

# Cálculo del período de garantía tras la reparación de un activo industrial complejo aplicando procesos de Poisson no homogéneos



Vicente González-Prida Díaz  
Luis Barberá-Martínez  
Adolfo Crespo-Márquez  
Carlos Parra-Márquez

Ingeniero Industrial  
Ingeniero de Minas  
Dr. Ingeniero Industrial  
Dr. Ingeniero Naval

UNIVERSIDAD DE SEVILLA. ESI. Dpto. de Organización y Gestión de Empresas I. Avda. Camino de los Descubrimientos, s/n - 41092 Sevilla. Tfno: +34 954487215.  
vicente.gonzalezprida@gdels.com

Recibido: 07/03/2012 • Aceptado: 08/10/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4965>

## WARRANTY PERIOD CALCULATION AFTER THE REPAIR OF A COMPLEX INDUSTRIAL ASSET APPLYING NON-HOMOGENEOUS POISSON PROCESSES

### ABSTRACT

- This paper seeks to address the decision process involved in setting a warranty length for a product after successive repairs are performed.

For that purpose, the paper starts describing briefly the warranty perspective and introducing the relevant literature related to Life Cycle Cost Analysis (LCCA). Then, the main aspects of LCCA are defined in order to be applied for the calculation of the warranty period in a product which has been sold and requires a technical assistance for its repair. This work includes as a novelty the calculation of such period of time in relationship with the risk that the company is willing to assume. The result is a procedure that may be crucial for a maintenance company, not only to make better forecasts of future warranty costs but also as an important marketing tool.

With this goal, this paper describes a mathematical development which will be illustrated with a case study divided in two exercises, where the above mentioned concepts are applied to calculate the proper warranty period for a specific repaired product. Finally, the conclusions are presented summarizing the main contributions of the paper.

- **Key Words:** after-sales service, life cycle cost analysis (lcca), non-homogeneous poisson process (nhpp), technical assistance, warranty period.

### RESUMEN

Este artículo busca dar soporte como sistema de apoyo a la toma de decisiones relacionadas con la elección del periodo de garantía para un producto tras la realización de sucesivas reparaciones.

Con este fin, el artículo empieza describiendo brevemente las perspectivas de la garantía y presentando la bibliografía más relevante relacionada con el *Análisis de Coste del Ciclo de Vida* (LCCA por sus siglas en inglés, *Life Cycle Cost Analysis*). Posteriormente se definen los principales aspectos del LCCA para aplicarse al cálculo del periodo de garantía de un producto que ha sido vendido y requiere asistencia técnica para su reparación. Este artículo incluye de manera novedosa el cálculo de dicho periodo de tiempo como una relación con el riesgo que la compañía está dispuesta a asumir. El resultado de este procedimiento puede ser crucial para una empresa de mantenimiento; no sólo para hacer mejores predicciones de futuros costes asociados a la garantía de productos si no también como una importante herramienta de marketing.

Con este objetivo, este artículo describe un desarrollo matemático que posteriormente es aplicado a un caso práctico para calcular el correcto periodo de garantía para un producto específico reparado. Finalmente, las conclusiones se exponen resumiendo las principales contribuciones del artículo.

**Palabras Clave:** servicio de postventa, análisis de coste del ciclo de vida (lcca), procesos de poisson no homogéneos (nhpp), asistencia técnica, periodo de garantía.

## 1. INTRODUCCIÓN

La garantía se define normalmente como la política de seguridad, aplicada a todos los clientes, que asegura que los bienes o servicios adquiridos se corresponden (o deberían corresponderse) con las especificaciones del producto, y si no, estos serán reemplazados o reparados. Esta garantía se aplica a un producto durante un periodo de tiempo tras haber sido vendido o tras haberse producido el servicio. La gestión de tal política combina acciones técnicas, administrativas y de dirección durante el periodo de garantía para mantener o restaurar el artículo a un estado en el que pueda realizar la función requerida, necesaria para proporcionar un determinado servicio [1]. Existen diferentes tipos de garantías para diferentes productos (de consumo, comercial e industrial, estándar/rutinario versus hecho a medida...) como los mencionados en [2], [3].

A lo largo de los últimos años, especialistas en las áreas de Ingeniería de Gestión de Activos y Dirección de Operaciones han mejorado el proceso de cuantificación de costes, incluyendo el uso de técnicas que cuantifican el Factor de Fiabilidad y el impacto de la ocurrencia de fallos en los costes totales de un sistema de producción a lo largo de su ciclo de vida [4]. Estas mejoras han permitido disminuir la incertidumbre en la toma de decisiones en áreas de vital importancia como el diseño, desarrollo, mantenimiento, sustitución y adquisición de bienes de producción. En este proceso integral, aparecen muchas decisiones y acciones (tanto técnicas como más generales) que deberían ser adoptadas durante el periodo de uso de un bien industrial. El desafío consiste en aplicar estas mejoras a un producto que se lanza al mercado.

seleccionada a partir del test de Kolmogorov – Smirnov, etc. [11]. Estos modelos tienen una limitación principal y es que consideran una vez que los fallos encontrados, son reparados, su condición es restaurada a su estado original (el equipo o componente que ha fallado se sustituye por uno nuevo), es decir, el sistema queda en la condición como cuando era nuevo y la tasa de fallos no se ve afectada por el proceso de restauración, lo cual, dentro de un contexto de operaciones y producción, no parece ser el escenario que más se ajuste a la realidad.

