

## DETERMINACIÓN DE LA ETAPA DE VIDA DE UN ACTIVO MEDIANTE EL EMPLEO DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL Y LA CURVA DE DAVIES Y SUS RESPECTIVAS ACCIONES DE MANTENIMIENTO

**Fecha de recepción:** 28 de diciembre de 2020

**Fecha de aceptación:** 29 de febrero de 2021

TCL. Pablo De la Maza Aguayo <sup>1</sup>

**Resumen:** *Se entrega una forma de determinar la etapa de vida de un activo basada en el parámetro de forma "Beta" de la distribución Weibull, empleando la herramienta ofimática "Excel" a fin de determinar, en función de dicha etapa de vida, las estrategias y acciones de mantenimiento a ejecutar sobre un activo dado, en función del sistema o subsistema crítico del mismo.*

**Palabras clave:** *Curva de Davies, Weibull, Mantenimiento.*

## DETERMINING THE LIFE STAGE OF AN ASSET THROUGH THE USE OF THE WEIBULL DISTRIBUTION AND THE DAVIES CURVE AND THEIR RESPECTIVE MAINTENANCE ACTIONS

**Abstract:** *A way to determine the life stage of an asset is provided based on the "Beta" parameter of the Weibull distribution, using the automation tool "Excel" in order to determine, depending on this life stage, the strategies and Maintenance actions to be executed on a given asset, depending on its critical system or subsystem.*

**Keyword:** *Davies curve, Weibull, Maintenance.*

---

<sup>1</sup> Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas Logísticos, mención Mantenimiento Academia Politécnica Militar y Máster en Ingeniería del Mantenimiento Universidad Politécnica de Valencia, España además es Experto Gestor de Mantenimiento, Asociación Española de Mantenimiento. Email: pdelamazaa@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2228-0846>.

## 1. INTRODUCCIÓN

Tal y como se concluye del libro “Fundamentos del Mantenimiento” (Macián et al. 1999), el objetivo del mantenimiento es ser un servicio que debe ir en beneficio de la organización que lo requiere, donde sus principales objetivos por tanto son los de reducir los costos asociados a las detenciones no programadas y su consecuente pérdida de producción, este servicio debe buscar, además, reducir la degradación o deterioro del activo a mantener y, en función de la experiencia que tanto operadores como técnicos van adquiriendo con el tiempo, entregar esta en beneficio de la organización y sus sistemas productivos.

Considerando que en general en los componentes mecánicos, la función tasa de fallas ( $\lambda(t)$ ) tiene la forma de la “Curva de Davies” (Mora Gutiérrez, 2009), se puede emplear dicha representación gráfica para determinar, en función de su  $\lambda(t)$  y del valor del parámetro de forma Beta ( $\beta$ ) de la distribución de Weibull, la etapa de vida de un activo.

Así, la curva de Davies se divide en tres fases, donde se muestra la evolución en el tiempo de las fallas y permite seleccionar de esta forma las tareas de mantenimiento asociadas a la fase en la cual se encuentra el activo.

Como se explicará a continuación más detalladamente, de forma genérica se puede definir que, dependiendo del valor que toma el parámetro de forma Beta, las acciones de mantenimiento pueden ser de tipo modificativas, correctivas, preventivas o predictivas, como así mismo se pueden definir, en lo general, las estrategias de mantenimiento a efectuar.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Metodología utilizada

La metodología utilizada para determinar la etapa de vida en la que se encuentra un activo, fue la diseñada por el autor en el Trabajo de Fin de Máster del Máster en Ingeniería en mantenimiento (De la Maza Aguayo, 2020) bajo el título de “Diseño de una metodología, mediante el análisis de “Weibull”, para la gestión del mantenimiento de la maquinaria del Cuerpo Militar del Trabajo” en la Universidad Politécnica de Valencia, y consistente en un conjunto de procedimientos cuantitativos y secuenciales que permiten obtener, desde el análisis y revisión de los datos, aquellos parámetros requeridos para la aplicación de los modelos matemáticos necesarios para la obtención de la etapa de vida de un activo, desagregando así esta metodología en 7 pasos repartidos en 2 fases, como son el “Proceso de recolección de datos” y la “Definición de la etapa de vida del activo”, como se observa en la Figura N°1.

## 2.2. Desagregación del activo

Para la correcta desagregación del activo, se emplea el método descrito en el libro “mantenimiento Centrado en la Confiabilidad” de John Moubray (Moubray, 2000) donde el activo a analizar se considerará como el sistema principal, y se definen como subsistemas a aquellos sistemas de segundo nivel jerárquico, lo que incluye por tanto, la totalidad de los subsistemas y componentes de tercer o más nivel jerárquico, como se observa en la Figura N°2.

Para lo anterior, se puede emplear el manual de “Partes y piezas” del activo, o bien crear uno nuevo si se quiere levantar un sistema único de desagregación común para la totalidad de los activos de la organización.

