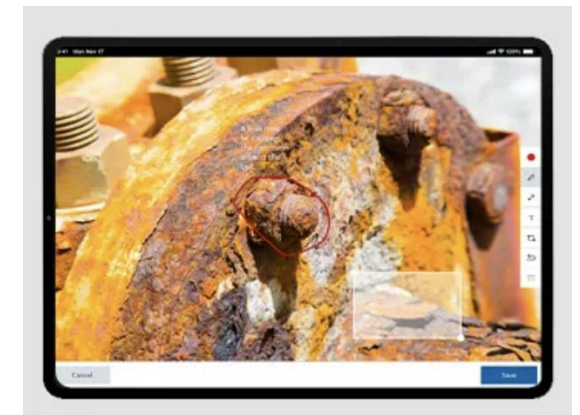
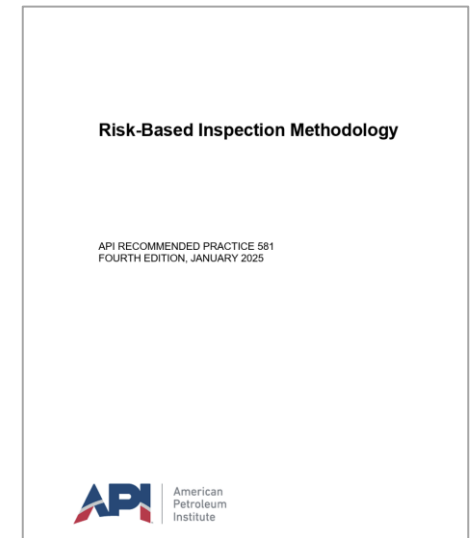
¿Cómo impacta en nuestro proceso la aplicación de RBI?

1. Optimiza el uso de recursos económicos, haciendo foco en los **equipos más críticos** y facilita la planificación presupuestos para años siguientes.
2. **Permite ampliar periodos de inspección** de equipos.
3. **Eleva la seguridad** de las instalaciones logrando reducir costos, lucro cesante, mejorando la imagen de la compañía.
4. **Contribuye a cumplir regulaciones y estándares de seguridad**, lo que se puede traducir en menores primas de riesgo por parte de aseguradoras de riesgo.



Inspección Basada en Riesgo (RBI)

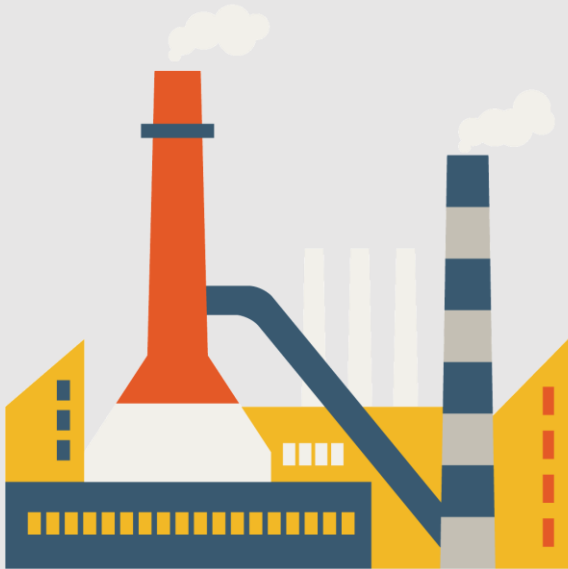
- La práctica recomendada de API RP 581 proporciona una metodología **cuantitativa** para elaborar planes de inspección adaptados al riesgo asociado a cada equipo y sus componentes.
- La práctica recomendada de API RP 580 contiene requisitos mínimos para calificar un programa de **inspección a intervalos basados en riesgos *versus* intervalos por reglas (mitad de vida útil)**.
- Ambas normativas son optativas.
- Para API RP 581, cuando hablamos de falla estamos hablando de pérdida de contención, es decir, de una falla mecánica.



Inspección Basada en Riesgo (RBI)

¿Dónde aplica la metodología?

Refinería y Petroquímica



Plantas de procesos químicos



Instalaciones Oil&Gas



Inspección Basada en Riesgo (RBI)

¿Qué equipos son alcanzados por la metodología?



Tanques (piso y envolvente)



Intercambiadores y haz de tubos



Sistemas de Tuberías



Recipientes a presión



Dispositivos de
alivio de presión

Inspección Basada en Riesgo (RBI)

¿Cómo se define una inspección?

Conjunto de actividades desarrolladas para verificar que los materiales, procesos de fabricación, construcción, evaluaciones, pruebas y reparaciones, estén de acuerdo con códigos aplicables y/o cumplan con los requerimientos exigidos en los procedimientos escritos por el dueño de la instalación.