Asumir que el proceso de renovación devuelve a la condición original al sistema reparable, no es precisamente la hipótesis más realista, sobre todo cuando se tiene un sistema de múltiples componentes, en el que los tiempos entre fallos no tienen por qué ser independientes o idénticamente distribuidos, en este caso lo que sucede es que se tiene algún tipo de tendencia en la tasa de fallos. Cuando se trata de equipos reparables y se habla de tiempo para el fallo, surge inmediatamente la pregunta ¿Cuál es el tiempo hasta que tenga lugar el primer fallo? ¿Y para el segundo? ¿Y para el n-ésimo fallo? Para diagnosticar la tasa de fallos en un escenario en particular como el descrito en este artículo, se ha desarrollado un modelo estocástico [12-15], denominado Proceso No Homogéneo de Poisson (*Non-homogeneous Poisson Process* (NHPP)), el cual considera que la tasa de fallos varía a medida que el sistema envejece. A lo largo de las sucesivas secciones veremos cómo el modelo NHPP estima el Número Esperado de Fallos  $\Lambda(t[m])$  para un período de tiempo indicado y, posteriormente, comentamos cómo el resultado del número de fallos estimado, se convierte en un indicador económico dentro del proceso de análisis de costes de ciclo de vida de un equipo industrial.

En definitiva, este artículo considera un sistema complejo (un producto industrial), donde multitud de restricciones y condiciones deben ser tomadas en cuenta. Generalmente, los casos prácticos son usados para respaldar y ayudar a la comprensión de contenidos puramente teóricos, tanto en ingeniería como en otros campos de investigación [16]. En este caso, la intención es sintetizar un caso práctico que transmita con facilidad cómo un método en el Análisis de Coste del Ciclo de Vida puede ayudar a, por ejemplo, tomar decisiones adecuadas en lo que refiere a buenos periodos de garantía para atender correctamente posibles reclamaciones durante dicho periodo de tiempo [17]. Específicamente, el caso aquí expuesto será sobre un producto donde la compañía de fabricación ha almacenado datos sobre el comportamiento y los fallos del producto.

## 2. CÁLCULO DEL PERIODO DE GARANTÍA

Para calcular el apropiado periodo de garantía se necesita aplicar medidas adecuadas que deberían ser definidas durante la fase estratégica del programa de garantía. Las medidas deben permitir la comparación de los datos de fiabilidad y la inclusión del análisis de coste de vida. La empresa debe,

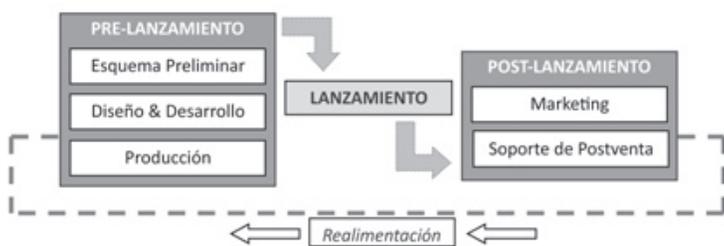


Fig. 1: Ciclo de Vida del Producto - perspectiva de garantía (Adaptado de [2])

La necesidad de un soporte técnico de un producto y de su mantenimiento es normalmente decidido durante las fases de diseño y fabricación [5]. La mayoría de estas acciones tiene un elevado impacto en el coste del ciclo de vida del bien e influyen en las posibles expectativas para alargar la vida útil de los sistemas de producción bajo costes razonables (ver, por ejemplo [6], [7], [8], [9] y [10]).

En la literatura podemos encontrar modelos básicos que permiten evaluar la fiabilidad y el impacto económico de los fallos: Tasa de Fallos Constante, Tasa de Fallos Determinista, Tasa de Fallos por Distribución de Weibull, Tasa de Fallos determinada a partir de la distribución estadística

por lo tanto, establecer y usar un proceso estandarizado y repetible para obtener y analizar datos e interpretar los resultados, que pueden estar basados en factores corporativos o industriales. Los resultados deberían ser usados para apoyar y justificar mejoras. Esta sección revisa la base matemática en los Procesos de Poisson No Homogéneos aplicando una distribución de Weibull.

### 2.1. BASES TEÓRICAS PARA EL CÁLCULO: EL MODELO NHPP

Existen diferentes modelos estocásticos que pueden ser considerados útiles para el análisis de la frecuencia de fallos en unidades y sistemas reparables. Particularmente, el Proceso de Poisson no homogéneo (NHPP) es un modelo también denominado “mínima reparación” y asume que la unidad vuelve a un estado “tan malo como vieja sea” (ABAO) tras la reparación. No obstante, una reparación a “tan malo como viejo sea” es una pequeña parte del Proceso de Poisson no homogéneo y no lo caracteriza como un proceso NHPP en sí.

