

Metodología para el cálculo de la mantenibilidad.

Máster Reinaldo I. Benítez Montalvo

Centro de Inmunología Molecular, Cuba

reynaldo@cim.sld.cu

Máster Armando Díaz Concepción

Instituto Superior Politécnico José A.Echevarría, Cuba

adiaz@ceim.cujae.edu.cu

Dr .Jesús Cabrera González

Instituto Superior Politécnico José A.Echevarría, Cuba

jcabrera@ceim.cujae.edu.cu

Resumen

A partir de las herramientas existentes para estimar la mantenibilidad y evaluar las medidas que de ella se derivan, se propone una metodología para el cálculo de esta que agrupa tres métodos (estadístico, gráfico- analítico y el costo). Los dos primeros brindan como salida las medidas de mantenibilidad y el último los costos más importantes relacionados con esta actividad. La información obtenida ayudara a facilitar la toma de decisiones.

Introducción

El desarrollo tecnológico actual y los cambios acelerados que en él se suscita ,exige cada vez más preparación del mantenedor, de los especialistas y del personal directivo encargado de responder de manera adecuada antes situaciones eventuales durante el proceso productivo al cual se deben.

El conocimiento del funcionamiento de los activos, la disposición de la documentación de los mismos, la existencia de los históricos sobre las averías presentadas, al igual que la tenencia de repuestos o la adquisición expedida de los mismos en el momento en que son necesarios son elementos indispensables para garantizar un mantenimiento eficiente y eficaz.

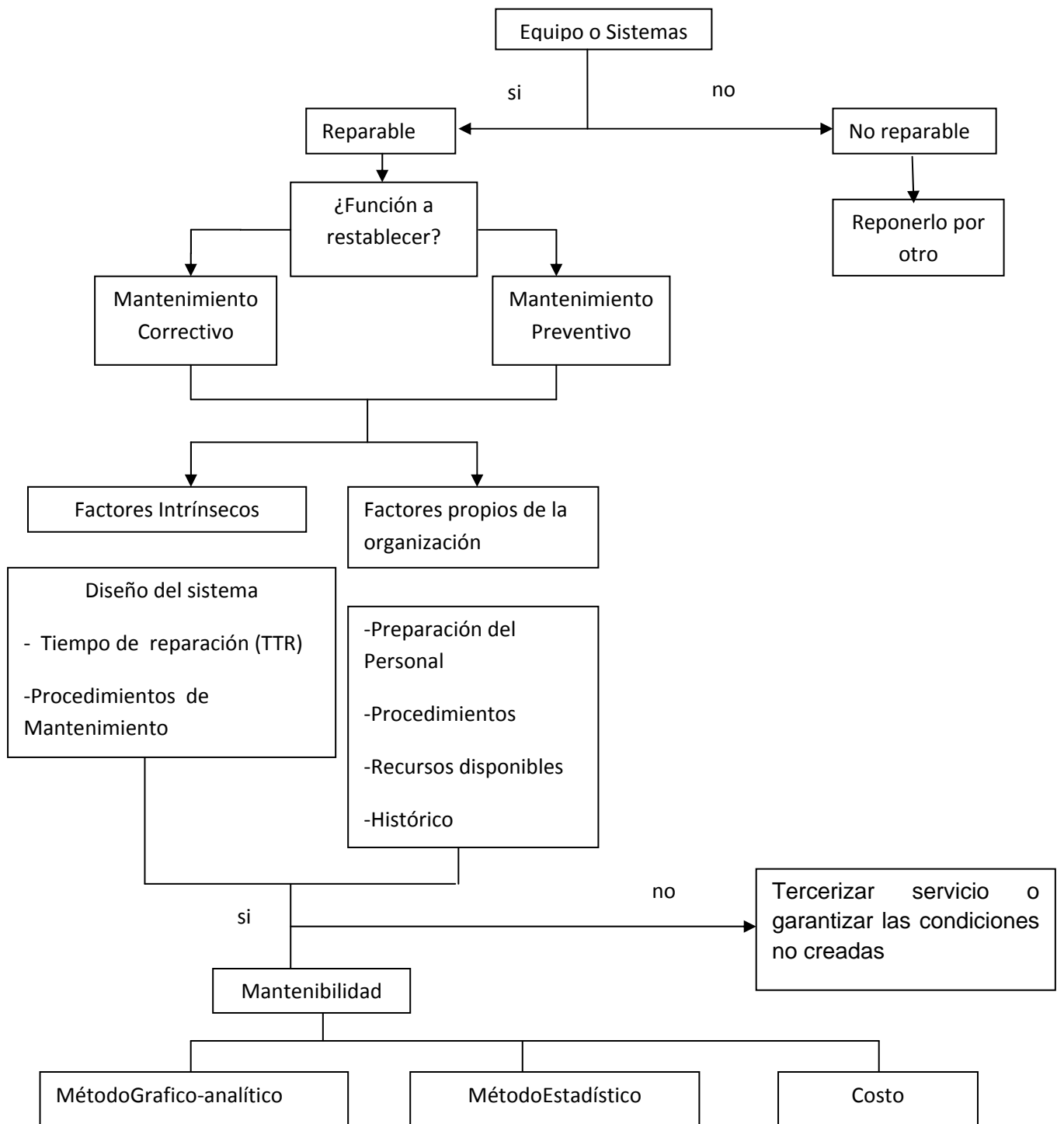
Durante la difícil tarea de decidir que acción tomar ante una situación dada nos apoyamos en herramientas e indicadores de mantenimiento como confiabilidad,

disponibilidad y mantenibilidad, siendo este último es el que más información ofrece a través de las medidas de mantenibilidad. Relacionar los métodos de evolución de la mantenibilidad con las medidas de mantenibilidad y los costos asociados a la actividad de mantenimiento es el objetivo de este trabajo al proponer una metodología para este fin.

1. Mantenibilidad

La mantenibilidad es la característica inherente de un elemento o sistema, asociada a su capacidad de ser **recuperado** para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento necesaria bajo condiciones prescritas, con **procedimientos y medios adecuados**, la cual restablece su **función** original nuevamente. Durante su ejecución se incurren en **gastos** necesarios cuyo valor varía en correspondencia con la complejidad de la intervención realizada. No es una propiedad o característica que debemos tener en cuenta sólo para la ejecución de reparaciones surgidas de averías imprevistas (**Mantenimiento Correctivo**), sino también para programar rutinas definidas en los **Planes de Mantenimiento Preventivo**.

Para que un sistema o equipo sea susceptible de ser mantenido deben cumplirse una serie de condiciones ver figura 1. Condiciones para que un equipo o sistema sea mantenido.