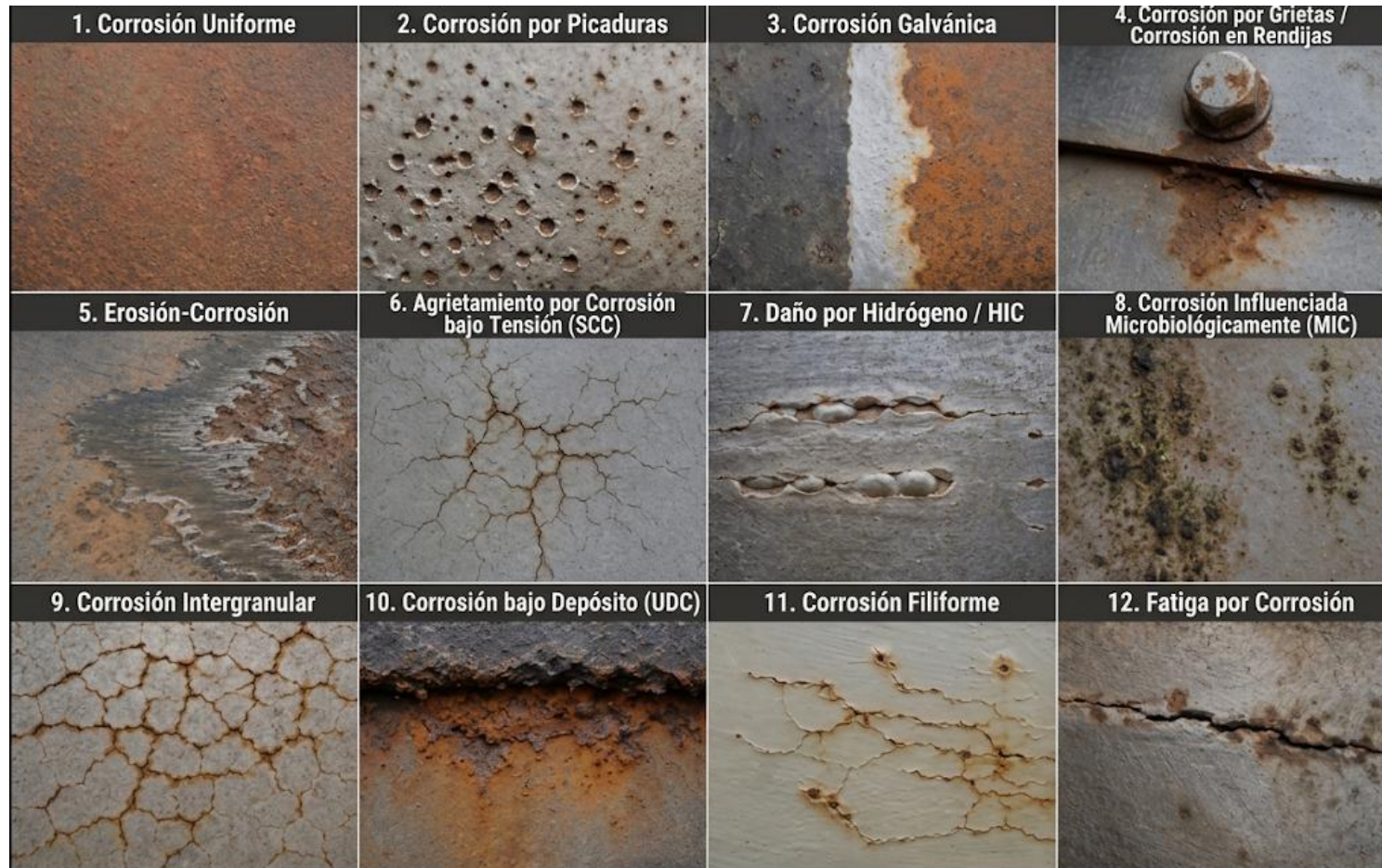
El plan de inspección debe responder 4 preguntas:

1. ¿Qué tipo de daños existen activamente?
2. ¿Dónde deben detectarse?
3. ¿Cómo se pueden detectar?
4. ¿En qué momento y luego con qué frecuencia?



Inspección Basada en Riesgo (RBI)

Mecanismos de daño



Mecanismos de daño

Proceso que induce micro y/o macro cambios en el material.

Los mecanismos de daño suelen ser incrementales, acumulativos y, en algunos casos, irreversibles

Modos de falla

Manera de cómo ocurre la falla, para el RBI la falla que preocupa es la pérdida de contención de equipos presurizados

Inspección Basada en Riesgo (RBI)

Riesgo = Probabilidad de Falla (PoF) ×

Consecuencia de Falla (CoF)

$$R(t) = P_f(t) \times$$

$$R(t) = gff \cdot D_f(t) \cdot F_{MS}$$

[m2/año] [fallas/año] [uni]

[m2/año]

[USD/año]

- Mecanismos de daño
- Tasas de corrosión o susceptibilidad
- Condiciones operativas
- Inspección (Cantidad y Efectividad)

- a) Adelgazamiento: D_{f-gov}^{thin}
- b) SCC— D_{f-gov}^{SCC}
- c) Daño externo— D_{f-gov}^{ext}
- d) HTHA— D_{f-gov}^{HTHA}
- e) Fatiga mecánica (solo tuberías): D_{f-gov}^{mfat}
- f) Fractura frágil— D_{f-gov}^{brit}