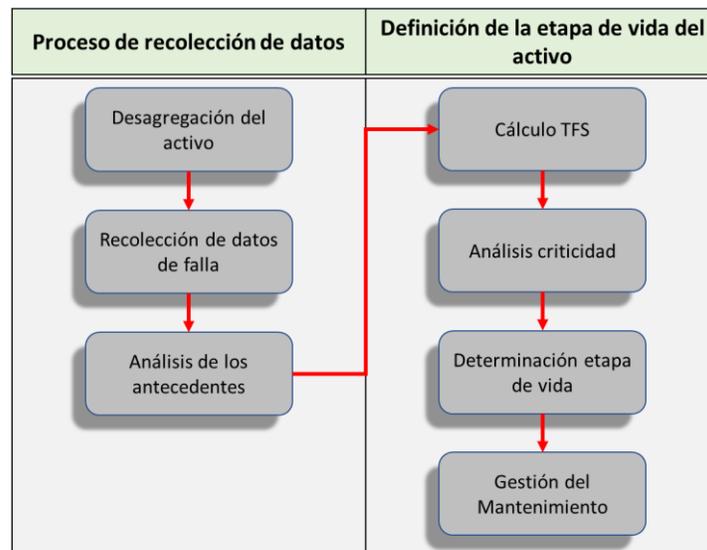


Figura N°1: “Diagrama de la metodología empleada”

Fuente: Elaboración propia.

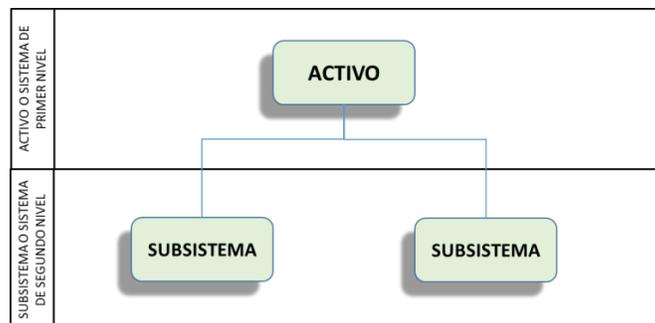


Figura N°2: “Desagregación de los activos”

Fuente: Elaboración propia.

### 2.3. Recolección de datos de falla

Empleado una planilla Excel, los contenidos mínimos a considerar en la recolección de los antecedentes de los fallos del activo a analizar, son los de: Fecha de la falla, componente que falló, subsistema afectado, efecto de la falla sobre la máquina, fecha de reparación de la falla y el respectivo cuadro de observaciones, además de aquellos antecedentes que permitan posteriormente identificar el activo con el que se está trabajando.

Estos son los antecedentes que permitirán posteriormente, entre otras cosas, definir cuales detenciones son producto de fallos en algún componente o subsistema del Activo, eliminando así de esta forma aquellas detenciones que se realizan con motivo de mantenciones programadas u otras que no inciden en el tiempo fuera de servicio o disponibilidad operacional del activo analizado.

### 2.4. Análisis de los antecedentes

Una vez recolectado los datos de las fallas que presentó el activo y transferidos a la planilla Excel detallada anteriormente, se filtra por subsistema y descartan los registros de detenciones que se realizan producto de lo detallado en 2.3, y se copian los datos a una nueva planilla por cada subsistema que haya presentado tiempos fuera de servicio que dejaron al activo en condición de “no operacional”, quedando la nueva planilla conforme la figura N°3, en condiciones de realizar el cálculo del tiempo fuera de servicio.

FECHA FALLA	FECHA REPARACIÓN DE LA FALLA	TFS (hr)	COMPONENTE QUE FALLÓ	SUBSISTEMA AFECTADO	OBSERVACIONES
<b>TOTAL TFS</b>		<b>=SUMA(C3:C19)</b>			

Figura N°3: “Hoja de análisis de los antecedentes”

Fuente: Elaboración propia.

## 2.5. Cálculo del Tiempo Fuera de Servicio (TFS)

Lo normal es que, para el cálculo de los tiempos fuera de servicio, estos se encuentren registrados mediante un software de Gestión del Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO), por lo que la obtención del total de dichos tiempos en el período a analizar será la sumatoria de estos, una vez filtrados. Por otra parte, si no se conoce el tiempo exacto de reparación de un fallo, y solo se tiene el antecedente de la fecha de reparación, entonces (y como una forma de unificar criterios similares para la totalidad de los fallos registrados) esta corresponderá a la resta entre la fecha de reparación de la falla y la fecha de la falla, multiplicado por el tiempo promedio de trabajo diario, si dicho resultado fuera igual a cero, el resultado será el tiempo promedio de trabajo diario, caso contrario se le adicionará una vez el tiempo promedio de trabajo diario, lo que supondrá jornadas completas. (De la Maza Aguayo, 2020)

Como una forma de explicar mejor lo anterior, y suponiendo el promedio diario de trabajo es de 14 horas (con dos turnos), se emplea la siguiente fórmula en Excel:

$$= SI(FR - FF) * 14 = 0; 14; ((FR - FF) * 14) + 14)$$

Donde:

*FR*: Fecha reparación de la falla

*FF*: Fecha de la falla

## 2.6. Análisis de criticidad

Se considerará que la etapa de vida en el que se encuentra el activo corresponde al subsistema más crítico desde el punto de vista de su mantenibilidad, confiabilidad e indisponibilidad, el análisis de criticidad se realiza mediante el método gráfico de “Jack Knife” (Knights, 2004), empleando un gráfico de dispersión con los diferentes subsistemas analizados en función de su “Frecuencia” (eje x) y su “MDT”<sup>1</sup> individual (eje y), donde la línea verde representa el promedio de los tiempos medios fuera de servicio de los subsistemas e indica la mantenibilidad general del activo, la línea azul representa el promedio de las frecuencias de falla de los subsistemas e indica la confiabilidad del activo y, la línea roja representa la indisponibilidad calculada como la ponderación entre la frecuencia y el tiempo medio fuera de servicio, quedando gráficamente lo anterior conforme la figura N°4, que se obtiene con los antecedentes ingresados en una nueva hoja de Excel denominada como “Análisis de criticidad de la tabla N°1.