[1]

Figura 1. Condiciones para que un equipo o sistema sea mantenido

Si las condiciones necesarias para que un equipo o sistema sea susceptible de ser mantenido se cumplen en su totalidad entonces es posible estimar la mantenibilidad.

Durante el proceso estimación de la mantenibilidad se obtienen en dependencia del método empleado determinados parámetros que ayudan a la toma de decisiones denominados medidas de mantenibilidad.

2. Medidas de mantenibilidad

Las medidas mediante las cuales se puede **describir la mantenibilidad** están relacionadas con el tiempo en el cual el sistema se encuentra en reparación (TTR) y debido a que este tiempo no es constante se utilizan medidas tales como: *Tiempo medio entre fallas (MTBF)*, *Tiempo de recuperación (TTR)*, *Tiempo medio de recuperación MTTR*, *la función de mantenibilidad*, *la realización de la recuperación $RS(t_1, t_2)$* y *el tiempo porcentual de recuperación TTR%*. Estas son consideradas variables aleatorias y sólo pueden ser descritas de forma **probabilística**, para esto se utilizan herramientas estadísticas, tales como: **función de densidad, función de distribución, tasa de fallos, etc.**

Tabla 1. Tabla resumen que relaciona el tipo de distribución con el rango de valores disponibles en función de K

Período	Rata de fallas	K	Mecanismo de Falla	Distribución
Arranque	Descendente	0,5 - 0,95	Paradas administrativas	Weibull
		0,95 - 1,05	Esfuerzo	
Operación normal	Constante	1.3	Fatiga	Exponencial y Weibull
		2.5	Corrosión	
Desgaste	Ascendente	3.5	Desgaste	Normal y Weibull
Reparación general				Logo-normal

K se define como la sumatoria de las probabilidades de los valores posibles de dicha variable, que sean **menores** o iguales a un valor prefijado.

Las leyes de distribución de densidad más utilizadas para estudiar la mantenibilidad son:

Normal: Cuando el tiempo total de reparación es ocupado mayormente en tareas de desarme – armado.

Exponencial: Para aquellas situaciones en que el diagnóstico y el tiempo medio de reparación (MTTR) son bajos.

Logonormal: Para casos en los que el tiempo total de reparación está constituido por varios tiempos diferentes, diagnóstico, desarme y armado, disponibilidad de los repuestos y herramientas, etc.; y, además, cuando la relación entre ellos no sigue un patrón definido.

Weibull: En particular esta distribución es la más flexible para adaptarse a los datos, por contar tres parámetros (forma, escala & posición)

[2]

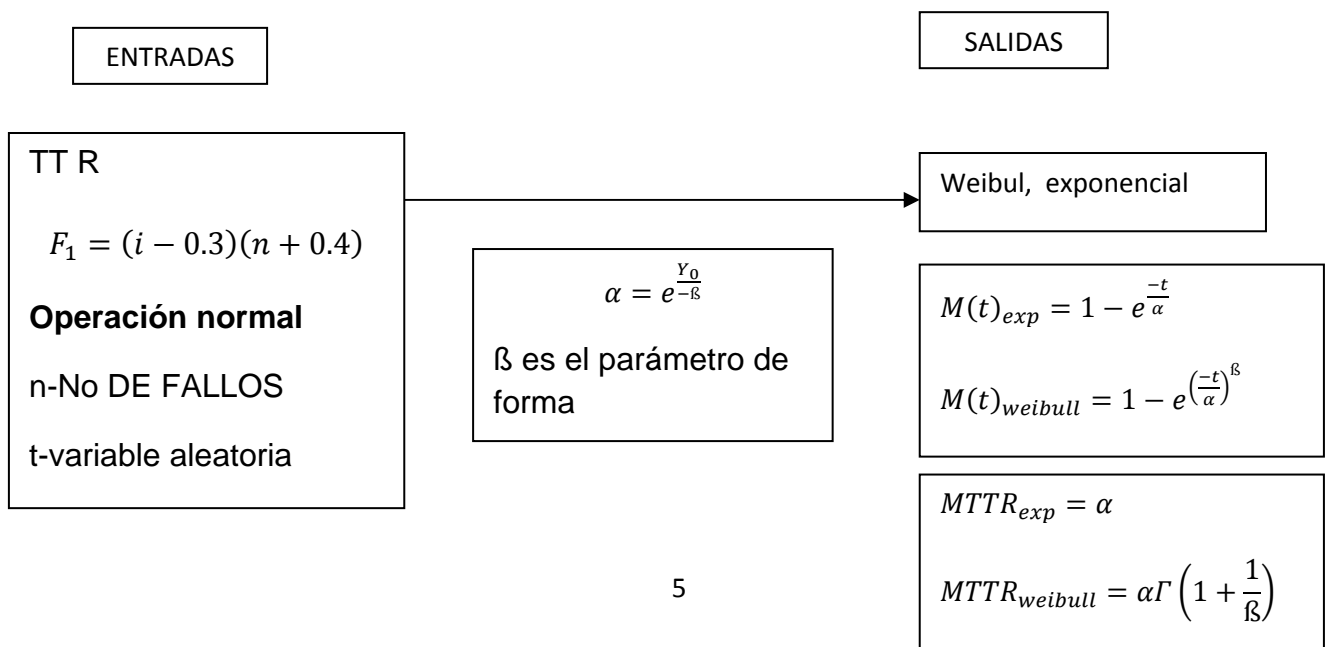
3. Métodos para estimar la mantenibilidad

- Método grafico-analítico
- Método estadístico
- Costo

3.1 Método gráfico-analítico

- Método de ajuste de la distribución
- Distribución de Gumbell tipo I

Método de ajuste de la distribución

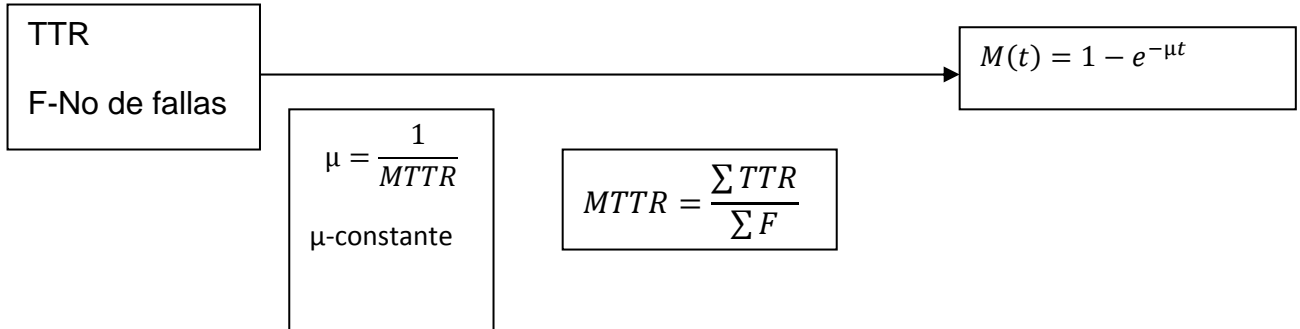


$$TTR_{\%exp} = -aln[1 - M(t)]$$

$$TTR_{\%weibull} = \alpha \left[-ln(1 - M(t))^{\frac{1}{\beta}} \right]$$

$$RS(t_1, t_2) = \frac{M(t_2) - M(t_1)}{1 - M(t_1)}$$

No. Orden (i)	Tiempos	Función Empírica	Exp.	Weibull	Exp.	Weibull
		$F(i) = \frac{i - 0.3}{n + .4}$	$-\ln[1-F(i)]$	$\ln [\ln(1/(1-F(i)))]$	t	$\ln(t)$