El NHPP difiere del HPP (Proceso de Poisson homogéneo) en el hecho de que la frecuencia de ocurrencia de los fallos varía con el tiempo en vez de ser considerarla constante. En este proceso, los tiempos entre fallos no son ni independientes ni homogéneamente distribuidos. El NHPP es un proceso de punto estocástico en el que la probabilidad de ocurrencia de  $n$  fallos en cualquier intervalo  $[t_1, t_2]$  tiene una distribución de Poisson. Este proceso puede verse en más detalle en [12-15].

#### 2.1.1. Modelo NHPP propuesto para el análisis del periodo de garantía

Basándose en el desarrollo de un modelo NHPP [12-15], esta subsección presenta un algoritmo basado en el NHPP, con el añadido de la elección del periodo de garantía. Esto significa que, en cierto modo parecido al párrafo anterior, aquí se describen esos pasos para estimar el mínimo tiempo para el periodo de garantía ( $t_{MTW}$ ) de acuerdo con el NHPP. Como datos de partida, es necesario conocer los intervalos de tiempo  $t_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), cuando ocurren los fallos y las reparaciones. Con estos datos es posible seguir los siguientes pasos:

##### Cálculo de los parámetros:

Considerando  $T_n$  como el tiempo total:

$$T_n = \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la distribución de Weibull en el  $(n)$ -ésimo evento será entonces:

$$\hat{\alpha}_n = \frac{T_n}{n^\beta} \quad (2)$$

$$\hat{\beta}_n = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln\left(\frac{T_n}{T_i}\right)} \quad (3)$$

Donde  $T_i$  es el tiempo en el que el  $(i)$ -ésimo fallo ocurre,  $T_n$  es el tiempo total donde el último fallo ocurrió y  $n$  es el número total de fallos.

##### Cálculo del tiempo estimado hasta el siguiente fallo (TNF, Time till Next Failure):

El tiempo estimado hasta el siguiente fallo, teniendo en cuenta los parámetros de Weibull y el tiempo total acumulado se expresa de acuerdo a la siguiente expresión:

$$TNF_n = \left\{ \left[ \frac{1}{\alpha} + (T_n)^\beta \right]^{(1/\beta)} \right\} - T_n \quad (4)$$

##### Cálculo del mínimo tiempo de garantía ( $t_{MTW}$ ):

Con todos los anteriores cálculos, es posible obtener el mínimo tiempo para el periodo de garantía tras la  $(n)$ -ésima reparación (ver Figura 2) con la siguiente expresión (considerando un 20% del TNF como el mínimo tiempo de garantía):

$$t_{MTW_n} = TNF_n \times 20\% \quad (5)$$

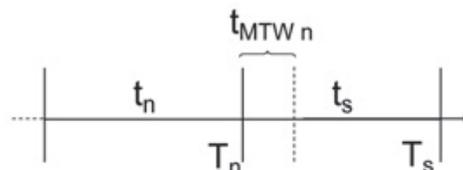


Fig.2: Eventos de error en la línea temporal

##### Cálculo del número esperado de fallos para $t_{MTW}$ :

El número total de fallos esperados en un intervalo de tiempo  $[T_n, T_n + t_{MTW_n}]$ , de acuerdo con la función de distribución acumulada de Weibull, es [15]:

$$\Lambda(T_n, T_n + t_{MTW_n}) = \frac{1}{\alpha^\beta} \left[ (T_n + t_{MTW_n})^\beta - (T_n)^\beta \right] \quad (6)$$

Donde, como ya se ha comentado,  $t_{MTW_n}$  es el mínimo tiempo para la garantía tras el último fallo y se realizó una reparación y  $(T_n + t_{MTW_n})$  es equivalente a  $(T_{MTW_n})$ .

##### Cálculo de la fiabilidad del sistema para el recomendado periodo de garantía ( $T_n + t_{MTW_n}$ ):

Asumiendo una distribución Weibull, la función de fiabilidad se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$R(T_{MTW_n}) = \exp\{-\alpha \times [(T_{MTW_n})^\beta - (T_n)^\beta]\} \quad (7)$$

**Cálculo de la probabilidad de fallo para el tiempo de garantía recomendado ( $T_n + t_{MTWn}$ ):**

Obviamente, de la formulación anterior, la probabilidad de fallo en un sistema será por tanto:

$$F(T_{MTWn}) = 1 - R(T_{MTWn}) \tag{8}$$

Como puede verse en el proceso descrito anteriormente, un balance del riesgo ha sido aplicado para el cálculo del tiempo de garantía recomendado y no una función objetiva. Básicamente, el porcentaje considerado como mínima fiabilidad durante el periodo de garantía es un parámetro a ser estimado durante el proceso de cálculo propuesto, así como la posibilidad de determinar su relación con los costes.