<sup>1</sup> Del inglés “Mean down time” o tiempo medio fuera de servicio.

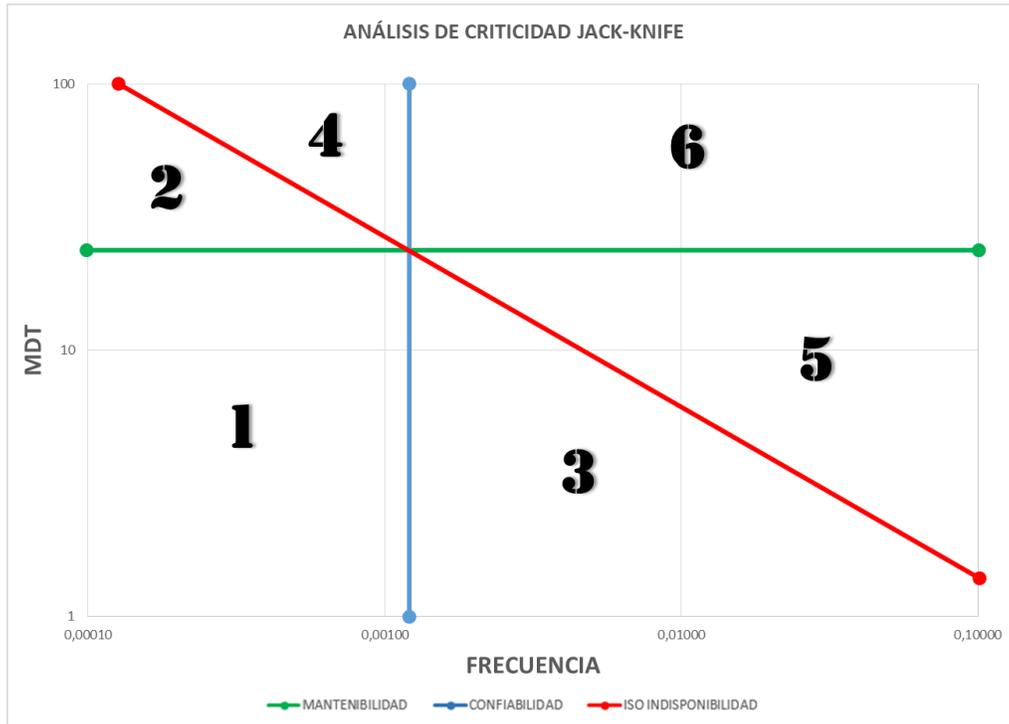


Figura N°4: “Gráfico de dispersión de análisis de criticidad”

Fuente: Elaboración propia.

Subsistema	Cantidad Fallas (uu)	Total TFS (Horas)	Frecuencia	MDT (horas)	Indisponibilidad %
A					
B					
C					
D					
E					
F					
G					
H					
<b>TOTAL</b>					

Disponibilidad Ind. Avg
----------------------------

Tabla N°1: “Análisis de criticidad”

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

Cantidad de fallas, corresponde al número de fallas que presentó el activo analizado durante todo el período de análisis.

Total TFS, este valor es la sumatoria de los tiempos fuera de servicio de cada falla de cada subsistema analizado.

Frecuencia, es la división entre la cantidad de fallas y las horas totales de operación posible en el período de tiempo analizado.

MDT, corresponde a la división entre los tiempos totales de fuera de servicio y la cantidad de fallas registrados en el período analizado.

Indisponibilidad, como el producto entre la frecuencia y el MDT.

Indisponibilidad (Ind. Avg), como el producto del promedio de la frecuencia de los subsistemas y el promedio del MDT de los subsistemas.

Para la correcta interpretación del análisis de criticidad empleando el método gráfico presentado, se debe observar que este presenta 6 sectores característicos donde los activos, sistemas, subsistemas o componentes pueden ser caracterizados, conforme lo siguiente:

### **2.6.1. Primer Sector**

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son más mantenibles y confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad menor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

### **2.6.2. Segundo Sector**

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son menos mantenibles, pero más confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad menor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

### **2.6.3. Tercer Sector**

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son más mantenibles, pero son menos confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad menor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

#### **2.6.4. Cuarto Sector**

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son menos mantenibles, pero más confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad mayor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

#### **2.6.5. Quinto Sector**

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son más mantenibles, pero son menos confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad mayor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

#### **2.6.6. Sexto Sector**

Los subsistemas o componentes que quedan alojados en este sector, son menos mantenibles y confiables que el promedio de los componentes o subsistemas analizados y presentan una indisponibilidad mayor al producto del promedio de las frecuencias y tiempos MDT.