×

×

C_f

CA_f

FC

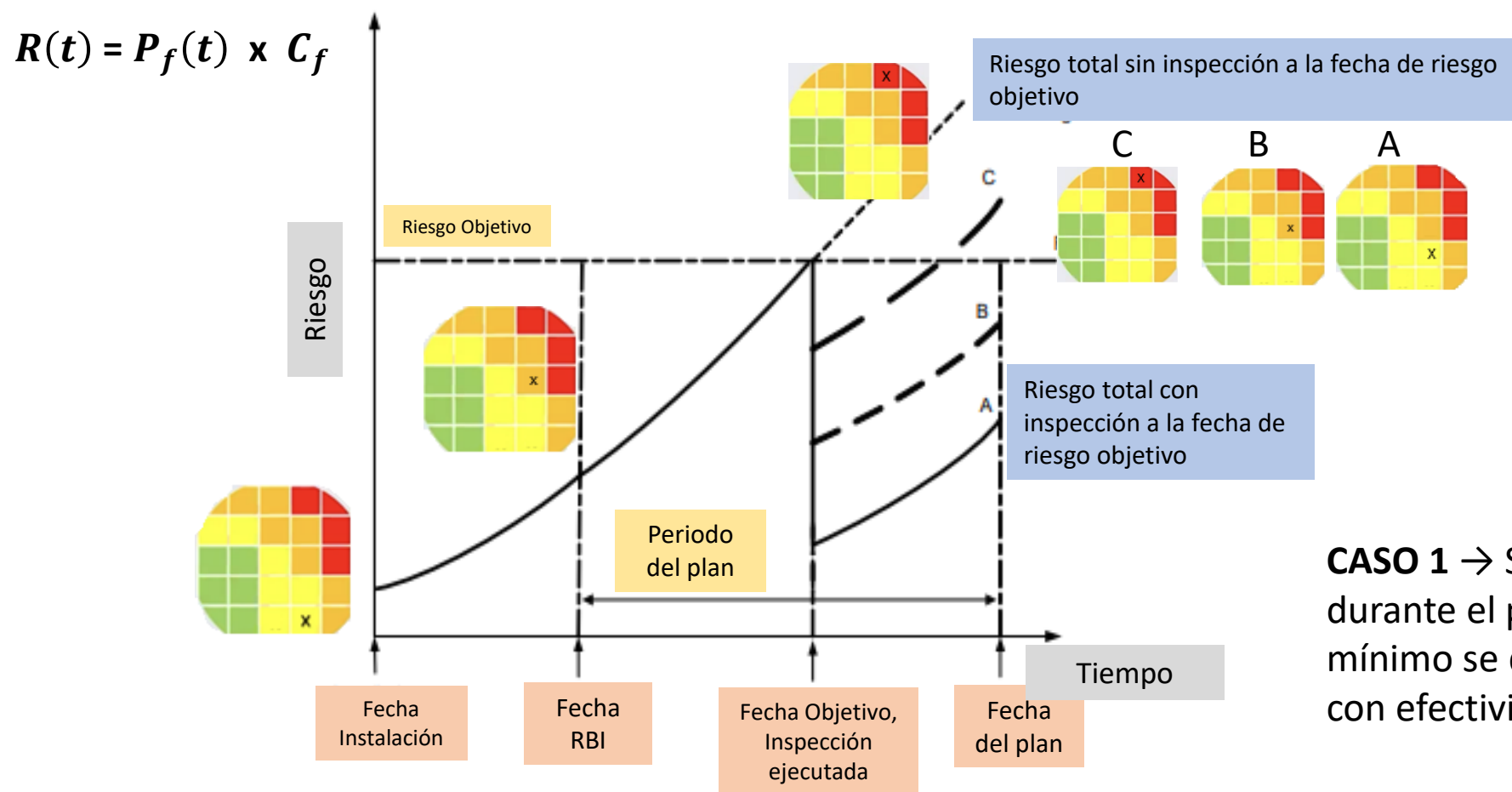
[términos área de impacto]

[términos financieros]

- Modos de falla (Orificios aplicables)
- Eventos : Explosión/Incendio, tóxico y no inflamable no tóxico
- Liberación (continua o instantánea)
- Probabilidades de diferentes consecuencias mediante árboles de eventos.
- Sistemas de detección, aislamiento y tiempos

Inspección Basada en Riesgo (RBI)