**3. CASO PRÁCTICO**

Como se ha comentado, los casos prácticos se suelen usar para respaldar y ayudar a la comprensión de temas teóricos en ingeniería y otros campos de investigación. En este artículo se muestran los resultados de un caso práctico que transmite de manera clara el uso del desarrollo matemático descrito en el apartado anterior para calcular el periodo de garantía óptimo.

**3.1. ESCENARIO DE APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO**

Existen diferentes tipos de garantías que se adecúan a diferentes productos [2], [18]. Por ejemplo:

- Productos estándar: FRW (“Free Replacement Warranty”, i.e. Garantía de Reposición Gratuita), PRW (“Pro Rata Warranty”, i.e. Garantía Prorrateada), o una combinación de ambas.
- Productos comerciales (comprado en volumen): Garantía aplicada a una flota o un grupo de artículos.
- Productos personalizados: RIW (“Reliability Improvement Warranty”, i.e. Garantía para la Mejora de la Fiabilidad).
- Garantía base y garantía extendida.
- Etc.

El caso aquí expuesto tratará con un producto comercial cuya garantía es negociada con el cliente, particularmente el periodo de garantía de las tareas específicas de reparación, cuando dicha reparación es requerida. Se trata de una empresa líder en la industria del metal que trabaja a nivel mundial diseñando, fabricando y comprando un gran rango de vehículos industriales, motores y otros componentes para clientes industriales así como otros productos relacionados,

como recambios. No obstante, esta compañía también podría ser una subcontrata que ofrece servicios de mantenimiento con su correspondiente garantía.

En nuestro caso, el cliente (también una importante entidad en el sector industrial, área de motores de empujadores (remolcadores) que operan en el Canal de Panamá) está interesado en la adquisición, uso y mantenimiento de unos motores específicos. Estos motores han sido desarrollados y probados por el fabricante y ya están siendo usados. Esto significa que hay suficientes datos sobre el comportamiento de los motores y, por tanto, la empresa de servicios puede ofrecer al cliente unos periodos de garantía específicos tras los servicios de mantenimiento, asegurando que el motor reparado tendrá una determinada disponibilidad durante un periodo específico de tiempo. La disponibilidad es determinada por la compañía de acuerdo al riesgo que la organización está dispuesta a asumir. El periodo de tiempo específico mínimo de garantía es lo que va a ser determinado a continuación.

**3.2. APLICACIÓN AL CASO PRÁCTICO**

*Ejercicio 1:*

Como se ha mencionado, el fabricante tiene ya un despliegue de datos sobre el comportamiento de los motores. Tal y como muestra la Tabla 1, los fallos y reparaciones se representan respecto a  $t_i$ . Con este  $t_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ), los valores ya definidos son:

- $T_i$  (horas)
- $T_n / T_i$
- $Ln(T_n / T_i)$

Con estos valores y aplicado las fórmulas desarrolladas en los apartados anteriores, se pueden obtener  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$ ,  $TNF_n$ ,  $t_{MTWn}$ ,  $\Lambda$ ,  $R(T_s)$  and  $F(T_s)$ . Sin embargo, para ver cómo afecta el NHPP al proceso de cálculo, se va a aplicar las fórmulas anteriores para diferentes números de eventos conocidos. Es decir, analizaremos el comportamiento del sistema para  $n = 4$ ,  $n = 6$  y  $n = 8$ .

Empezando con  $n = 8$ :

Con estos datos y aplicando las fórmulas anteriormente descritas:

	Evento(i)	$t_i$ (horas)	$T_i$ (horas)	$T_n/T_i$	$Ln(T_n/T_i)$
<b>n=8</b>	1	49.234,00	49.234,00	5,10	1,63
	2	46.267,00	95.501,00	2,63	0,97
	3	42.875,00	138.376,00	1,81	0,60
	4	36.789,00	175.165,00	1,43	0,36
	5	24.008,00	199.173,00	1,26	0,23
	6	17.879,00	217.052,00	1,16	0,15
	7	17.500,00	234.552,00	1,07	0,07
	8	16.500,00	251.052,00	1,00	-

Tabla 1: Datos históricos del motor para el caso de  $n = 8$

$\alpha_n$	$\beta_n$	TNF <sub>n</sub>	t <sub>MTWn(20%)</sub>	t <sub>MTWn(40%)</sub>	t <sub>MTWn(60%)</sub>	$\Lambda$	R(T <sub>s</sub> )	F(T <sub>s</sub> )
1,239698E-10	2,001898	15.213,99	3.042,80	6.085,60	9.128,40	0,568589	0,566324	0,433676

Tabla 2: Resultados obtenidos con n = 8

Los valores en la Tabla 3 muestran un tiempo de fallo cercano a las 18 000 horas en el evento 6. Aplicando distintos porcentajes (20%, 40% y 60%) pueden obtenerse distintos

tiempos para el periodo de garantía recomendado. El uso de un t<sub>MTWn</sub> u otro es una decisión que puede ser tomada con más facilidad si se conoce el tiempo esperado de fallo  $\Lambda$ , así como la fiabilidad del sistema R(T<sub>s</sub>). Para este cálculo ha sido considerado un año de funcionamiento tras la (t<sub>s</sub> = 8.760 h).