En general, aquellos subsistemas o componentes que quedan ubicados en este sector del gráfico de dispersión representan los principales problemas de un activo y requieren de un monitoreo especial y seguimiento a fin de evitar o adelantarse a la falla que pudiese dejar no operacional el activo analizado.

### **2.7. Determinación etapa de vida del activo**

Con la finalidad de determinar el respectivo parámetro de forma “Beta”, se completan los datos requeridos en la planilla Excel de la Tabla N°2 (de existir dos o más subsistemas críticos, se completan los datos requeridos en la planilla Excel de la Tabla N°2 tantas veces como sea necesario), conforme a lo siguiente:

#### **2.7.1. Determinación del $t(0)$**

Si se cuenta con la totalidad de la información histórica de las fallas, se ingresa el valor de la primera falla registrada del subsistema, que corresponde al período de tiempo  $t$  en que no presentó fallas, en el supuesto de no contar con dicha información, entonces se puede suponer que  $\gamma=0$ .

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	t(0)	0							x	y			
2													
3	Horómetro a la falla	Tiempo de falla t-t(0)	N° de Falla (i)	Tiempo buen funcionamiento (t)		N° de Falla (i)	Tiempo buen funcionamiento (t)	F(i) %	Ln(t)	Ln(Ln(1/(a-F(i))))	β=a	b	η
4			1			1							
5			2			2							
6			3			3							
7			4			4							
8			5			5							
9			6			6							
10			7			7							
11			8			8							
12			9			9							
13			10			10							
14			11			11							
15			12			12							
16			13			13							
17			14			14							
18			15			15							
19			16			16							
20			17			17							
21			18			18							
22			19			19							
23			20			20							
24			21			21							
25			22										

Tabla N°2: “Planilla Etapa de Vida”

Fuente: Elaboración propia.

### 2.7.2. Horómetro a la falla

Se ingresan cronológicamente las fallas registradas en la Tabla N°2 en el caso probable de que existan más de una falla con el mismo horómetro, sólo se registra una de ellas.

### 2.7.3. Tiempo de falla t-t(0)

Corresponde a la sustracción entre los valores contenidos en las celdas de la columna “Horómetro a la falla” y el t(0).

### 2.7.4. Número de falla (i)

Se ingresan el orden secuencial de cada falla, de forma creciente, estos valores posteriormente se copian en la segunda columna “N° de Falla (i)” de la columna “F” de la hoja Excel de la Tabla N°2 desde i=1 a i=n-1 si el primer valor si es igual a cero, caso contrario de i=1 a i=n.

### 2.7.5. Tiempo de buen funcionamiento (t)

Para la obtención de los tiempo de buen funcionamiento, se realiza la sustracción del valor contenido en “Tiempo de falla t-t(0)” entre el valor (n+1)-n, con la salvedad del primer valor que siempre será igual a n.

Luego, se copian los valores de la columna para posteriormente ordenarlos de forma decreciente de menor a mayor, se descarta el primer valor si es igual a cero y se copian en la nueva columna “Tiempo de buen funcionamiento (i)” de la columna “G” de la hoja Excel de la Tabla N°2.

### 2.7.6. Segmentación de fallas $F(i)\%$

Se emplea la función de probabilidad acumulada de fallas con el método de rango de la mediana (Pascual J., 2005), si la población es pequeña, con los valores de la columna “F” N° de falla (i) de la hoja Excel de la Tabla N°2 desde i hasta N, conforme la siguiente ecuación:

$$F(i) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} [\%]$$

En Excel:

$$= ("N^\circ \text{ de Falla } (i)" - 0,3)/(CONTAR(\$i\$:\$N\$) + 0,4)$$

O, con la función de distribución por el método de rangos medios (Pascual J., 2005):

$$F(i) = \frac{i}{N + 1} [\%]$$

En Excel:

$$= ("N^\circ \text{ de Falla } (i)"/(CONTAR(\$i\$:\$N\$) + 1))$$

### 2.7.7. Obtención parámetros Weibull

Para la obtención de los parámetros de Weibull se utiliza el método gráfico propuesto por Rodrigo Pascual en su libro “El arte de mantener” (Pascual J., 2005) mediante la utilización de un gráfico de dispersión, cuyos ejes X e Y son obtenidos desde la ecuación de la probabilidad acumulada de fallas para Weibull, como sigue:

$$F(t) = 1 - R(t)$$

Resolviendo:

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

Como ya se calculó  $t-t(0)$ , entonces  $Y=0$

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

Ordenando:

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

Despejando la exponencial:

$$\ln \ln \left( \frac{1}{1 - F(t)} \right) = \beta \ln t - \beta \ln \eta$$

Comparando la ecuación anterior con una ecuación de la recta,

$$Y = aX - b$$

Se concluye que:

$$Y = \ln \ln \left( \frac{1}{1 - F(t)} \right)$$

$$X = \ln t$$

$$a = \beta$$

$$b = \beta \ln \eta$$

Por lo que  $\eta$  se obtiene de la siguiente forma:

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

Para obtener los parámetros requeridos y calcular la confiabilidad del sistema o subsistema, se hace mediante un gráfico de dispersión con línea de tendencia, de la cual se extraerán los valores de la ecuación de dicha recta, completando los valores del eje X e Y en la hoja Excel de la Tabla N°2, como sigue:

Eje X en Excel:

$$= LN(Tiempo\ de\ buen\ funcionamiento\ (t))$$

Eje Y en Excel:

$$= LN(LN(1/(1 - F(i)\%)))$$

Para la obtención de los parámetros  $b$ ,  $\beta$  y  $\eta$ , estos se pueden extraer directamente desde la ecuación de la recta de la línea de tendencia del gráfico realizado con los ejes X e Y anteriormente definidos en la hoja Excel de la Tabla N°2 como se muestra a modo de ejemplo en la figura N°5, donde los parámetros obtienen los siguientes valores: Parámetro  $\beta = 1,148$ ; Parámetro  $b = -5,340$ ; y Parámetro  $\eta = e^{(b/\beta)} = e^{((-5,34)/1,148)} = 104,749$

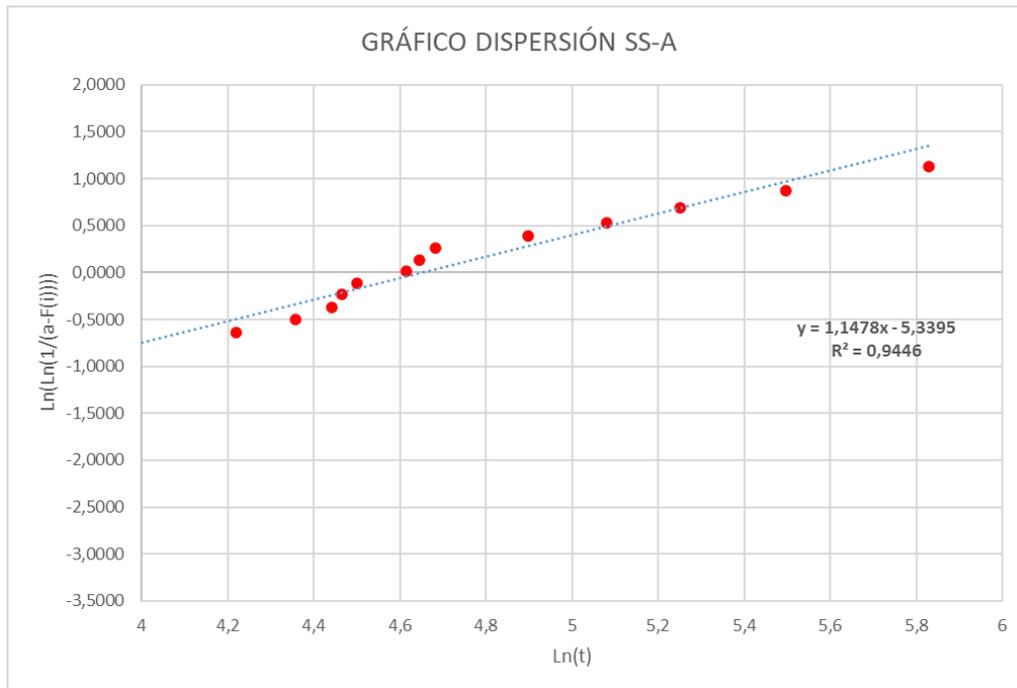


Figura N°5: "Gráfico de dispersión de análisis de criticidad"

Fuente: Elaboración propia.

Independiente de que se pueden obtener los valores de los parámetros directamente desde el gráfico de dispersión del subsistema crítico, estos se obtienen también desde la planilla de la Tabla N°2, utilizando la pendiente e intersección de los valores de los ejes definidos como X e Y, aplicando las siguientes fórmulas:

Parámetro  $\beta$ :

$$=PENDIENTE(Ji:JN;Ii:IN)$$

Parámetro b:

$$=INTERSECCION.EJE(Ji:JN;Ii:IN)$$

Parámetro  $\eta$ :

$$=EXP(-(INTERSECCION.EJE(Ji:JN;Ii:IN)/PENDIENTE(Ji:JN;Ii:IN)))$$

O bien:

$$=EXP(-(b/\beta))$$

Finalmente, y con los parámetros  $\beta$  y  $\eta$  obtenidos anteriormente, se puede calcular la confiabilidad del subsistema en los tiempos  $t$  de las fallas registradas, aplicando la fórmula de confiabilidad en la hoja Excel de la Tabla N°2, columnas “Q” y “R”, como sigue:

Confiabilidad en Excel:

$$=EXP(-POTENCIA((t/\eta);\beta))$$

## 2.8. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO SEGÚN LA ETAPA DE VIDA DEL ACTIVO

Tal y como se detalló en la parte introductoria del presente artículo, por lo general en los componentes mecánicos, la función tasa de fallas ( $\lambda(t)$ ) tiene la forma de la “Curva de Davies” (Mora Gutiérrez, 2009), se puede emplear dicha representación gráfica para determinar, en función de su  $\lambda(t)$  y del valor del parámetro de forma Beta ( $\beta$ ) de la distribución de Weibull, la etapa de vida de un activo.

De forma genérica se puede definir que, como ya se vio anteriormente, dependiendo del valor del parámetro de forma Beta, las acciones de mantenimiento pueden ser de tipo modificativas, correctivas, preventivas o predictivas, como así mismo se pueden definir, en lo general, las estrategias de mantenimiento a efectuar, como se muestra en la figura N° 7, que presenta las bandas de aplicabilidad de las estrategias del mantenimiento.