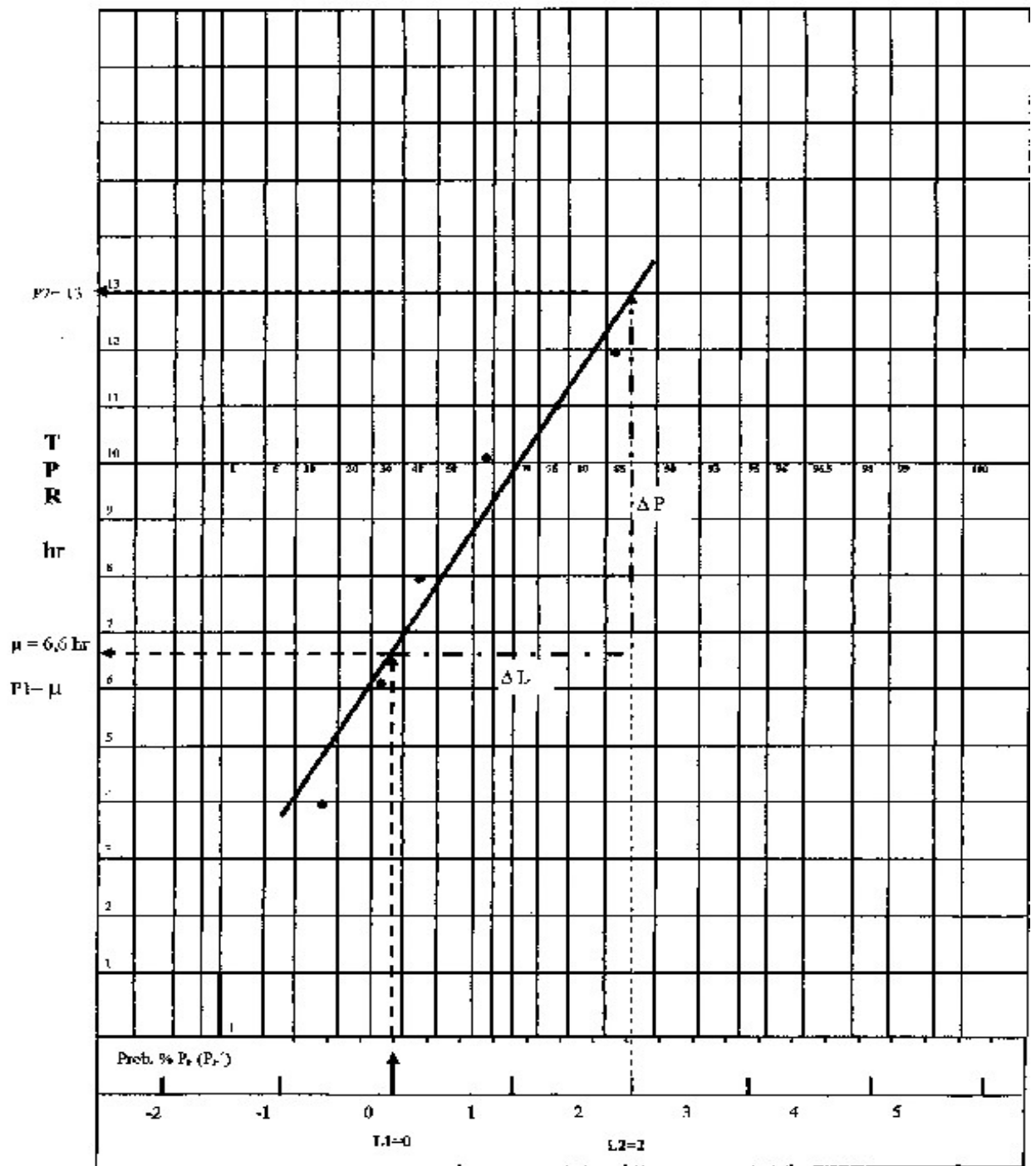


**CALCULO DE MANTENIBILIDAD
METODO ANALITICO:**

HOJA DE TRABAJO			
CALCULO DE MANTENIBILIDAD			
	TPR (HR)	Pf	Pf'
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

$$TPPR_a = \frac{\sum TPR}{N} = \quad \text{HR}$$

- 1 Se tomarán los valores de TPR del Historial de Fallas del equipo, todos menos el ultimo (8 hr), y se vacían en la hoja de cálculo de mantenibilidad. (HOJA DE TRABAJO)
- 2 Se deben ordenar los valores obtenidos de menor a mayor, es decir, de 4 a 12.
- 3 Se deben sumar todos los valores de TPR para obtener el valor de = 99,0 hr.
- 4 A la sumatoria de TPR (Tiempo Para Reparar) se le divide entre el numero de Fallas menos una N = 12, así obtenemos el Tiempo Promedio Para Reparar analítico, es decir, el TPPRa = 8.25 hr.
- 5 Se tomaran los datos de PF (Probabilidad de Falla) calculados en la hoja para el cálculo de confiabilidad.
- 6 La columna Pf se usa para cuando hay valores de TPR muy similares, en ese caso se promedian los Pf de dichos valores, sea los casos 4(3) hr 8(2), 10(3) y 12 (2) hr. (valores 0,15 - 0,42 - 0,62 y 0,88 respectivamente)
- 7 Una vez obtenidos estos valores de TPR y PF o Pf' estos se graficaran en la Distribución de Gumbell Tipo I, para obtener los valores de Edad característica para fallar y para el calculo de la pendiente de la recta.
- 8 Una vez graficados los puntos, estos se unirán mediante un ajuste de curva (recta) abarcando la mayor cantidad puntos, sin considerar los puntos muy alejados del ajuste.