	Evento(i)	t <sub>i</sub> (horas)	T <sub>i</sub> (horas)	T <sub>n</sub> /T <sub>i</sub>	Ln(T <sub>n</sub> /T <sub>i</sub> )
n=6	1	49.234,00	49.234,00	4,41	1,48
	2	46.267,00	95.501,00	2,27	0,82
	3	42.875,00	138.376,00	1,57	0,45
	4	36.789,00	175.165,00	1,24	0,21
	5	24.008,00	199.173,00	1,09	0,09
	6	17.879,00	217.052,00	1,00	-

Tabla 3: Datos históricos del motor para el caso de n = 6

Aplicando el proceso para n = 6, se obtienen los resultados mostrados en las Tablas 3 y 4:

Finalmente, los resultados para n = 4 se muestran en las Tablas 5 y 6:

Con este ejercicio puede observarse como decrece el tiempo hasta el

$\alpha_n$	$\beta_n$	TNF <sub>n</sub>	t <sub>MTWn(20%)</sub>	t <sub>MTWn(40%)</sub>	t <sub>MTWn(60%)</sub>	$\Lambda$	R(T <sub>s</sub> )	F(T <sub>s</sub> )
1,983685E-10	1,963938	17.722,99	3.544,60	7.089,20	10.633,80	0,484822	0,615807	0,384193

Tabla 4: Resultados obtenidos con n = 6

	Evento(i)	t <sub>i</sub> (horas)	T <sub>i</sub> (horas)	T <sub>n</sub> /T <sub>i</sub>	Ln(T <sub>n</sub> /T <sub>i</sub> )
n=4	1	49.234,00	49.234,00	3,56	1,27
	2	46.267,00	95.501,00	1,83	0,61
	3	42.875,00	138.376,00	1,27	0,24
	4	36.789,00	175.165,00	1,00	-

Tabla 5: Datos históricos del motor para el caso de n = 4

siguiente fallo así como la fiabilidad del sistema cuando la cantidad de fallos y reparaciones aumenta.

Si se analiza por separado la evolución con el tiempo de estos casos, las diferencias mencionadas en la fiabilidad del sistemas son aún más notables. Es

$\alpha_n$	$\beta_n$	TNF <sub>n</sub>	t <sub>MTWn(20%)</sub>	t <sub>MTWn(40%)</sub>	t <sub>MTWn(60%)</sub>	$\Lambda$	R(T <sub>s</sub> )	F(T <sub>s</sub> )
4,665380E-10	1,894397	21.897,26	4.379,45	8.758,90	13.138,35	0,387416	0,678809	0,321191

Tabla 6: Resultados obtenidos para n = 4

	Primer año				Segundo año			
	2190	4380	6570	8760	10950	13140	15330	17520
n=4	0,909129	0,825642	0,749029	0,678809	0,614524	0,555741	0,502054	0,453076
n=5	0,900119	0,809372	0,727017	0,652365	0,584771	0,523638	0,468411	0,418575
n=6	0,887389	0,786549	0,696364	0,615807	0,543941	0,479907	0,422924	0,372276
n=7	0,877602	0,769262	0,673489	0,588932	0,514375	0,448718	0,390973	0,340251
n=8	0,869084	0,754385	0,654025	0,566324	0,489785	0,423073	0,365002	0,314518

Tabla 7: R(T<sub>s</sub>) dependiendo de n

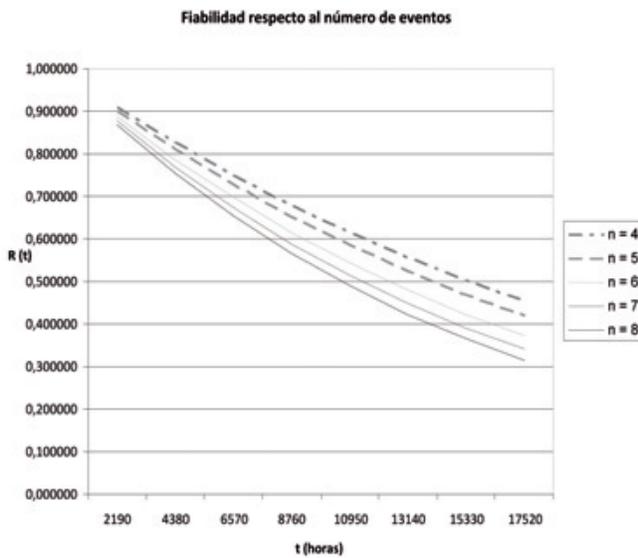


Fig. 3: Evolución de la fiabilidad con el tiempo y el número de eventos

decir, los diferentes riesgos asumidos en la garantía (es decir, las diferentes decisiones en cuanto al porcentaje usado en el cálculo de la garantía) resultan distintos valores para el tiempo mínimo de la garantía. La Tabla 7 muestra la evolución de  $R(T_g)$  durante 2 años una vez que los eventos  $n = 4, \dots, 8$  han tenido lugar. La representación gráfica puede apreciarse en las Figuras 3 y 4, ilustrando el comportamiento mencionado.