Planificación de la inspección con API RP 581

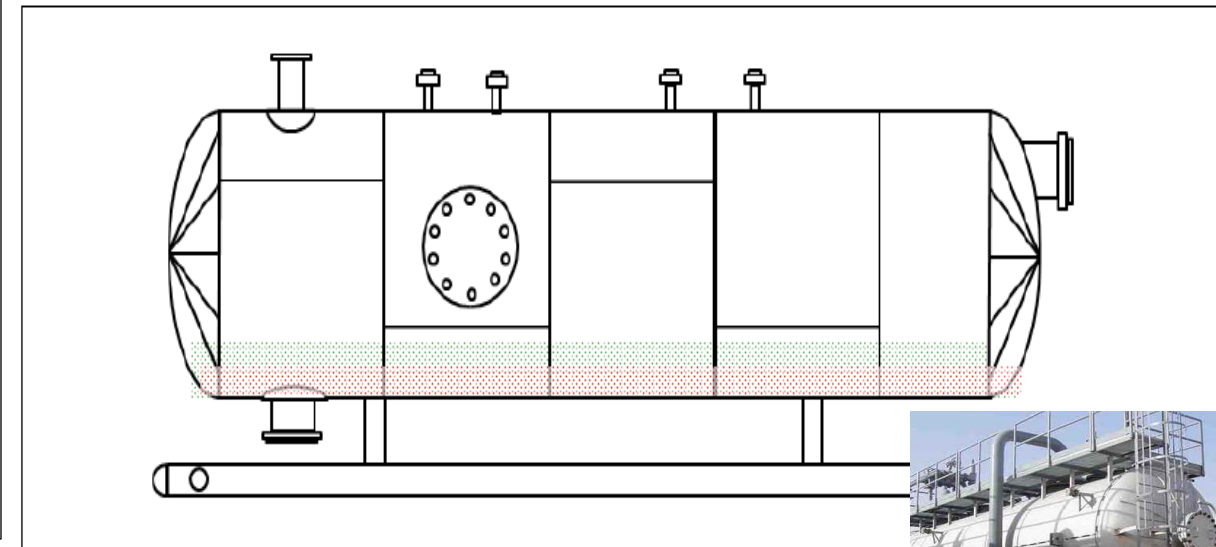
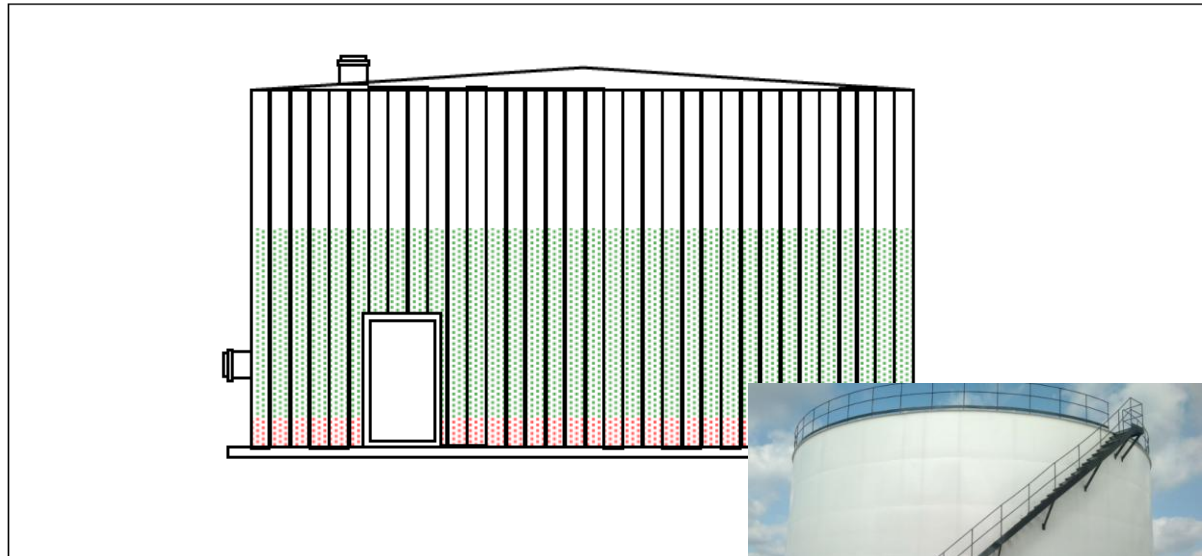


CASO 1 → Se excede el riesgo durante el periodo del plan. Como mínimo se debe ejecutar un plan con efectividad B.

Inspección Basada en Riesgo (RBI)

EQUIPO	MEC DAÑO	TIPO	ZONA INSPECCION	METODO	ALCANCE	EFFECTIVIDAD	F/S
Tanque apoyado en suelo	MC	LOCALIZADA	INTERIOR ENVOLVENTE FONDO/PISO	VT INT + MD	100%/A DETERMINAR POR VT	A-B	X
	H2S-CO2	LOCALIZADA	INTERIOR ENVOLVENTE/PISO	VT INT + MD ó UTT	100%/A DETERMINAR POR VT	A-B	X
	SUELO	LOCALIZADA	EXTERIOR PISO	ME UTT	100%	A-B	X
	CUI	GRAL.-LOCALIZADA	EXTERIOR ENVOLVENTE	VT EXT + MD ó UTT	100%/A DETERMINAR POR VT	A-C	A
EFFECTIVIDAD: A=ALTA B=MODERADA C=POSIBLEMENTE EFECTIVA D=POCO EFECTIVA X=INEFECTIVA							
F/S: X: FUERA DE SERVICIO A: AMBOS							