- 9 En la grafica observara varias líneas de color:
 Partiendo de la flecha $L=0$, (que representa el percentil 37%) interceptamos verticalmente la curva ajustada, trazamos una línea horizontal hacia la izquierda y obtenemos el valor de $\mu = 6,6$ hr.
 Edad característica para reparar (Línea roja)
 Este valor de μ lo tomaremos como el valor de $P_1 = 6,6$ hr para el calculo de la pendiente, para un valor de $L_1 = 0$.
 Partiendo de un valor de $L = 2$, verticalmente, interceptamos la recta ajustada y obtenemos $P_2 = 13$ hr. (Línea azul punteada)
- 10 Una vez obtenidos estos valores reemplazamos dichos datos en la hoja de calculo y obtendremos:
- El diferencial de TPR o $\Delta P = 6,40$ hr
 - El diferencial de L o $\Delta L = 2$ (si se toma cualquier L de esta escala dará el mismo resultado, solo cambia P)
- 11 Se calculará automáticamente (al utilizar el programa de excel):
- La pendiente de la recta será $P = 3,2$ en hr.
 - El inverso de la pendiente $1/P = a = 0,31 \text{ hr}^{-1}$ (Valor parámetro de forma)
 - El valor del Tiempo Promedio Para Reparar gráfico $TPPR_g = 8,45$ hr
 - Porcentaje de Error % Error = 2. El porcentaje de error permitido es de +/- 10%.
 - A continuación se verán los valores de Probabilidad de Falla (Mantenibilidad) actual $P_f(8,45 \text{ hr}) = 55\%$ y el valor de Probabilidad de Falla para un valor ligeramente mayor que la edad característica para fallar = $6,7$ hr de 38%. como valor ideal de Mantenibilidad.
 El valor de μ será el tiempo ideal para lograr la reparación del equipo en cuestión.

CALCULO DE MANTENIBILIDAD GRAFICA

$$\mu = 6,6 \quad \text{HR (Edad característica para reparar)}$$

$$P_2 = 13,00 \quad \text{HR}$$

$$P_1 = 6,6 \quad \text{HR}$$

$$\Delta P = 6,40 \quad \text{HR}$$

$$L_2 = 2,00$$

$$L_1 = 0,00$$

$$\Delta L = 2,00$$

Pendiente de la Mantenibilidad $P =$

$$P = \Delta P / \Delta L = 3,2 \quad \text{hr}$$

$$a = 1 / P = 0,31 \quad \text{hr}^{-1}$$

$$TPPR_g = \mu + 0,5778 / a = 8,45 \quad \text{HR}$$

$$\% \text{ Error} = (TPPR_g - TPPR_a) / TPPR_a * 100$$

$$\text{Error} = 2\%$$

$$P_f(T < t) = \text{Exp}(-\text{Exp}(-a(t - \mu)))$$

$$\text{Para } TPPR_a \quad t \text{ (HR)} = 8,25 \text{ Hr}$$

$$\text{Para } TPPR_R \quad t_R \text{ (HR)} = 6,7 \text{ Hr}$$

$$P_f(t) = 55\%$$

$$P_f(t) = 38\%$$

COMENTARIOS DEL METODO GRÁFICO: A diferencia de otros métodos, utilizaremos la Distribución de los valores extremos o Ley de Gumbell Tipo I, que tiene un papel funcional (semi-log) de fácil uso.

$$P_f(TR \leq t) = \frac{1}{e^{e^{-a(t-\mu)}}}$$

TR = tiempo real, que se emplearía en la ejecución del próximo trabajo.

t = Tiempo estimado para el próximo trabajo (Hr),

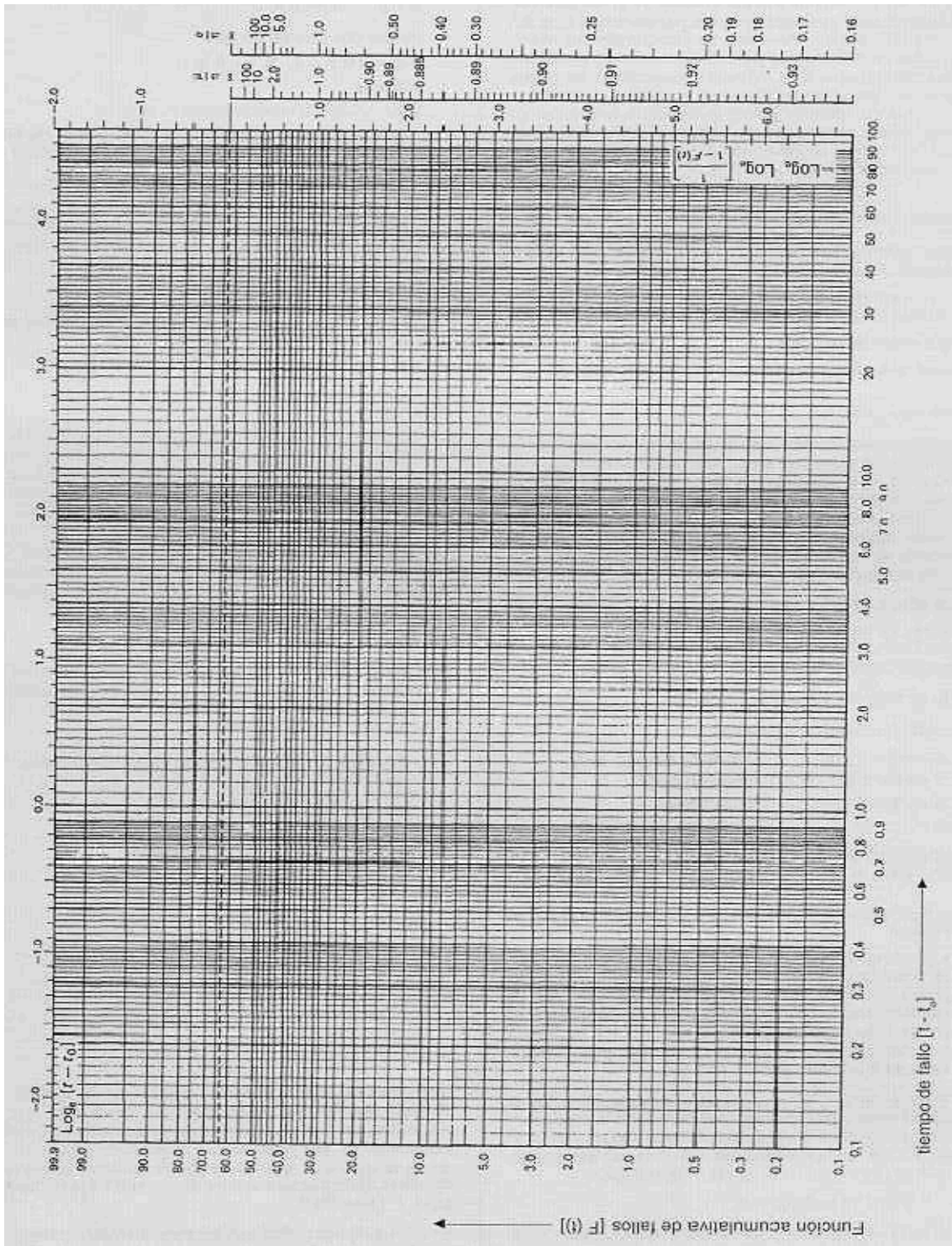
a = Parámetro de forma, igual al inverso de la pendiente de la desviación estándar.