Así, como se observa en la figura N° 6, la curva de Davies se divide en tres fases, donde se muestra la evolución en el tiempo de las fallas y permite seleccionar de esta forma las tareas de mantenimiento asociadas a la fase en la cual se encuentra el activo.

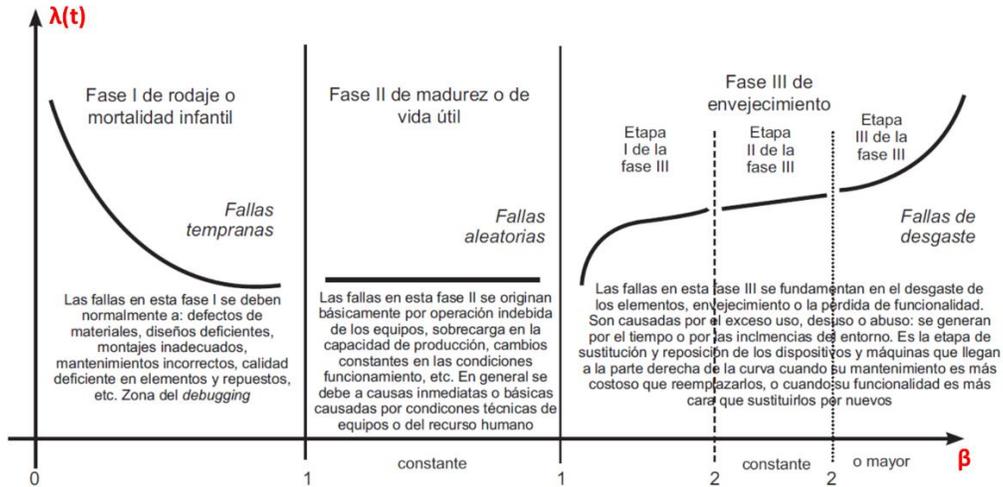


Figura N°6: “Curva de Davies”

Fuente: MORA, Luís (2009). Mantenimiento, planeación y control. México: Alfaomega, 108.

$\lambda(t)$  Tasa de fallas en Weibull

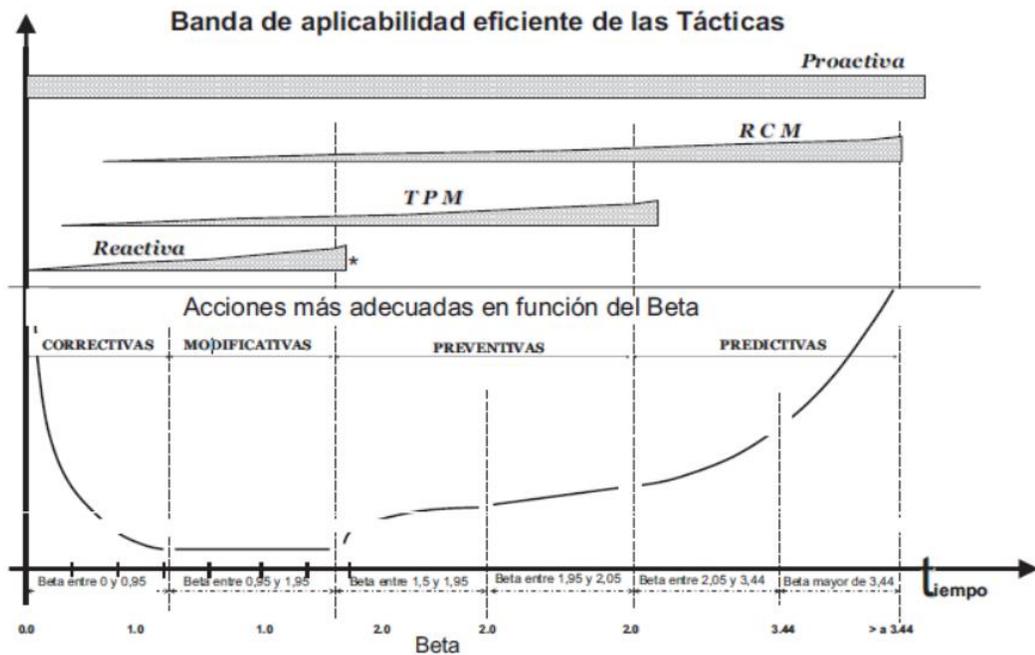


Figura N°7: “Banda de aplicabilidad eficiente de las Tácticas”

Fuente: MORA, Luís (2009). Mantenimiento, planeación y control. México: Alfaomega, 109.

## 2.9. Fase I

Durante la Fase I, de “Rodaje” o “Mortalidad Infantil” (Mora Gutiérrez, 2009) el valor que toma la tasa de falla  $\lambda(t)$  es decreciente, es decir, va disminuyendo en función del tiempo, el parámetro de forma Beta ( $\beta$ ) toma valores mayores a 0 pero menores a 1 (cercano a 0,95).

Las fallas normalmente están asociadas al asentamiento de piezas, problemas en el montaje, la instalación y puesta en marcha del activo, problemas de diseño del equipo, defectos en los materiales empleados para la confección del mismo o un inadecuado mantenimiento.