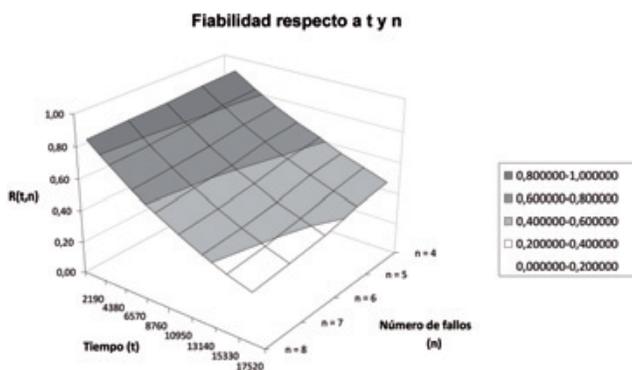


Fig. 4: Representación tridimensional de  $R(t, n)$

**Ejercicio 2:**

Además del ejercicio descrito, que ha ayudado a ilustrar el cálculo de los periodos de garantía, también es posible explorar cómo el tiempo hasta el siguiente fallo (considerando  $T_{NF}$  como una variable) varía aplicando distintas políticas de garantía.

Con este propósito, y como segundo ejemplo, vamos a considerar que la compañía prefiere mantener un nivel específico de riesgo en la probabilidad de fallo. Por ejemplo, digamos que  $F(T_g) \leq 0,20, 0,30$  and  $0,40$ . En otras palabras, esto significaría que la compañía no va a admitir más de

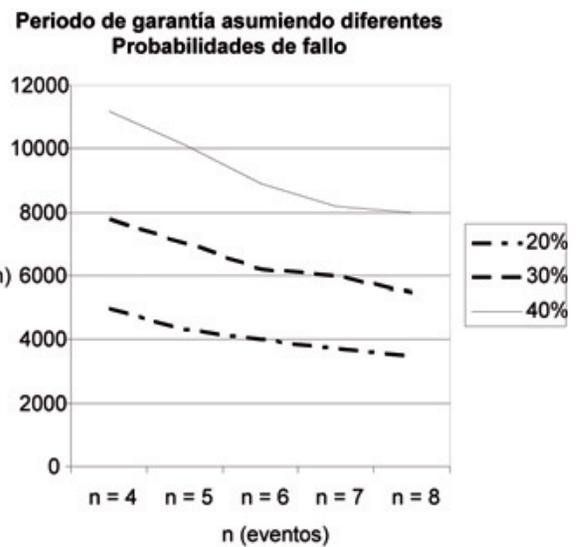


Fig. 5: Representación de los periodos de garantía

un 20%, 30% o 40% en la probabilidad de fallo durante el periodo de garantía. Por lo tanto, si se mantiene constante el nivel de fallo, se pueden obtener los distintos valores para el periodo de garantía como los mostrados en la Figura 5. Como puede observarse, cuanto mayor es la probabilidad de fallo, mayor es la pendiente de la curva del periodo de garantía. En otras palabras, si la compañía asume un mayor riesgo en sus políticas de garantía, el descenso en los tiempos de garantías debería ser más importante cuando el número de fallos y reparaciones también aumenta.

Finalmente, tomando en cuenta los resultados obtenidos del tiempo mínimo de garantía  $t_{MTW(20\%)}$  (ver Tablas 2, 4 y 6), se tomó como decisión que los valores mínimos de garantía a exigir en futuros procesos de compra de equipos similares, oscilarían entre 3.042,80 y 4.379,45 horas. En la actualidad el periodo de garantía dado por el fabricante para los componentes de los motores evaluados es de 2500 horas efectivas de operación, valor inferior al resultado obtenido con el tiempo mínimo de garantía estimado a partir del método NHPP. Como información adicional, es importante mencionar que la organización que adquirió los sistemas evaluados en este artículo, ha decidido exigir como tiempo mínimo de garantía el valor de 4500 horas de operación, para procesos de compra de motores de la misma marca y de condiciones similares de operación.

**4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

El resultado obtenido para el periodo de garantía en el ejercicio 1 es, como ya se ha dicho, un valor mínimo considerando los distintos porcentajes (20%, 40% y 60%) del tiempo esperado hasta el siguiente fallo ( $T_{NF}$ ), calculado con el modelo de  $NHPP$ . La compañía debería decidir ahora, como otro aspecto de negocio, si resulta conveniente o no

alargar este periodo con el consecuente aumento en los costes de garantía.