μ = Parámetro de posición (Tiempo característico para reparar, tiempo ideal mínimo para realizar la reparación, Hr)

De los parámetros anteriores lograremos obtener el $TPPR_g$ (Tiempo Promedio Para Reparar gráfico), es decir:

$$TPPR_g = \mu + \frac{0.5778}{a}$$

Muestra del papel de Weibull



3.2 Método estadístico

- Método paramétrico

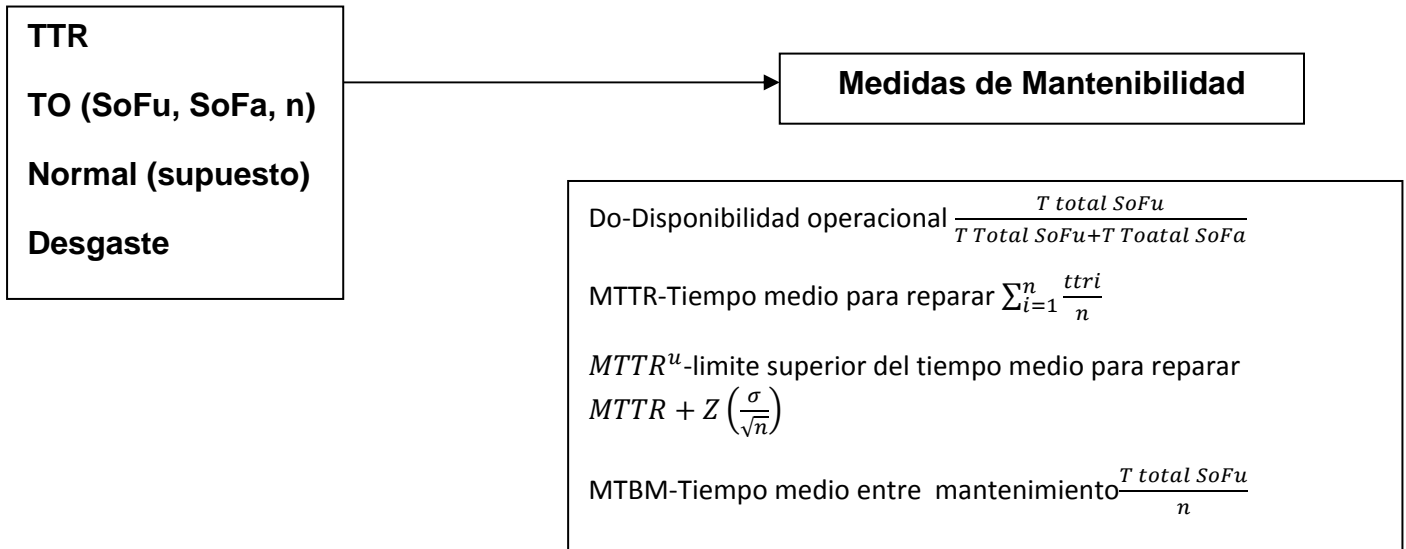


Tabla 2. Registro de operaciones

Estado del equipo	Inicio	Final	En Función	TTR en parada
SoFu				
SoFa				
SoFu				

- Columna 1: Estado del sistema o equipo, SoFu estado de funcionamiento y SoFa estado de falla o parada del equipo.
- Columna 2: El tiempo de inicio y final de cada estado del equipo.
- Columna 3: Los intervalos de tiempo en el cual el equipo se encuentra ya sea en funcionamiento T_{SoFu} o en parada T_{SoFa} .
- Además al final de la tabla se encuentra $_ T_{SoFu}$ el cual es el tiempo total de funcionamiento del equipo y $_ T_{SoFa}$ el cual es el tiempo tota en parada.

3.3 Costos asociados a Mantenimiento

En el caso de la industria farmacéutica, se debe prestar especial atención a las áreas claves del mantenimiento que impactan la rentabilidad del negocio, como lo son: planificación y programación del mantenimiento, costos del mantenimiento y la confiabilidad operacional.

[3]

El mantenimiento como elemento indispensable en la conformación de cualquier proceso productivo genera un costo que es reflejado directamente en el costo de producción del producto, es por ello que la racionalización objetiva de los mismos permitirá ubicar a una empresa dentro de un marco competitivo. A través de la historia el costo de mantenimiento ha sido visto como un mal necesario dado que siempre había sido manejado como un instrumento de restitución global sin considerar los costos de oportunidad de la inversión, por otra parte no se cuantificaba la real necesidad del mismo en cuanto al momento de su ejecución, la magnitud adecuada del alcance del trabajo y los requerimientos de calidad que permitieran asegurar la acción de mantenimiento por el periodo de operabilidad establecido en los análisis.

A continuación se enumeran algunos costos asociados a Mantenimiento:

- Mano de Obra: Incluye fuerza propia y contratada.
- Materiales: Consumibles y Componentes de Reposición.
- Equipos: Equipos empleados en forma directa en la ejecución de la actividad de mantenimiento.
- Costos Indirectos: Artículos del personal soporte (supervisorio, gerencial y administrativo) y equipos suplementarios para garantizar la logística de ejecución (transporte, comunicación, facilidades).
- Tiempo de Indisponibilidad Operacional: Cualquier ingreso perdido por ausencia de producción o penalizaciones por riesgo mientras se realiza el trabajo de mantenimiento.

Costos según la relación directa con las operaciones de mantenimiento

El costo de mano de obra interna se debe calcular teniendo en cuenta el tiempo empleado en la intervención multiplicado por las horas hombres y el de la mano de obra externa previo convenio entre el contratista y el encargado de mantenimiento.

- **Costo relativo con personal propio**

Relación entre los gastos con mano de obra propia y el costo total del área de mantenimiento en el periodo considerado.

$$CRPP = \frac{\sum CMOP}{CTMN} \times 100 \quad (1)$$

- Costo de Capacitación

Relación entre el costo de entrenamiento del personal de mantenimiento y el costo total de mantenimiento.

$$CTET = \frac{\sum CEPM}{CTMN} \times 100 \quad (2)$$

Este índice representa los elementos de gastos de mantenimiento invertido en el desarrollo del personal a través de entrenamientos internos y externos, pudiendo ser complementado con el índice del costo de capacitación "per.-capita", o sea, la inversión en capacitación por la cantidad de personal entrenado

- Costo de Mano de Obra Externa

Relación entre los gastos totales de mano de obra externa (contratación eventual y/o gastos de mano de obra proporcional a los servicios de contratos permanentes) y la mano de obra total empleada en los servicios (propia y contratada), durante el período considerado.

$$CRMT = \frac{\sum CMAT}{CTMN} \times 100 \quad (3)$$

En el cálculo de ese índice pueden ser considerados todos los tipos de mano de obra contratada sea por servicios permanentes o eventuales.