La estrategia de mantenimiento en esta fase será de tipo reactivo, realizándose principalmente acciones correctivas y, en segundo lugar, las modificativas. Las acciones correctivas se realizan principalmente ya que las fallas en esta etapa de vida del activo, son diferentes.

En el caso de la aparición de fallos recurrentes se debe identificar la función afectada, posteriormente los fallos funcionales del sistema (FF), sus circunstancias y finalmente, las causas del fallo funcional (Macián et al. 1999) para aplicar medidas correctivas (o modificativas si es del caso) de mantenimiento sobre el mismo.

		Modos de Fallo		
Funciones		FF	Circunstancia	Causas
1. Canalizar gases...	los	1. No es capaz de...	1. Dando el motor su...	1. Fugas en juntas, bridas y manguitos. 2. Tubería de entrada turbina agrietada

Tabla N°3: “Ejemplo de causas”

Fuente: MACIÁN, Vicente et al (1999). Fundamentos de Ingeniería del Mantenimiento, 66.

Cuando los fallos están asociados a problemas en el montaje, la instalación y puesta en marcha del activo, problemas de diseño del equipo, defectos en los materiales empleados para la confección del mismo, se deben realizar las acciones modificativas tendientes a resolver dichos problemas.

Conforme la doctrina Institucional de mantenimiento, se ejecutarán los mantenimientos de tipo “preventivo” y “recuperativos”, de tipo mantenimiento preventivo inspectivo y mantenimiento recuperativo básico.

## 2.10. Fase II

Según Luís Mora (Mora Gutiérrez, 2009), las fallas de la denominada “Fase II” de la Curva de la Bañera (o Davies) se originan, principalmente, producto de errores humanos durante la operación de los activos, o por los cambios en las condiciones de operación de la misma, como así mismo, producto de una eventual sobrecarga de los niveles de operación. Es decir, las “condiciones técnicas de equipos o del recurso humano”.

Durante esta Fase II, de “Madurez” o de “Vida útil”, el valor que toma la tasa de falla  $\lambda(t)$  es constante y cercana al valor 1 (uno), es decir, no varía en función del tiempo y se mantiene constante independiente de las acciones de mantenimiento se hayan o no realizado a componentes similares, es decir, su probabilidad de falla es igual entre componentes similares y por tanto, sus fallas tienden a ser aleatorias.

Al igual que en la Fase I, en el caso de la aparición de fallos recurrentes se debe identificar la función afectada, posteriormente los fallos funcionales del sistema (FF), sus circunstancias y finalmente, las causas del fallo funcional (Macián et al. 1999) para aplicar medidas correctivas de mantenimiento sobre el mismo mediante la aplicación de la Tabla N°3.

Si las fallas son producto de la utilización fuera del estándar del equipo (para lo que fue diseñado), las acciones de mantenimiento deben ser de tipo modificativo a fin de adaptar el activo a las nuevas condiciones de trabajo.

En esta fase, los problemas en el montaje, la instalación y puesta en marcha del activo, los problemas de diseño del equipo, los defectos en los materiales empleados debiesen haber sido ya detectados y corregidos, por lo que el activo entra en su normal funcionamiento, por lo que se puede comenzar a emplear técnicas de monitorizado para almacenar la información necesaria o “Espectro Base” del activo para posteriormente emplear estos datos en las acciones de mantenimiento Predictivo que pudiesen ser del caso aplicar a futuro.

Conforme la doctrina Institucional de mantenimiento, se ejecutarán los mantenimientos de tipo “preventivo” y “recuperativos”, de tipo mantenimiento preventivo inspectivo y conservativo, y mantenimiento recuperativo básico como se ha detallado anteriormente, además de iniciar la recolección de datos para un posterior empleo en el mantenimiento preventivo predictivo.

### **2.11. Fase III**

En la Fase III o de “Envejecimiento”, toda vez que el tiempo va creciendo (moviéndose a la derecha del gráfico), se comienza a producir un aumento de la tasa de fallas, la cual va tomando valores cercanos a 1 por la parte superior a valores mucho mayores de 2.

Esta Fase, puede ser dividida en tres etapas (Mora Gutiérrez, 2009), donde cada una de ellas presentan características que los hacen identificables y a su vez, tienen diferentes estrategias de mantenimiento y las acciones sobre el activo, sistema, subsistema o componente variarán en función de cuan alejado este el parámetro de forma Beta del  $t=0$ .

### **2.11.1. Etapa I de la Fase III**

En la Etapa I de la Fase III, se observa como la tasa de falla comienza lentamente a aumentar en la medida en que se aleja del  $t=0$  y el parámetro de forma Beta toma valores superiores a 1 hasta valores cercanos al 2.

En esta Etapa las fallas que aparecen, por lo general son conocidas y por lo tanto ya se tiene experiencia sobre las mismas y se pueden realizar acciones preventivas sobre las mismas.

En esta Etapa, ya se debiese tener el árbol de “Causa – Efecto” completado y se continua la recopilación de los datos del monitorizado de los parámetros que se comenzaron a adquirir en la Fase II, por lo que algo de mantenimiento de tipo predictivo se puede hacer, pero será el mantenimiento de tipo preventivo el que más se empleará en esta Etapa de la Fase III.