Por lo tanto, el análisis de dicho porcentaje es uno de los pasos a tener en cuenta en este proceso, donde se necesita conocer como datos de entrada el riesgo que la compañía está dispuesta a asumir para el periodo de garantía. Esta es precisamente la razón por la que se ha realizado el ejercicio 2.

En el caso de que el periodo de garantía sea un aspecto de obligada consideración en el contrato de reparación o mantenimiento (o incluso impuesto por la legislación vigente [18]), el fabricante (o la compañía externa que ofrece el servicio de mantenimiento con la correspondiente garantía) puede predecir con los cálculos anteriores el tiempo que pasará hasta la siguiente asistencia en garantía, simplemente para ahorrar una parte del presupuesto general para este servicio postventa y preparar a su equipo de técnicos para tal eventos en el futuro.

Para este propósito, el modelo NHPP ha sido aplicado para proporcionar buenos resultados en situaciones realistas con mínimas reparaciones [19]. Basado en esto y debido a la naturaleza conservadora y la manejabilidad matemática de sus expresiones, el NHPP fue elegido para este trabajo en particular. Por supuesto, el modelo descrito anteriormente tiene sus ventajas y limitaciones. En general, mientras más realista sea el modelo, más complejas serán las expresiones matemáticas involucradas. Los principales puntos fuertes y débiles de este modelo están resumidas a continuación:

#### Puntos fuertes:

- Es un modelo útil y bastante simple para representar equipos a lo largo de su envejecimiento (deterioración).
- Utiliza expresiones matemáticas relativamente sencillas.
- Es un acercamiento conservador para el análisis del tiempo de garantía para un determinado riesgo asumido [20].

#### Puntos débiles:

- No es adecuado para simular reparaciones que devuelven al equipo a un estado distinto al de “como viejo” [14].

## 5. CONCLUSIONES

Muchos compradores normalmente considerarán que un producto con periodo de garantía relativamente mayor es más fiable que duradero que uno con una garantía menor. Por lo tanto, el periodo de garantía es frecuentemente usado como una efectiva herramienta de marketing frente a otros competidores.

A través de este documento hemos aplicado unas herramientas específicas ya desarrollada en el área de LCCA a un caso particular de un proceso de gestión postventa. Con esta intención, y una vez definido el concepto de garantía y brevemente descrito el marco de referencia para su gestión, se ha analizado el Coste del Ciclo de Vida y especialmente el Proceso de Poisson No Homogéneo (NHPP por sus siglas en inglés). Estas metodologías para el LCCA pueden facilitar y

también mejorar la toma de decisiones en casos de servicios postventa.

La utilización del NHPP puede, por ejemplo, posibilitar la predicción de fallos en el producto y así poder anticiparse reduciendo los costes de reparación. En otras palabras, una correcta gestión de la asistencia en garantía ayuda a reducir costes, posibilita la toma de correctas decisiones y mejora la imagen de la compañía frente al cliente. El NHPP es, por tanto, un buen método para estimar el coste del periodo de garantía debido al hecho de que el porcentaje de fallos obviamente cambiará con el tiempo del sistema y, por lo tanto, no será homogéneo.

Como futuras líneas de investigación, se sugiere profundizar en este campo en lo referente a la gestión del servicio de postventa, como por ejemplo en el análisis de costes mediante avanzados métodos matemáticos que apliquen e-tecnologías de apoyo como vigilancia remota, supervisión, e-diagnosis, etc., para así desarrollar modelos más desarrollados. Además, con las nuevas e-tecnologías aplicadas a la garantía, pueden alcanzarse mayores niveles de calidad del producto y efectividad de la asistencia técnica. Este artículo resume un paquete completo de trabajo presentado a la industria como un informe técnico para conseguir servicios de reparación mínima de motores que trabajan en operaciones marítimas en el Canal de Panamá. Siguiendo esta misma metodología, actualmente se está desarrollando un proyecto en el sector del petróleo en el cual mediante el método NHPP se está estimando el valor mínimo de garantía a exigirle a un fabricante de motores (*Waukesha Industrial Engines*) y que la compañía petrolera adquirió hace 10 años, obteniendo del fabricante en aquel entonces un año de garantía para un total de 70 unidades y con un factor de utilización de cada equipo del 85% promedio al año.

En definitiva, la orientación específica de este trabajo hacia el análisis del factor fiabilidad y su integración con el proceso de estimación de los tiempos mínimos de garantía, se justifica específicamente por el impacto económico de los costes durante las primeras etapas del Ciclo de Vida Útil de un sistema de producción. La falta de previsión ante la aparición inesperada de los eventos de fallos en el periodo de garantía de un activo, es un escenario provocado básicamente por el desconocimiento y por la ausencia de un procedimiento técnico a ser aplicado en la fase de selección de equipos, que integre los procesos de análisis fiabilidad con la estimación del tiempo mínimo de garantía a exigir. Como consideración de cierre, hay que tener en cuenta que la aplicación del método NHPP en los procesos de estimación del tiempo mínimo de garantía, no se debe generalizar de forma inmediata para ser aplicado en cualquier proceso de estimación de periodos de garantía, ya que cada escenario, tendrá sus propias características particulares, motivo por el cual no es factible desarrollar una metodología única de estimación de tiempos de garantía que cubra todas las expectativas y exigencias tanto económicas como técnicas. Sin embargo, es necesario incluir dentro de cualquiera que sea la metodología a utilizar para estimar los tiempos

mínimos de garantías, modelos que permitan estimar de forma eficiente el comportamiento de la fiabilidad, con el fin de poder disminuir el nivel de incertidumbre en el proceso de evaluación de los costes totales esperados durante el tiempo de garantía estimado de un activo de producción.