Para el costo de repuesto se debe tener en cuenta que si estos estaban previamente almacenados, durante la actividad de mantenimiento se debe considerar el precio actual en el mercado y no el precio por el cual fue ingresado al almacén, y la factura cuando son comprados en el momento.

- **Inmovilizado en Repuestos**

Relación entre el capital inmovilizado en repuestos y el capital invertido en equipos

$$IMRP = \frac{\sum CIRP}{\sum CIEQ} \times 100 \quad (4)$$

Se debe tener cuidado en el cálculo de este índice para considerar los repuestos específicos y parte de los no específicos utilizados en los equipos bajo la responsabilidad de la área de mantenimiento, siendo pues un índice que generalmente se torna difícil de calcular debido al establecimiento de esta proporcionalidad.

En cuanto al material fungible sea específico o general se considera el coste según la cantidad usada. La amortización de equipos y herramientas de uso general se considera proporcional al tiempo de intervención.

- **Costo relativo con material**

Relación entre los gastos con material y el costo total del área de mantenimiento en el periodo considerado

$$CRMT = \frac{\sum CMAT}{CTMN} \quad (5)$$

- **Costos de Almacenamiento.**

Todo material almacenado genera determinados costos, a los cuales se denomina costos de existencias; los costos de existencias dependen de dos variables; la cantidad en existencias y tiempo de permanencia en existencias. Cuanto mayor es la cantidad y el tiempo de permanencia, mayores serán los costos de existencias.

El costo de existencias (CE) es la suma de los costos: el costo de almacenamiento (CA) y el costo de período (CP).

- Costo de Almacenamiento:

El **costo de almacenamiento (CA)** se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CA = \frac{Q}{2 \times T \times P \times I} \quad (6)$$

Donde:

Q = cantidad de material en existencia en el período considerado.

T = Tiempo de almacenamiento.

P = Precio Unitario de material

I = Tasa de almacenamiento expresada en porcentaje del precio unitario.

Sin embargo, el **CA** esta compuesto por una parte variable (la cantidad de material y el tiempo) y una parte fija (alquiler de la bodega, salarios del personal de la bodega, seguro contra incendio y robo, maquinarias y equipos instalados, entre otro). La parte fija no depende de la cantidad y tiempo de almacenamiento. Por ello, es prudente utilizar una formula más amplia – la tasa de almacenamiento (TA) que constituye la suma de las siguientes tasas (tasas expresadas en porcentaje):

Ta = Tasa de almacenamiento Físico:

$$T_a = \frac{100 \times A \times C_a}{C \times P} \quad (7)$$

Donde:

A = Área ocupada por las existencias.

Ca = Costo anual del metro cuadrado de almacenamiento.

C = Consumo anual del material.

P = Precio Unitario material.

T_b = Tasa de retorno del capital detenido en existencias:

$$T_b = \frac{100 \times \text{Ganancia}}{Q \times P} \quad (8)$$

Donde:

Q x P = Valor de los productos almacenados.

T_c= Tasa de seguros del material almacenado

T_c= 100x Costo anual del equipo/Q x P

T_d= Tasa de transporte, manipulación y distribución del material

T_d = 100x devaluación anual del equipo/Q x P

T_e= Tasa de obsolescencia del material:

$$T_e = \frac{\text{Perdidas anuales por antigüedad}}{Q \times P} \times 100 \quad (9)$$

En resumen, la **tasa de almacenamiento (TA)** es la suma de todas las tasas explicadas:

$$T_A = T_a + T_c + T_d + T_e \quad (10)$$

- **Costo sobre inversiones**

Durante el diseño inicial de una planta de producción lo correcto es comprar equipos que minimicen el costo global de mantenimiento durante su ciclo de vida, sin embargo se realizan compras de equipos cuyas inversiones iniciales son mayores que en otros que cumplen los mismos requisitos pero cuyos costos de intervención y mantenimiento asociados se estiman menores, para tener en cuenta esta sobre inversión se amortiza la diferencia sobre la vida útil del equipo, así es posible identificar en el costo global las inversiones extras requeridas para disminuir los demás componentes del costo.

Los costos de mantenimiento de la inversión en inventarios se clasifican en tres grandes grupos:

- 1) Costo de adquisición o compra.
- 2) Costo de renovación o de pedido.
- 3) Costo de posesión del inventario.

Costo de Adquisición o Compra.

Este costo está dado por el resultado obtenido de multiplicar la cantidad de unidades compradas por su precio unitario. Cuando un artículo es fabricado total o parcialmente por la propia empresa, la determinación de su costo ya no resulta tan simple, es preciso entonces hacer uso de métodos o criterios contables para la determinación del costo.

Costo de Renovación o de Pedido.

Cada lote o pedido que se ordena a un determinado proveedor origina gastos, ya sean de tramitación, preparación de la orden de compra, transporte, recepción descarga, etc. Buena parte de estos costos son fijos, por lo cual al aumentar el volumen del pedido se reduce el costo unitario por este concepto.

Costo de Posesión del Inventario.

La posesión del inventario origina una serie de gastos, algunos de ellos aparentemente poco significativos, quizá debido a ello, el costo de posesión del inventario haya sido siempre no muy conocido y a veces hasta olvidado por los analistas. Entre los conceptos de costo que son motivados por la posesión del inventario se citan los siguientes:

- *Alquiler de las bodegas:* Todo inventario necesita un lugar adecuado para protegerlo y guardarlo. Si la bodega es alquilada, el costo por este concepto debe aplicársele al inventario correspondiente.
- Costo de Almacenamiento: Cuando se reciben los artículos en las bodegas deben ordenarse y almacenarse adecuadamente. Algunas veces hasta se hace necesario utilizar equipo especial como

montacargas o grúas paramovilizarlos y colocarlos en un lugar apropiado.