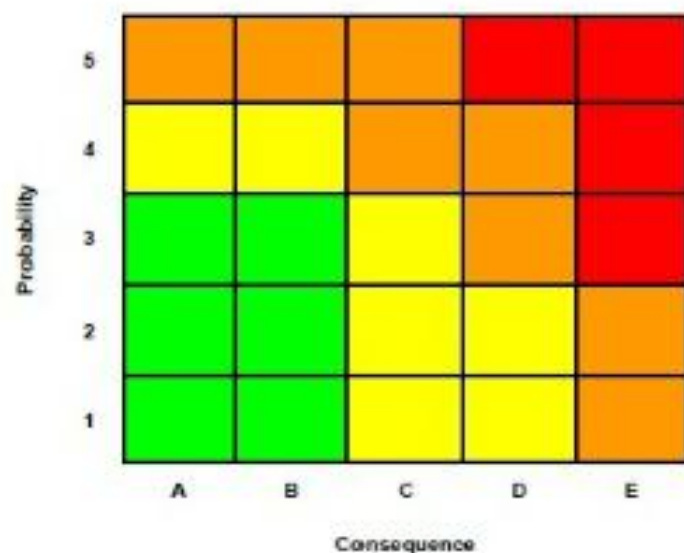
EQUIPO	MEC DAÑO	TIPO	ZONA INSPECCION	METODO	ALCANCE	EFFECTIVIDAD	F/S
Separadores bifásicos horizontales	MC	LOCALIZADA	INTERIOR ENVOLVENTE FONDO	VT INT + MD	100%/A DETERMINAR POR VT	A-B	X
	H2S-CO2	LOCALIZADA	INTERIOR ENVOLVENTE FONDO	VT INT + MD ó UTT	100%/A DETERMINAR POR VT	A-B	X
	CUI	GRAL.-LOCALIZADA	EXTERIOR ENVOLVENTE	VT EXT + MD ó UTT	100%/A DETERMINAR POR VT	A-C	A
EFFECTIVIDAD: A=ALTA B=MODERADA C=POSIBLEMENTE EFECTIVA D=POCO EFECTIVA X=INEFECTIVA							
F/S: X: FUERA DE SERVICIO A: AMBOS							



Inspección Basada en Riesgo (RBI)

$$\text{RIESGO} = \text{PROBABILIDAD (PoF)} \times \text{Consecuencia (CoF)}$$

Matriz de Riesgo RBI



Proceso RBI — 5 Pasos

1

Definir alcance e inventario de equipos

Jerarquía de activos, límites de sistema, datos de proceso

2

Evaluar Probabilidad de Falla (PoF)

Mecanismos de daño, tasas de corrosión, datos históricos

3

Evaluar Consecuencias de Falla (CoF)

Seguridad, ambiente, producción, impacto económico

4

Calcular y categorizar el Riesgo

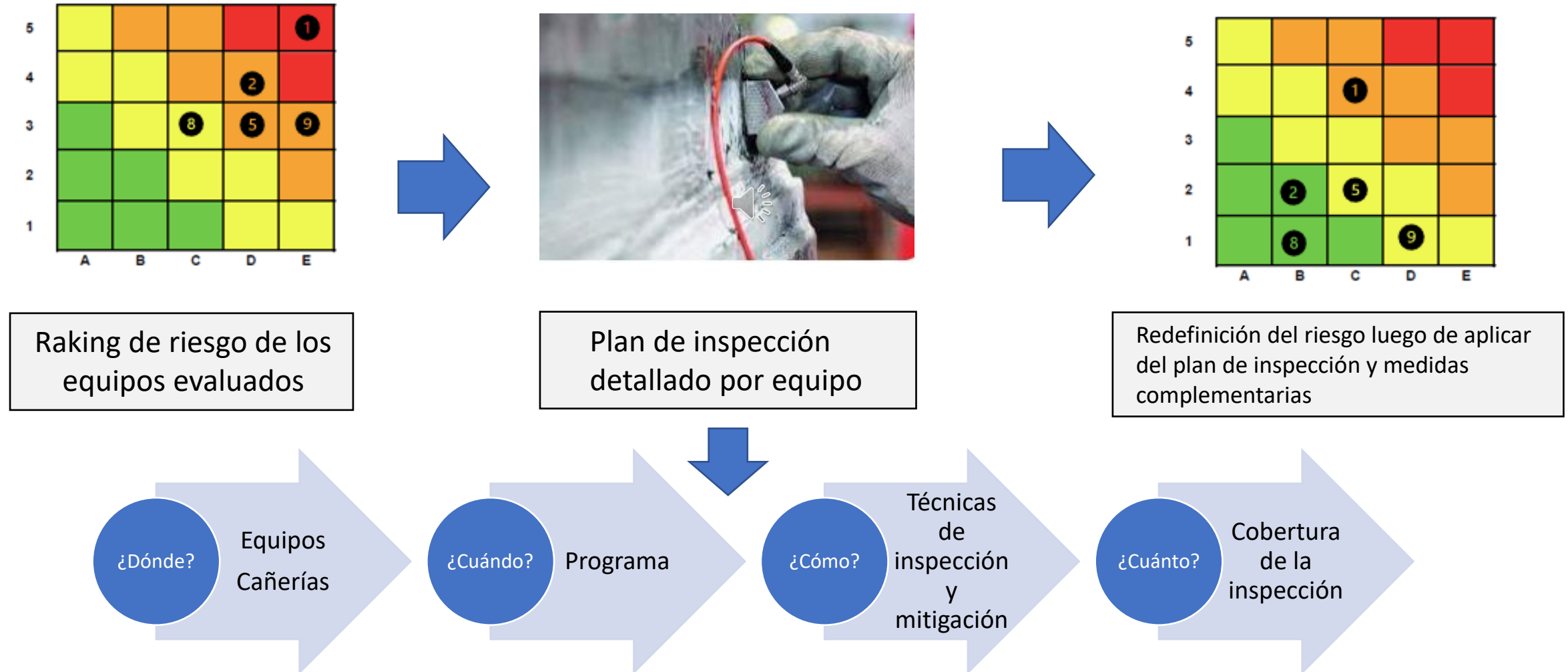
Riesgo = PoF × CoF — ubicar en la matriz de riesgo