Desde el punto de vista del mantenimiento Institucional, se mantendrá la ejecución de los mantenimientos de tipo “preventivo” y “recuperativos”, de tipo mantenimiento preventivo inspectivo y conservativo, y mantenimiento recuperativo básico como se ha detallado anteriormente, además de continuar la recolección de datos para eventualmente emplear un mantenimiento preventivo predictivo conforme los datos que se continúen obteniendo se alejan de los parámetros definidos con de “normal funcionamiento”.

### **2.11.2. Etapa II de la Fase III**

La Etapa II de la Fase III, según Luís Mora (Mora Gutiérrez, 2009), es la Etapa donde se produce la transición desde el mantenimiento preventivo por excelencia, al mantenimiento predictivo con un importante factor de mantenimiento preventivo ya consolidado.

En esta Etapa, la tasa de fallas tiende a ser constante con una leve pendiente positiva y con valores del parámetro de forma Beta cercano a 2.

Una mayor incidencia del mantenimiento predictivo hace que la mayoría de las fallas puedan ser anticipadas, además el árbol de “Causa – Efecto” ya se debiese encontrar consolidado.

Desde el punto de vista del mantenimiento Institucional, se mantendrá la ejecución de los mantenimientos de tipo “preventivo” y “recuperativos”, de tipo mantenimiento Preventivo Inspectivo y Conservativo, y mantenimiento Recuperativo Básico como se ha detallado anteriormente, se comienzan a utilizar los datos de los parámetros de funcionamiento recolectado y analizados para ejecutar el mantenimiento Preventivo

Predictivo a medida que estos se alejen de los parámetros definidos como de “normal funcionamiento”, conforme lo siguiente:

### **2.11.3. Etapa III de la Fase III**

Esta es la Etapa de la Fase III que es considerada como de “Envejecimiento Puro” (Mora Gutiérrez, 2009), donde la tasa de falla adquiere una tendencia claramente creciente en una pendiente positiva y con un crecimiento acelerado en la medida que el parámetro de forma Beta se aleja del  $t=0$ , alcanzando valores superiores a 2, o mucho mayores.

Dado que en esta Etapa las fallas son principalmente causadas por la acción del tiempo sobre los sistemas, subsistemas y componentes, se integra fuertemente el mantenimiento de tipo predictivo, complementado con los mantenimientos de tipo preventivo y correctivo, ya que el mantenimiento predictivo permitirá adelantarse, empleando métodos cuantitativos, al fallo del componente, pudiéndose de esta forma poder, eventualmente, realizar el cambio y sustitución del subsistema o componente que fallará.

Desde el punto de vista del mantenimiento Institucional, se mantiene la ejecución de los mantenimientos de tipo “Preventivo” y “Recuperativos”, de tipo mantenimiento Preventivo Inspectivo y Conservativo, y mantenimiento Recuperativo como se ha detallado anteriormente.

El Mantenimiento Preventivo Predictivo se transforma en un factor decisivo en la estrategia a seguir con respecto a las acciones y actividades de mantenimiento a ejecutar sobre el activo y sus sistemas, subsistemas y componentes, por lo que, en conjunto con el mantenimiento recuperativo básico, se puede llegar a utilizar el mantenimiento recuperativo mayor, donde se definirá si se requiere de una intervención mayor sobre el activo a mantener.

## **3. CONCLUSIONES**

La presente metodología permite determinar las estrategias y acciones de mantenimiento basado en la etapa de vida de un activo, mediante el empleo de la distribución de Weibull y la curva de Davies, lo anterior dado que, en general, en los componentes mecánicos, la función tasa de fallas ( $\lambda(t)$ ) tiene la forma de la “Curva de Davies” y por consecuencia, se puede emplear dicha representación gráfica para determinar, en función de su tasa de falla ( $\lambda(t)$ ), y del valor del parámetro de forma Beta ( $\beta$ ) (de la distribución de Weibull), la etapa de vida de un activo.

De esta forma, y una vez determinada la etapa de vida en la que se encuentra un activo, se pueden aplicar (o comenzar a implementar) las diferentes tácticas de gestión del mantenimiento (mantenimiento reactivo, TPM, RCM, proactiva, etc.) con sus respectivas acciones de mantenimiento, lo que permitirá no solamente aumentar la disponibilidad

operacional, sino que se tiende a disminuir los tiempos de indisponibilidad, medir y realizar acciones que buscan el minimizar los tiempos de demoras logísticas del MDT y, frente a la imposibilidad de gestionar correctamente los repuestos, aumentar los tiempos productivos del activo sujeto a la metodología gracias a la correcta planificación del ciclo logístico asociado al mantenimiento.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- De la Maza Aguayo, P. (2020). *Diseño de una Metodología, mediante el análisis de “Weibull”, para la gestión del Mantenimiento de la maquinaria del Cuerpo Militar del Trabajo*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Dhillon, B. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. Boca Raton: CRC Press.
- Knights, P. (2004). Downtime Priorities. *Maintenance Journal*, 14-21.
- Macián Martínez, V., Tormos Martínez, B., & Olmeda González, P. (1999). *Fundamentos de Ingeniería del Mantenimiento*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Mora Gutiérrez, L. A. (2009). *Mantenimiento, planeación y control*. México: Alfaomega.
- Moubray, J. (2000). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. North Carolina: Aladon LLC.
- Pascual J., R. (2005). *El arte de mantener*. Santiago: Universidad de Chile.