- Costo de Conservación del Inventario: Existen productos que necesitan cuidados especiales para que no se deterioren mientras se encuentren en las bodegas, como por ejemplo: refrigeración, calor, engrasado, lubricación, etc.
- Control de Bodegas: Debido al movimiento de entradas y salidas constantes se hace necesario disponer de un buen sistema de control contable con el propósito de mantener los registros actualizados.
- Obsolescencia: Este costo es difícil de estimar con precisión, reviste gran importancia cuando se trata de artículos que pasan de moda con mucha facilidad. La competencia y el desarrollo tecnológico hacen que frecuentemente aparezcan en el mercado productos nuevos con ventajas adicionales en relación a los existentes en el mercado. Esto origina una devaluación por obsolescencia en cierto tipo de inventario.
- Seguros: Es necesario proteger los inventarios por daños que puedan sufrir a consecuencia de incendios, robos o cualquier otro accidente, debido a lo cual, hay que pagar primas de seguros de acuerdo al valor asegurado de las existencias.
- Inmovilización financiera: Los fondos que se usan para financiar la inversión en inventarios tienen un costo para la empresa. Incluso, si se trata de fondos propios, a la inmovilización financiera por este concepto hay que asignarle un costo - costo de oportunidad - ya que esos recursos se podrían haber desplazado en otras inversiones que produzcan cierta rentabilidad con un menor riesgo, tales como - bonos, acciones u otros valores.

Costos por pérdida de producción

- **Componente del Costo de Mantenimiento**

Relación entre el costo total del mantenimiento y el costo total de la producción.

$$CCMN = \frac{CTMN}{CTPR} \times 100 \quad (11)$$

El costo total de la producción incluye los gastos directos e indirectos de ambas dependencias (operación y mantenimiento), inclusive los respectivos lucros cesantes.

- Progreso en los Esfuerzos de Reducción de Costos

Relación entre el trabajo en mantenimiento programado y el costo de mantenimiento por facturación.

$$PERC = \frac{TBMP}{CMFT} \times 100 \quad (12)$$

Este índice indica la influencia de la mejoría o empeoramiento de las actividades de mantenimiento bajo control con relación al costo de mantenimiento por facturación arriba indicado.

- Costo de Mantenimiento con relación a la Producción

Relación entre el costo total de mantenimiento y la producción total en el período.

$$CMOE = \frac{\sum CMOC}{\sum (CMOC + CMOP)} \times 100 \quad (13)$$

Esta relación es dimensional, toda vez que el denominador es expresado en unidades de producción (ton, Kw., Km. recorridos etc.)

- Costo de Mantenimiento por Valor de Venta

Relación entre el costo total de mantenimiento acumulado de un determinado equipo y el valor de venta de ese equipo.

$$CMVD = \frac{\sum CTMN}{VLVD} \times 100 \quad (14)$$

- **Costo global de mantenimiento**

Valor de reposición menos la suma del Valor de Venda con el Costo Total de Mantenimiento de un determinado equipo.

$$CMVD = VLRP - (VLVD + CTMN)$$

Los costos, en general, se pueden agrupar en dos categorías, los que tienen relación directa con las operaciones de mantenimiento como, costos administrativos, de mano de obra, de materiales, de repuestos, de subcontratación, de almacenaje y costo de capital y costos por pérdida de producción a causa de fallas de equipos, por disminución de la tasa de producción y pérdidas por fallas en la calidad del producto al mal funcionamiento de los equipos.

Costo global de mantenimiento: El costo global de mantenimiento es la suma de cuatro costos

Costo de intervenciones (Ci)
 Costo de fallas (Cf)
 Costo de almacenamiento (CA)
 Costo sobre inversiones (Csi)

$$Cg = Ci + Cf + CA + C \quad (15)$$

$$Ci = Cmo + Cra + Cmf \quad (16)$$

Cmo-costo de mano de obra interna o externa

Cra-costo de repuesto en almacén o comprado para intervención

Cmf-Costo de material fungible

Cf-Costos por pérdida de utilidad debido a problemas directos de mantenimiento correctivo o preventivo.

Ca- costos incurridos en financiar y manejar el inventario de piezas de repuestos e insumos necesarios par el mantenimiento.

Costo de mantenimiento por facturación (CMTF) y costo de mantenimiento por valor de reposición (CMRP).

[4]

Costo de mantenimiento por facturación CMTF:

Relación entre el costo total de mantenimiento y la facturación de la empresa en el periodo analizado

$$CMFT = \frac{CTMN}{FTEP} \times 100 \quad (17)$$

Costo de mantenimiento por valor de reposición CMRP:

$$CMRP = \frac{\sum CTMN}{VLRP} \times 100 \quad (18)$$

El **costo de almacenamiento (CA)** se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CA = \frac{Q}{2 \times T \times P \times I} \quad (19)$$

Donde:

Q = cantidad de material en existencia en el período considerado.

T = Tiempo de almacenamiento.

P = Precio Unitario de material y,

I = Tasa de almacenamiento expresada en porcentaje del precio unitario.

Ta = Tasa de almacenamiento Físico:

$$Ta = \frac{100 \times A \times Ca}{C \times P} \quad (20)$$

Donde:

A = Área ocupada por las existencias.

Ca = Costo anual del metro cuadrado de almacenamiento.

C = Consumo anual del material.

P = Precio Unitario material.

Tb = Tasa de retorno del capital detenido en existencias:

$$Tb = \frac{100 \times Ganancia}{Q \times P} \quad (21)$$

Donde:

Q x P = Valor de los productos almacenados.

Tc = Tasa de seguros del material almacenado

$$Tc = \frac{100 \times \text{Costo anual de equipo}}{Q \times P} \quad (22)$$

Td = Tasa de transporte, manipulación y distribución del material

$$Td = \frac{100 \times \text{devaluacion anual de equipo}}{Q \times P} \quad (23)$$

Te= Tasa de obsolescencia del material:

$$Te = \frac{100 \times \text{Perdidas anuales por antigüedad}}{Q \times P} \quad (24)$$