5

Definir el Plan de Inspección

Método, extensión, intervalo y responsables

Inspección Basada en Riesgo (RBI)



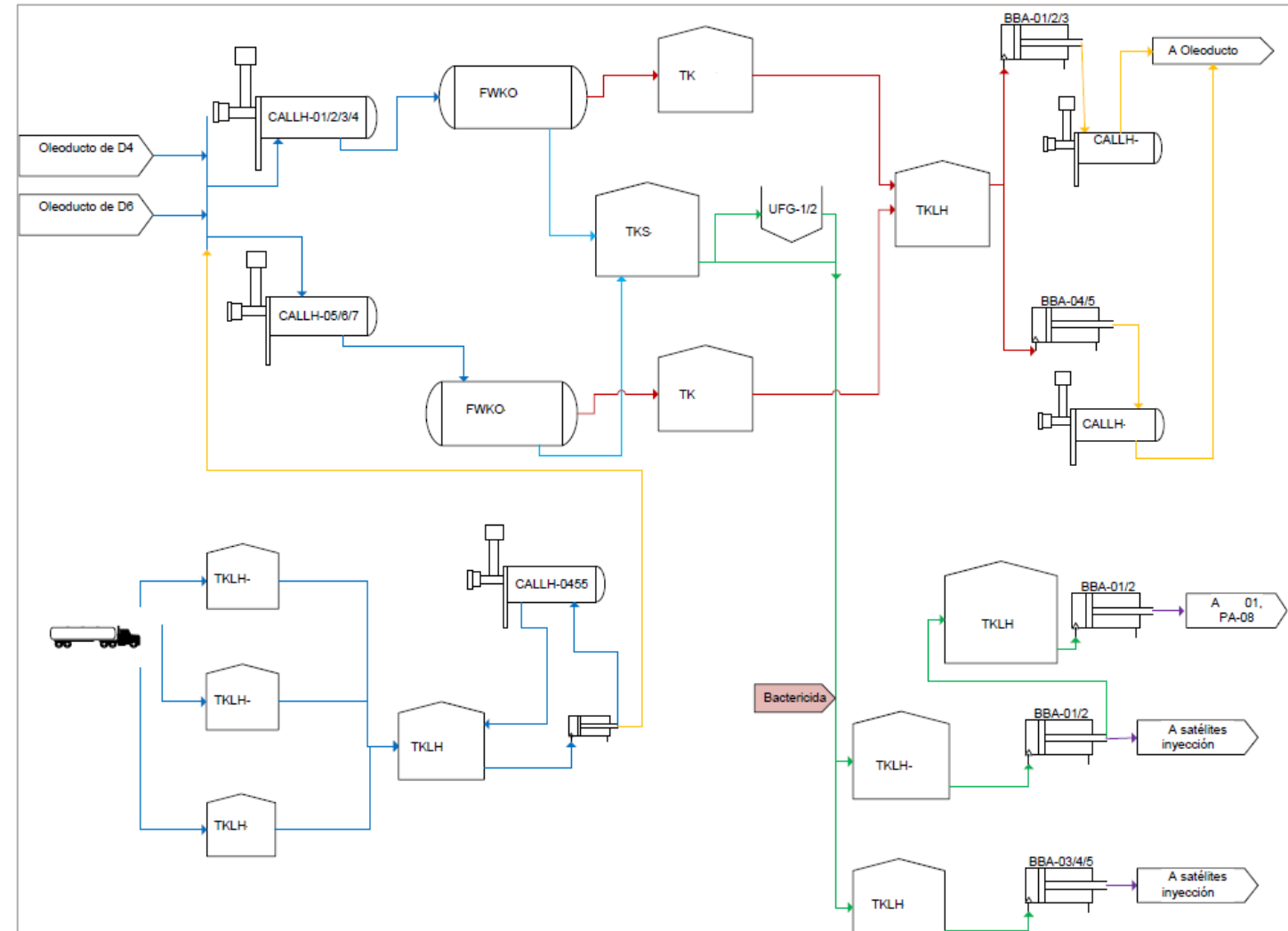
Inspección Basada en Riesgo (RBI)

En este diagrama se incorporan **datos de proceso**, **materiales** y factores que gobiernan los **mecanismos de daño**:

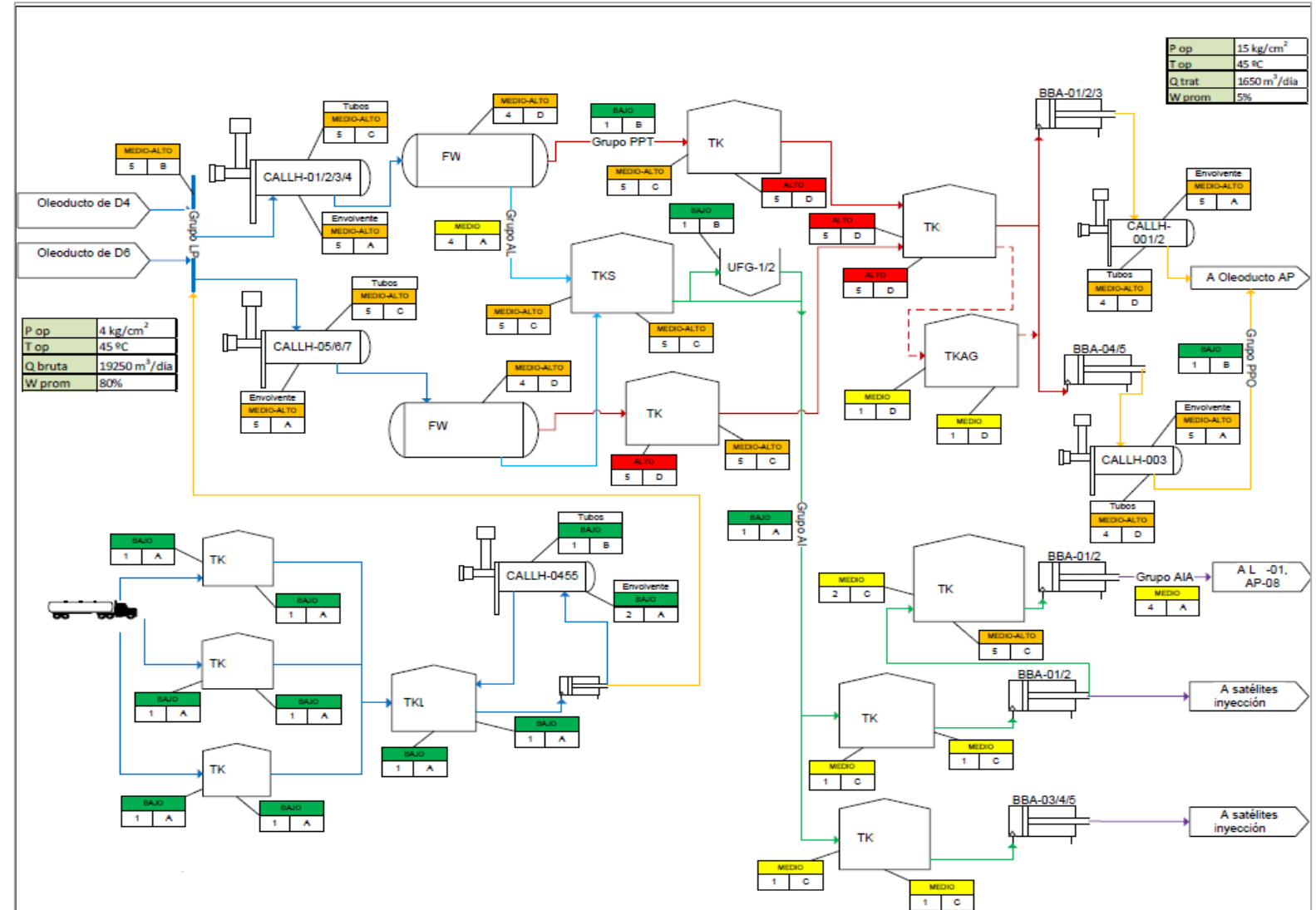
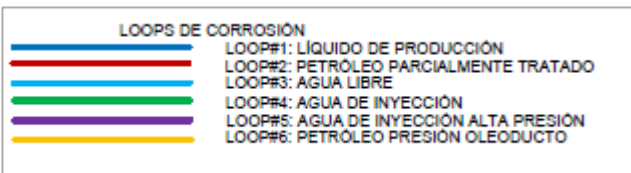
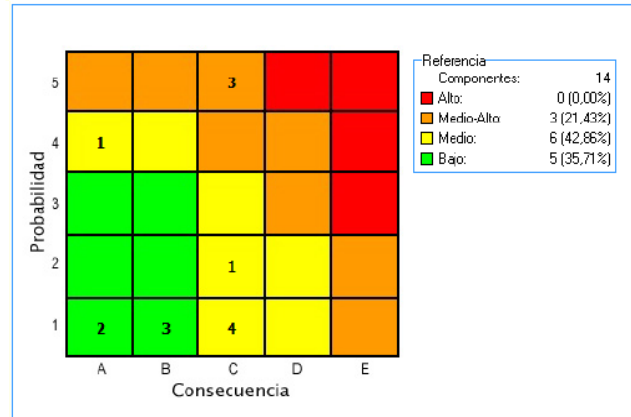
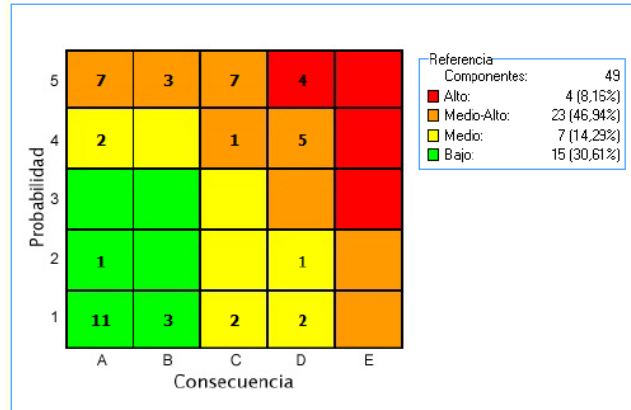
- ✓ Equipos y líneas activos conforme al flujo actual de proceso.
- ✓ Variables operativas clave.
- ✓ Especies agresivas en corrientes principales.
- ✓ Loops de corrosión.
- ✓ Puntos de monitoreo.
- ✓ Puntos de dosificación de productos químicos.