## 6. AGRADECIMENTOS

Esta investigación se ha realizado con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación Español, a través del Proyecto EMAINSYS (DPI2011-22806) "Sistemas Inteligentes de Mantenimiento. Procesos emergentes de E-maintenance para la Sostenibilidad de los Sistemas de Producción, y de los fondos FEDER.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] González-Prida V, Crespo Márquez A et al. (2009) "Warranty cost models State-of-Art: A practical re to the framework of warranty cost management". Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications – Martorell et al. (eds), pp. 2051-2059. © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-55509-8.
- [2] Murthy DNP, Blischke WR. "Warranty management and product manufacturing". Springer-Verlag London Limited, 2005 (pp 302 + xviii). ISBN 1852339330
- [3] González-Prida V, Crespo Márquez A. "BOOK REVIEW: Reliability Engineering. Warranty Management and Product Manufacture" (By D.N.P. Murthy and W.R. Blischke). TPCP Production Planning & Control, 2010, Taylor and Francis.
- [4] Woodhouse J. 1993. Managing Industrial Risk, Chapman Hill Inc, London.
- [5] Markeset T and Kumar U. 2001. "R&M and risk analysis tools in product design to reduce life-cycle cost and improve product attractiveness", Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 22-25 January, Philadelphia, pp. 116-122.
- [6] Blanchard BS. 2001. "Maintenance and support: a critical element in the system life cycle", Proceedings of the International Conference of Maintenance Societies, paper 003, May, Melbourne.
- [7] Blanchard BS. and Fabrycky WJ. 1998. Systems Engineering and Analysis, 3rd ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [8] Goffin K. 2000. "Design for supportability: essential component of new product development", Research-Technology Management, Vol. 43, No. 2, pp. 40-7.
- [9] Smith C and Knezevic J. 1996. "Achieving quality through supportability: part 1: concepts and principles", Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 21-9. <http://dx.doi.org/10.1108/13552519610120423>
- [10] Woodward DG. 1997. "Life Cycle Costing – Theory, Information Acquisition and Application", International Journal of Project Management, Vol. 15, No. 6, pp. 335-344. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00089-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00089-0)
- [11] Yañez M, Gómez de la Vega H and Valbuena G. 2004. Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo. ISBN 980-12-12-0116-9, Editor: Reliability and Risk Management, S.A., México. [http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00044-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00044-3)
- [12] Ascher H and Feingold H. "Repairable System Reliability: Modeling, Inference, Misconceptions and their Causes", New York, Marcel Dekker, 1984.
- [13] Crow LH. 1974. "Reliability analysis for complex repairable systems", Reliability and biometry, Proschan F, Serfling RJ, eds., SIAM, Philadelphia, pp. 379-410.
- [14] Yañez M, Joglar F, Mohammad M. 2002. "Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 77, pp. 167-180.
- [15] Modarres M, Kaminskiy M and Krivtsov V. 1999. Reliability engineering and risk analysis. Marcel Dekker Inc., New York.
- [16] González-Prida V, Gómez JF and Crespo A. "Case study: warranty costs estimation according to a defined lifetime distribution of deliverables". World Congress on Engineering Asset Management, WCEAM 2009, Athens. ISBN 978-1-84996002-1.
- [17] González-Prida V, Crespo A, Moreu P et al. "Availability and reliability assessment of industrial complex systems: A practical view applied on a bioethanol plant simulation", Safety and Reliability for Managing Risk. London, UK. 2009 Taylor & Francis Group. ISBN 978-0-415-48513-5. Pag. 687-695.
- [18] González-Prida V, Barberá-Martínez L, Gómez-Fernández JF et al. "Contractual and quality aspects on warranty: best practices for the warranty management and its maturity assessment" International Journal of Quality and Reliability Management, IJORM 2012.
- [19] Asiedu Y, and Gu P. 1998. "Product lifecycle cost analysis: state of art review", International Journal of Production Research, Vol. 36 No. 4, pp. 883-908. <http://dx.doi.org/10.1080/002075498193444>
- [20] Hurtado JL, Joglar F and Modarres M. 2005. "Generalized Renewal Process: Models, Parameter Estimation and Applications to Maintenance Problems", International Journal on Performability Engineering, Vol. 1, No. 1, paper 3, pp. 37-50.