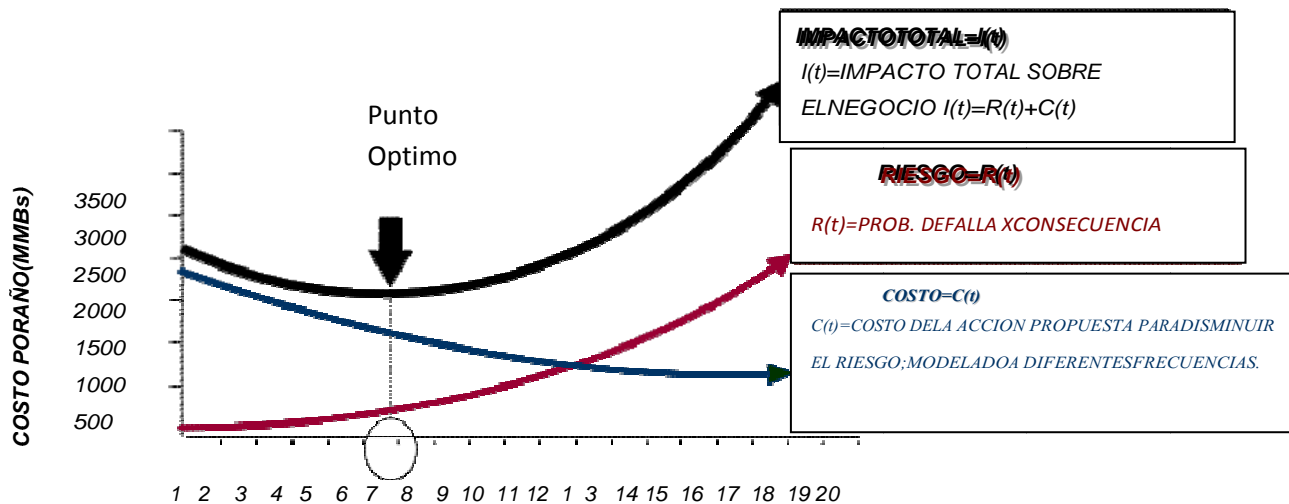
En resumen, la tasa de almacenamiento (TA) es la suma de todas las tasas explicadas:

$$TA = Ta + Tb + Tc + Td + Te \quad (25)$$

[5], [6], [7]

En años recientes, grandes corporaciones especialmente del sector de hidrocarburos y de la industria de procesos, han volcado su atención hacia el modelo de decisión “Costo Riesgo”, debido a que el mismo permite comparar el costo asociado a una acción de mantenimiento contra el nivel de reducción de riesgo o mejora en el desempeño debido a dicha acción.; en otras palabras, el modelo permite saber “cuanto obtengo por lo que gasto”.

El análisis “Costo-Riesgo” resulta particularmente útil para decidir en escenarios con intereses en conflicto, como el escenario “**Operación – Mantenimiento**”, en el cual el operador requiere que el equipo o proceso opere en forma continua para garantizar máxima producción, y simultáneamente, el mantenedor requiere que el proceso se detenga con cierta frecuencia para poder mantener y ganar confiabilidad en el mismo. El modelo Costo-Riesgo es el indicado para resolver el conflicto previamente mencionado, dado que permite determinar el nivel óptimo de riesgo y la cantidad adecuada de mantenimiento, para obtener el máximo beneficio o mínimo impacto en el negocio.



INTERVALO DE TIEMPO (ANOS)

Figura 2. Curva de análisis costo-Riesgo

- La curva del nivel de riesgo (riesgo = probabilidad de falla x consecuencia), asociado a diferentes periodos de tiempo o frecuencias de mantenimiento

- La curva de los costos de mantenimiento, en la cual se simulan los costos de diferentes frecuencias para la acción de mantenimiento propuesta

La curva de impacto total, que resulta de la suma punto a punto de la curva de riesgos y la curva de los costos de mantenimiento. El “mínimo” de esta curva, representa la frecuencia para la cual la suma de los costos de la política de mantenimiento con el nivel de riesgo asociado a esta política son mínimos; es decir hay el “mínimo impacto posible en el negocio” Este mínimo está ubicado sobre el valor que puede traducirse como el periodo o frecuencia óptima para la realización de la actividad de mantenimiento. Un desplazamiento hacia la derecha de este punto implicaría “asumir mucho riesgo” y un desplazamiento hacia la izquierda del mismo implicaría “gastar demasiado dinero”.

La dificultad para el uso del modelo, se centra en la estimación o modelaje de la curva del riesgo, ya que la misma requiere la estimación de la probabilidad de falla (y su variación con el tiempo), y las consecuencias. En la próxima sección, se detallan las herramientas para lograr el correcto modelaje y estimación del riesgo.

El riesgo $R(t)$, base fundamental del modelo de decisión descrito en la sección anterior, es un término de naturaleza probabilística, que se define como “egresos o pérdidas probables consecuencia de la probable ocurrencia de un evento no deseado o falla”, y comúnmente se expresa en unidades monetarias, (Bs. o \$). Matemáticamente, el riesgo se calcula con la siguiente ecuación:

$$Riesgo = Probabilidad\ de\ falla(t) \times Consecuencias$$

Para el logro de un diagnóstico integrado, el riesgo debe calcularse usando toda la información disponible; es decir, debe incluir el análisis del historial de fallas, los datos de condición y datos técnicos. De esta forma, se podrán identificar las acciones correctivas y proactivas que puedan efectivamente optimizar costos y minimizar su impacto en el negocio medular.

Para la estimación de la confiabilidad o la probabilidad de fallas, existen dos métodos que dependen del tipo de data disponible; estos son:

- Estimación Basada en Datos de Condición, altamente recomendable para equipos estáticos, que presentan patrones de “baja frecuencia de fallas” y por ende no se tiene un “historial de fallas” que permita algún tipo de análisis estadístico.
- Estimación Basada en el Historial de Fallas: recomendable para equipos dinámicos, los cuales por su alta frecuencia de fallas, normalmente permiten el almacenamiento de un historial de fallas que hace posible el análisis estadístico, los equipos son caracterizados usando su distribución probabilística del “tiempo para fallar” y el “tiempo para reparar”.

[8]

Conclusiones

Se pretende con la metodología propuesta facilitar la estimación de este indicador de mantenimiento.

Recomendaciones

Se recomienda asociar a las medidas de mantenibilidad los costos de mantenimientos que estén en correspondencia con ellos para dar una información más completa que facilite la toma de decisiones.

Bibliografía

1. <http://www.pistarelli.com.ar/mantenibilidad.pdf>
2. <http://www.monografias.com/trabajos62/estadistica-aplicada-mantenimiento/estadistica-aplicada-mantenimiento.shtml>
3. <http://confiabilidad.net/articulos/mantenimiento-centrado-en-confiabilidad-en-industrias-farmaceuticas/>
4. http://campuscurico.utalca.cl/~fespinos/13-APUNTES_%20SOBRE_%20COSTOS_MANTENIMIENTO.pdf
5. Del libro: “Contabilidad de Costos Tradiciones e Innovaciones”, 5a edición, de J. Barfield, C. Raiborn y M. Kinney, Thomson, Pág. 77, 78 y 106.
6. . Del libro: “CONTABILIDAD DE COSTOS Conceptos y Aplicaciones para la Toma de Decisiones Gerenciales”, 3a edición, de R. Polimeni, F. Fabozzi y A. Adelberg, McGraw-Hill, Pág. 12 y 22, 23

7. Del libro: "Contabilidad de Costos", 2a edición, de Juan García Colín, McGraw-Hill, Pág. 12 al 14
8. http://r2menlinea.com/w3/PT/PT016_Modelo_Costo_Riesgo_en_Bombas_Electrosumergibles.pdf