LOOPS DE CORROSIÓN

- LOOP#1: LÍQUIDO DE PRODUCCIÓN
- LOOP#2: PETRÓLEO PARCIALMENTE TRATADO
- LOOP#3: AGUA LIBRE
- LOOP#4: AGUA DE INYECCIÓN
- LOOP#5: AGUA DE INYECCIÓN ALTA PRESIÓN
- LOOP#6: PETRÓLEO MEDIA PRESIÓN



Inspección Basada en Riesgo (RBI)

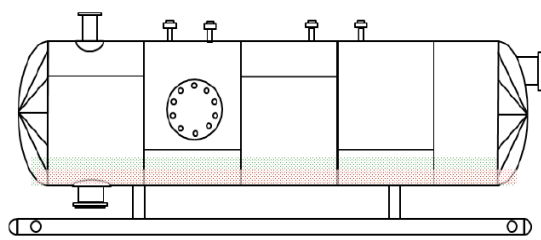
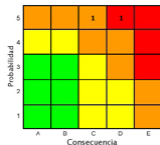


Inspección Basada en Riesgo (RBI)

Diseño del Plan de inspección

EQUIPO	MEC DAÑO	TIPO	ZONA INSPECCION	METODO	ALCANCE	EFFECTIVIDAD	F/S
Separadores bifásicos	MI	LOCALIZADA	INTERIOR EN OLIVENTE FONDO	VT INT + MD	100% A DETERMINAR POR VT	A-B	X
horizontales	HIS-002	LOCALIZADA	INTERIOR EN OLIVENTE FONDO	VT INT + MD + UT	100% A DETERMINAR POR VT	A-B	X
	CU	GRAL-LOCALIZADA	EXTERIOR EN OLIVENTE	VT EXT + MD + UT	100% A DETERMINAR POR VT	A-C	A

EFFECTIVIDAD: A=ALTA B=MODERADA C=POSIBLEMENTE EFECTIVA D=POCO EFECTIVA X=INEFECTIVA
F/S: X: FUERA DE SERVICIO A: AMBOS



Actualización de procedimientos de inspección

PLAN DE CALIDAD ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

CONTRATO No. MA-0031203

"SERVICIO DE MANTENIMIENTO CON PARADA DE PLANTA Y EN OPERACIÓN DE LAS UNIDADES DE PROCESO DE LA GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA DE ECOPETROL S.A. UBICADA EN BARRANCABERMEJA SANTANDER"

Concepto	Realizado por	Revisado por	Aprobado por	Fecha Ejecución o Revisión	Vigencia a Fecha de
Elaborado	MARIO A. MARTINEZ	EMERSON DELGADO	ROBERTO SALAS	20 de mayo 2014	20 de mayo 2014
Revisado	DAVID WANDERER	DAVID WANDERER	DAVID WANDERER	20 de mayo 2014	20 de mayo 2014

CONTROL DE ELABORACIÓN, REVISIONES Y VIGENCIAS

Elaborado por: MARIO A. MARTINEZ
Revisado por: DAVID WANDERER
Aprobado por: ROBERTO SALAS

Fecha de elaboración: 20 de mayo 2014
Fecha de revisión: 20 de mayo 2014
Fecha de aprobación: 20 de mayo 2014

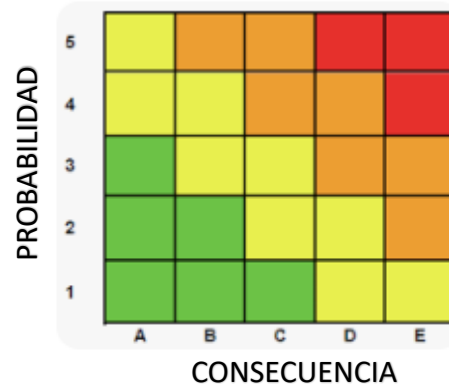
Elaborado por: MARIO A. MARTINEZ
Revisado por: DAVID WANDERER
Aprobado por: ROBERTO SALAS

Fecha de elaboración: 20 de mayo 2014
Fecha de revisión: 20 de mayo 2014
Fecha de aprobación: 20 de mayo 2014



Marcado de puntos de monitoreo de condición (CML)

Actualización del RBI



Medición de desempeño de indicadores de performance



Implementación y ejecución del plan





¡Muchas Gracias!